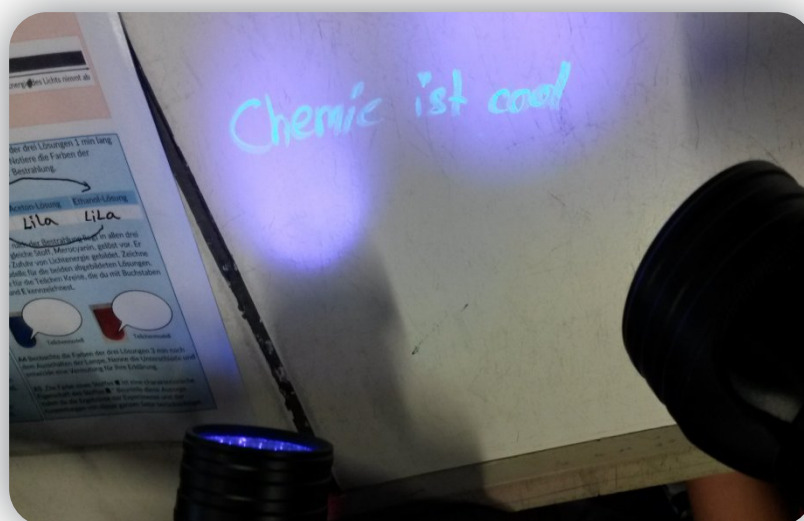


Explorative Studie zur curricularen Einbindung photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht



Dissertation

zur Erlangung des akademischen Doktorgrades

an der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
der Bergischen Universität Wuppertal vorgelegt

von

Yasemin Yurdanur
geb. in Dortmund

Wuppertal 2020

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20200528-104054-9

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3A468-20200528-104054-9>]

DOI: 10.25926/j4a4-b813

[<https://doi.org/10.25926/j4a4-b813>]

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von November 2016 bis Februar 2020 unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Michael W. Tausch im Arbeitskreis Didaktik der Chemie.

Erstgutachter: Prof. Dr. M. W. Tausch
Zweitgutachterin: Prof'in. Dr. C. Bohrmann-Linde

Prüfungskommission: Prof. Dr. M. W. Tausch
Prof'in. Dr. C. Bohrmann-Linde
Prof. Dr. T. Benter
Prof. Dr. A. Banerji

Tag der Disputation:

*Babama ve Anneme
ithafen*

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig im Arbeitskreis Didaktik der Chemie unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. Michael W. Tausch durchgeführt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen habe ich als solche kenntlich gemacht. Weiterhin erkläre ich, dass die Dissertation weder in der gegenwärtigen noch einer anderen Fassung einem anderen Fachbereich einer wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen hat.

Wuppertal, den 05.02.2020

(Yasemin Yurdanur)

*Auf der Durchreise.
Station: Promotionsstudium.*

Danksagung

Bei meinem Doktorvater *Prof. Dr. Michael W. Tausch* bedanke ich mich für die Ermöglichung der Promotion durch die Aufnahme in den Wuppertaler Arbeitskreis und insbesondere für die großartige Betreuung. Zudem danke ich für die Themenstellung, durch welche sich für mich die Tür zu der faszinierenden Welt der Photochemie eröffnete, die ich mit viel Vergnügen und großem Interesse mit der Welt der Schüler verbinden durfte. Dabei wurde ich mit lehrreichen Gesprächen und konstruktiven Ratschlägen nicht nur in meiner Arbeit, sondern auch in meiner Forscherpersönlichkeit gefördert. Besonders dankbar bin ich dafür, dass Sie für meine Anliegen immer ein offenes Ohr hatten und ich von Ihrer jahrzehntelangen wertvollen Erfahrung und Ihrem fachwissenschaftlichen sowie -didaktischen Wissen profitieren durfte. Über das Wissenschaftliche hinaus habe ich auch Wichtiges für's Leben gelernt.

Ebenfalls möchte ich *Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde* ganz herzlich für die Übernahme der Zweitbegutachtung danken. Es hat mich wirklich erfreut, die Gelegenheit bekommen zu haben, auch mit Dir als eine sehr wohlwollende Chefin arbeiten, neue Perspektiven gewinnen und somit meinen Chemiedidaktik-Horizont erweitern zu dürfen.

Dafür, dass ich diese Zeit in lehrreicher, lustiger und schöner Erinnerung behalten darf, danke ich jedem einzelnen ehemaligen und aktuellen AK-Mitglied: *Diana, Heidrun, Ingrid, Maria, Melanie, Nadine, Rebecca, René, Richard, Sebastian*, besonders *Ibeth, Nico* und unserer tollen Sekretärin *Renate*. Und: *Dr. Jana Hübner*, dir danke ich für die vielen philosophischen, wirklich bereichernden Bürodialoge über Gott und die Welt, Fachwissenschaftliches, und das Kochen. Es war so positiv deine Unterstützung und Motivation zu spüren. Wir hatten zuletzt auch mit *Elli Kießling* zu Dritt im Büro eine durchweg angenehme Wohlfühlatmosfera. Außerdem möchte ich *Rainer Brunnert* für die Wertschätzung all der Unterhaltungen über unsere Forschungsarbeiten und mehr danken.

Während meiner dreieinhalb Jahre in Wuppertal durfte ich viele Menschen kennenlernen, die für mich eine Lebensbereicherung sind und auf ihre Art zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Deshalb danke ich insbesondere den netten universitären Reinigungskräften *Cemile abla, Şefika abla* und *Halime abla*, der freundlichen *Frau Drechsler* im Altenzentrum, meinem fleißigen Nachhilfeschüler *Jarno*, meiner geduldigen Klavierlehrerin *Valeria* und der guten Seele *Haesoon*. Den engen Freunden, durch die ich in den letzten Jahren einmal mehr erleben durfte, was Freundschaft ist, danke ich sehr dafür. Dir, liebe Freundin *Waed*, gilt mein ganz besonderer Dank, denn du hast mir mit Rat und Tat zu Seite gestanden und bist zu meiner großen Schwester geworden. Mit dir und durch dich ist Wuppertal vollkommen genießbar.

Mittendrin im Zentrum gilt mein tiefster Dank meiner Familie, insbesondere meinen *Großeltern*, meinen allerliebsten *Eltern*, meinen beiden *Tanten*, und meinen brillanten Geschwistern *Cahide, Merdan, Havva, Muhammed Yusuf* und *Meryem*. Auf euch konnte ich immer zählen. Euren Rückhalt und die Unterstützung jeglicher Art weiß ich sehr zu schätzen. *Eslem*, du hast meine Aufenthalte in meiner Heimatstadt Dortmund um ein Vielfaches versüßt. Danke Liebes.

Ich danke allen Schulen für die Teilnahme an der Studie, zudem den Lehrpersonen für ihr Interesse am Thema und ihren zuvorkommenden Kooperationswillen. Ein großer Dank gilt *Jennifer Rosenow* und *Katharina Butenkemper*. Vor allem aber möchte ich mich bei allen Schülern für das Mitmachen und die super Laune, die ich durch sie immer bekam, bedanken. Durch sie hat meine Forschungsarbeit einen Sinn. Auch danke ich dem *Fonds der Chemischen Industrie* für seine finanzielle Unterstützung.

Danken möchte ich gerne meinem ehemaligen Fachleiter *Herrn Michael Langer*, der mich zur Promotion motivierte. Ich hatte in Ihren Seminarsitzungen in Krefeld, die mir wirklich Freude bereiteten, unheimlich viel Neues gelernt, was ich wunderbar während der Promotion nutzen konnte. Für die tolle Referendariatszeit, die definitiv einen positiven Einfluss auf die Promotion und die Zeit und die darüber hinaus hatte, danke ich *Asude, Astrid, Friedhart, Julia, Sümeýra, Tine* und meiner tollen Ausbildungsbeauftragten *Herta Reinhart*.

Zu guter Letzt möchte ich diejenigen erwähnen, die mir besonders viel bedeuten. Ich durfte über sieben Semester hinweg durch die von mir mitbetreuten Laborpraktika und geleiteten Fachdidaktik-Seminare viele Lehramtsstudierende, aber in erster Linie tolle zukünftige Lehrerpersönlichkeiten kennenlernen. Gemeinsam hatten wir unzählige viele manchmal knifflige und tief sinnige, manchmal sehr kreative, aber doch insbesondere amüsante und lustige – natürlich inhaltlich auf der Chemiesdidaktik basierende – konstruktive Diskussionen. Durch die spürbare Aufmerksamkeit gegenüber dem Inhalt der Veranstaltungen und auch meiner Person habe ich mit Vergnügen und Freude, und immer wieder gerne mit Ihnen gearbeitet. Wir hatten nicht nur einen beachtlichen Lernertrag, sondern auch sichtbar Spaß an der Sache. Deshalb danke ich ganz herzlich *Merve Altay, Oktay Altın, René Barz, Hümeýra Biçer, Lena Blumberg, Julia Brandt, Son Bui, Kristina Burbach, Vera Butgereit, Jannic Dettmar, Moritz Eberlein, Franziska Eisner, Lynn Endermann, Rumeýsa Erdođan, Jennifer Fernol, Jaqueline Fischer, Sanja Franke, Sarah Friedrichs, Mareike Gerlach, Yvonne Grauer, Vanessa Griebeling, Patrick Golla, Barbara Groß, Phillip Gruse, Funda Gündođdu, Manuel Hallbauer, Lukas Hansen, Nora Hoffmann, Dinah Hoffmann, Alexandra Hoffmanns, Pablo Hörter, Mirco Husung, Jessica Imgrund, Daniel Jaworski, Christian Jakobi, Anastasia Jungk, Jennifer Kaiser, Lisa Kern-Jansen, Kaltrina Kosumi, Inga Köhler, Miriam Köll, Nedin Kruskic, Marina Lehmschlöter, Sarah Lerlei, Tomma Lessen, Steffen Loh, Robert Maric, Elisabeta Markus, Mirela Martin, Isabell Meyer, Ilka Meyer, Kirsten Monzel, Lena Müser, Zoë Nölle, Anh Nguyen Thi, Adrian Otte, Levent Özbaş, Christopher Palm, Sascha Panke, Dennis Padolko, Natalia Piehl, Steffen Reermann, Carlotta Rosenbaum, Vivien Rosenke, Nicole Schindler, Maximilian Schmeing, Jaqueline Schrank, Isabel Stahmer, Felix Sickermann, Phillip Simons, Marie-Wenn Steinbart, Mike Stephan, Christine Stolzenberg, Anna Strehnisch, Clara Strotmann, Julian Tamcke, Matthias Teeuwen, Hasan Tan, Kai Tiede, Elisa Tillmann, Anette Timmermann, Nils Tünneßen, Regina Tseytlina, Victoria Usenov, Julian Venzlaff, Matthias Vieregge, Jana Vierschilling, Carl vom Dorp, Aljoscha Waters, Annelie Werle, Marcel Wetterlich, Robin Weitkowitz, Sarah Will, Sabrina Wolff, Kristin Wörpel, Mathias Wößmann, Janis Zenke, Pia Zwerschke, zu guter Letzt *Marvin Donicar, René Maier, Marc Kleingrauthoff* und *Magnus Stoffels*.*

Danke!

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation	5
1.1 Zielsetzung.....	7
1.2 Aufbau der Arbeit.....	9
2 Grundlagen	11
2.1 Entwicklung des Forschungskonzepts.....	11
2.1.1 Innovation.....	11
2.1.2 Implementation.....	14
2.1.3 Curriculare Innovationsforschung.....	18
2.1.4 Forschungscharakter.....	21
2.1.4.1 Explorative Untersuchungen.....	21
2.1.4.2 Nutzenorientierte Grundlagenforschung.....	23
2.1.4.3 Verbindung und Abgrenzung zu anderen Forschungsansätzen.....	26
2.2 Historische Betrachtung der Photochemie.....	29
2.2.1 Status Quo der Photochemie.....	33
2.2.1.1 In der Forschung.....	34
2.2.1.2 In Bildungseinrichtungen.....	37
2.3 Sachanalyse photochemischer Inhalte.....	41
2.3.1 Energiebegriff in der Chemie.....	41
2.3.1.1 Licht als Energieform.....	44
2.3.2 Organische Verbindungen – Farbstoffe.....	46
2.3.2.1 Solvatochromie.....	50
2.3.3 Wechselwirkung zwischen Licht und Materie - Photochemie.....	52
2.3.3.1 Angeregter Zustand durch Lichtabsorption.....	53
2.3.3.2 Vorgänge im angeregten Zustand.....	56
2.3.3.3 Desaktivierung des angeregten Zustands.....	59
2.3.3.3.1 Durch Photolumineszenz.....	60
2.3.3.3.2 Durch aggregationsinduzierte Emission.....	64
2.3.3.3.3 Durch Wärmeemission.....	65
2.3.3.3.4 Durch Photoisomerisierung.....	67
2.3.3.3.5 Durch Elektronentransfer.....	75
2.4 Schlussfolgerungen.....	83
3 Voruntersuchungen	85
3.1 Historische Betrachtung der curricularen Entwicklung des Chemie- unterrichts.....	86
3.2 Analyse von Bildungsstandards und Lehrplänen.....	88
3.2.1 Forschungsfragen und Vorgehensweise.....	89
3.2.2 Bildungsstandards.....	90
3.2.3 Lehrpläne des Faches Chemie.....	93
3.2.3.1 Kernlehrpläne des Faches Chemie in NRW.....	105

3.2.3.2 Kernlehrpläne weiterer naturwissenschaftlicher Fächer..	111
3.2.4 Ergebnisse.....	116
3.3 Schulbuchanalyse.....	119
3.3.1 Forschungsfragen und Vorgehensweise.....	121
3.3.2 Auswertung.....	122
3.3.3 Ergebnisse.....	126
3.4 Erfassung unterschiedlicher Perspektiven auf die Photochemie.....	126
3.4.1 Vorgehensweise und Methodenwahl.....	127
3.4.1.1 Beobachtung.....	128
3.4.1.2 Interview.....	129
3.4.1.3 Schriftliche Befragung.....	131
3.4.2 Auswertung.....	133
3.4.2.1 Beobachtungen im Chemieunterricht.....	133
3.4.2.2 Interviews mit Lehrpersonen.....	135
3.4.2.3 Befragung von Studierenden.....	146
3.4.2.4 Befragung von Lehrerfortbildungszentren.....	155
3.4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	157
3.5 Fazit.....	158
4 Entwicklung von Arbeitsblättern.....	161
4.1 Konzeptualisierung.....	163
4.1.1 PHOTO-LIKE.....	163
4.1.1.1 Auswahl der Experimente.....	166
4.1.1.1.1 Anforderungen an die Experimente.....	167
4.1.1.1.2 Gewählte Experimente.....	172
4.1.2 Didaktisch-methodische Überlegungen zum Entwurf.....	175
4.1.3 Curriculare Einordnung photochemischer Inhalte.....	183
4.1.3.1 Arbeitsmaterialien zum Thema <i>Farbigkeit und</i> <i>Lichtenergie</i>	186
4.1.3.2 Arbeitsmaterialien zum Thema <i>Energiekonversion und</i> <i>-speicherung</i>	188
4.1.3.2.1 Modellexperimente.....	191
5 Hauptuntersuchung.....	195
5.1 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	197
5.2 Planung der Untersuchung.....	198
5.2.1 Untersuchungsdesign.....	198
5.2.2 Stichprobenkonstruktion.....	200
5.2.3 Methoden der Datenerhebung.....	202
5.2.3.1 Feedbackbogen.....	203
5.2.3.2 Lernstandserhebung.....	207
5.2.4 Methoden der Datenauswertung.....	211
5.2.4.1 Feedbackbogen.....	212
5.2.4.2 Lernstandserhebung.....	213

5.2.5 Zeitplan.....	214
5.3 Pilotstudie.....	215
5.3.1 Zielsetzung.....	216
5.3.2 Schlussfolgerungen für die Hauptstudie.....	216
5.4 Hauptstudie.....	217
5.4.1 Zielsetzung.....	218
5.4.2 Organisation der Umsetzung der Studie.....	219
5.4.2.1 Projektausschreibung.....	219
5.4.2.2 Lehrerfortbildungen zu den PHOTO-LIKE-Materialien..	220
5.4.2.3 Schulische Rahmenbedingungen.....	222
5.4.3 Vorgehensweise bei der Umsetzung der Studie.....	222
5.4.3.1 Didaktisch-methodische Vorüberlegungen.....	223
5.4.3.2 Umsetzung durch die Lehrpersonen.....	227
5.4.4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen.....	228
5.4.4.1 Lernerperspektive.....	229
5.4.4.2 Lehrerperspektive.....	242
6 Reflexion und Optimierung der eingesetzten Unterrichtsmaterialien...	257
6.1 Arbeitsblätter.....	257
6.2 Die BlackBox.....	259
6.3 Lösung von Spiropyran in Heptan.....	260
6.4 Weiterentwicklung der PBB-Konzentrationszelle.....	262
7 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick.....	269
7.1 Relevanz der Studie.....	269
7.2 Zentrale Ergebnisse für die schulische Praxis.....	272
7.3 Kritische Eigenreflexion des Forschungskonzepts.....	277
7.4 Kritische Eigenreflexion der Untersuchungsinstrumente.....	279
7.5 Ausblick.....	280
8 Verzeichnisse.....	283
8.1 Abkürzungsverzeichnis.....	283
8.1.1 Einheiten.....	284
8.2 Abbildungsverzeichnis.....	284
8.3 Tabellenverzeichnis.....	289
8.4 Literaturverzeichnis.....	291
9 Anhang.....	331
9.1 Analyseraster zur Schulbuchanalyse.....	331
9.2 Transkriptionszeichen.....	340
9.3 Transkriptionsköpfe – Informationen zu den Interviews.....	341
9.4 Arbeitsmaterialien.....	342
9.4.1 Arbeitsblätter.....	342
9.4.2 Einzelarbeitsblätter.....	349

9.5	Lehrerhandreichungen.....	355
9.5.1	Erwartungshorizont zum AB 1, 6 und 7.....	355
9.5.2	Hinweise zur Vorbereitung der Experimente in AB 1, 6 und 7...360	
9.5.3	Hinweise zur Vorbereitung der Experimente in AB 2, 3/4 und 5. 361	
9.5.4	Hinweise zu den verwendeten Chemikalien.....	362
9.5.5	Glossar zu den Arbeitsblättern.....	363
9.5.6	Vorschläge zur unterrichtlichen Umsetzung.....	365
9.6	Forschungsinstrumente.....	368
9.6.1	Feedbackbogen für Schüler der Sek. 1.....	368
9.6.2	Deckblatt der Lernstandserhebungen.....	369
9.6.3	Lernstandserhebung zum AB 1.....	370
9.6.4	Lernstandserhebung zum AB 2.....	371
9.6.5	Lernstandserhebung zum AB 3/4.....	373
9.6.6	Lernstandserhebung zum AB 5.....	374
9.6.7	Lernstandserhebung zum AB 6.....	375
9.6.8	Lernstandserhebung zum AB 7.....	377
9.7	Deskriptive Statistik zur Hauptstudie.....	379
9.7.1	Unterscheidung nach Sekundarstufe.....	379
9.7.2	Unterscheidung nach Lehrpersonen.....	380
9.7.3	Unterscheidung nach der durchführenden Person.....	381
9.7.4	Unterscheidung nach Arbeitsblatt.....	382
9.8	Organisation der Hauptstudie.....	383
9.8.1	Postalische Einladung zur Teilnahme an der Feldstudie.....	383
9.8.2	Postalische Bestätigung der Teilnahmeberechtigung an der Feldstudie.....	385
9.8.3	Hinweise zur Feldstudie.....	387
9.8.4	Zusätzliche Hinweise zu den Experimenten.....	389

1 Motivation

„Ein jegliches hat seine Zeit, und alles Vorhaben unter dem Himmel hat seine Stunde: [...] *klagen* hat seine Zeit, [...] *suchen* hat seine Zeit [...] *behalten* hat seine Zeit [...]“ [1]

— Der Prediger Salomo

Die Zeit des **Klagens**. Welche der vielen Ereignisse und Fakten sollten hier zur Legitimation dieser Arbeit bzw. zum Verständnis der Zeit des Klagens genannt werden? Unter den Entscheidendsten befinden sich folgende vier:

- *International Energy Outlook 2017* [2]: Prognosen zufolge soll von 2015 bis 2040 der Energieverbrauch auf der Erde um 28 % ansteigen.
- *World Population Prospects 2017* [3]: Das Jahr 2100 erwarte eine Weltbevölkerung von 11,2 Milliarden Menschen. Gegenwärtig sind es 7,3 Milliarden auf der Erde.
- NOAA/NASA. *Annual Global Analysis for 2017* [4]: Seit Beginn der Messungen 1880 lagen die neun weltweit wärmsten Jahre in der Zeit nach dem Jahr 2000.
- „Die größten Nuklearkatastrophen“ [5]: Hiroshima (Japan, 1945), Kyschtym (Russland, 1957), Tschernobyl (Ukraine, 1986) und Fukushima (Japan, 2011).

Die Zeit des **Suchens**. Den Durst nach Energie zu stillen ist der große Auftrag, gar die Mission der Forschung! Denn das Energie-Management könnte (— für die einen ist es das schon —) zur Schicksalsfrage der Zivilisation werden [6]. Es ist die „globale Herausforderung des 21. Jahrhunderts“ [7].

Nachdem das Problem erkannt wurde, hatte die Zeit des Suchens nicht lange gedauert, denn sie war allseits ersichtlich. Zudem ist die Lösung kostengünstig, langfristig sicher, umweltschonend und nachhaltig [8]: Die globale **Energiewende** durch die sogenannten *erneuerbaren Energien*¹. Diese können

- den Schutz natürlicher Lebensgrundlagen der Menschheit,
- die Beseitigung der Energiearmut,
- die Unabhängigkeit von regional konzentrierten Ölreserven mit sich bringen und
- hätten somit auch eine friedensfördernde Wirkung [10].

Eine Form der erneuerbaren Energien, welche mit Abstand am meisten zum Thema wurde und auch in Zukunft noch sein wird, ist die Sonnenenergie.

¹ „Als erneuerbare Energien (regenerative Energien) werden, im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern wie Öl, Kohle und Gas, Energieformen bezeichnet, die nicht auf endliche Ressourcen zurückgreifen.“ [9] Konventionell wird häufig von erneuerbarer Energie gesprochen, wobei damit die in die für Menschen unmittelbar nützliche Energie konvertierbare Energie gemeint ist.

Die Zeit des **Behaltens**. Auch diese Zeit ist geprägt von Ereignissen:

- Jährlich beträgt die als potenzielle erneuerbare Energie nützliche Sonneneinstrahlung hundertfach so viel wie die „gesamte als abbaufähig erachteten Weltreserven an Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran“ [7]. Das größte Potenzial zur Entgegenwirkung der Ressourcenknappheit hätte die „direkte Solarenergienutzung“ [11].
- Prognosen der *WBGU* zufolge werde der Sonnenenergie 2100 eine überragende Bedeutung zugesprochen. D. h. der Anteil der Solarenergie im Energiemix werde mit Abstand zu weiteren erneuerbaren Energien, wie Biomasse, Wind oder Wasserkraft, so weit steigen, dass die globale Energienachfrage nach Solarstrom bis 2040 im Vergleich zu 2010 um mehr als das Tausendfache steigen werde [10].
- Die UN, bei denen auch Deutschland Mitglied ist, hat sich mit der *Agenda 2030* 17 Ziele gesetzt. Eines davon lautet: „bezahlbare und saubere Energie“ [12].
- Nach dem *Klimaschutzabkommen von Paris* zielt Deutschland auf die Senkung der Abgasemissionen bis 2040 um 70 % [13].
- In den letzten Jahren wurden mehrere Nobelpreise für Forschungsergebnisse vergeben, die „Photoprozesse, d. h. Phänomene mit Lichtbeteiligung“ [7], thematisieren.
- Deutschland verpflichtete sich laut EU-Richtlinien dazu, den Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch bis 2020 um 18 % zu steigern.

Ganz diesen Fakten gemäß weisen die Beschlüsse der Kultusministerkonferenz 2004 in den Bildungsstandards dem Fach Chemie eine bedeutende Aufgabe zu: Zum Erkennen, Bewerten und Beherrschen der Fortschritte bei der Entwicklung und Anwendung von „Umwelt- und Energietechnologien“ sei das Wissen aus den naturwissenschaftlichen Fächern nötig. Zudem sollen Lernende für die „nachhaltige Nutzung von Ressourcen“ sensibilisiert werden [14]. Jetzt ist also die Zeit dafür, dass

„Visionen [...] Realität [werden], wenn Lichtquellen beim Experimentieren gleichen Stellenwert erhalten wie Wärme-, und Stromquellen. Wenn wir unserer Schuljugend die Möglichkeit der Chemie mit Licht vermitteln, ist zu hoffen, dass aus ihr eine Generation hervorgeht, der es zu verwirklichen gelingt, was bei einer Konferenz im Internationalen Jahr des Lichts 2015 verheißungsvoll als *The Energiewende by CO₂ capture and conversion into green fuels* beschrieben wurde.“ [15]

Die Energiewende darf nicht am Schulsystem unberührt vorbeischießen, denn die Lernenden von heute werden die Zukunft von morgen gestalten. Dies funktioniert nur, wenn die Schule bzw. der Chemieunterricht rechtzeitig agiert.

1.1 Zielsetzung

„Zeitgemäßer Chemieunterricht wird immer auch daran gemessen, inwieweit er in der Lage ist, die Distanz zwischen dem schulischen Bildungsangebot an den verschiedenen Schularten und den Anforderungen der gegenwärtigen (und zukünftigen) Lebenswelt zu verringern!“ [16]

— P. V. PFEIFER

Deutschland ist eines der zehn Länder mit dem höchsten Energieverbrauch [17], obwohl es nur 11 % des Steinkohleverbrauchs, 10 % des Erdgases und 2 % des Erdöls aus inländischer Förderung abdeckt [18]. Zudem überholte erstmals 2014 der aus erneuerbarer Energie erzeugte Strom den, der aus dem fossilen Energieträger Braunkohle gewonnen wurde [19]. Diese Tatsachen und noch viele mehr bestärken und legitimieren zugleich die in den Kernlehrplänen zu findenden Inhalte für unseren Schulunterricht. *Energie* bzw. *energetische Betrachtungen* bei Stoffumwandlungen ist eines der Basiskonzepte für das Fach Chemie [14, 20]. Im Alltag werden Jugendliche im Zusammenhang mit Politik, Wirtschaft und den neuen Technologien mit Begriffen wie *Energieversorgung*, *Energiebedarf*, *Energieersparnis*, *Energiegewinnung*, *Energiewende* etc. konfrontiert. Auf diesem Niveau kann der Chemieunterricht definitiv nicht mithalten. Jedoch „gibt [es] kein Schulfach, dessen Inhalte sich so rasch erneuern wie in der Chemie“ [7]. Die Lichtenergie ist neben der Wärme und elektrischen Energie diejenige Energieform, die inhaltlich am wenigsten eine Rolle in den Lehrplänen² spielt (s. Kap. 3.2.4). Dies spiegelt nicht die „gegenwärtige [...] Lebenswelt“ [16] wieder.

Mittlerweile sind in der Didaktik der Chemie für den Schulunterricht viele Experimente, die mit der Energieform Licht funktionieren, entwickelt worden [7]. Diese werden hauptsächlich z. B. in Schülerlaboren von Universitäten im Rahmen von Exkursionen und Workshops für Klassen und Kurse angeboten [21]. Jedoch dürfen photochemische Inhalte nicht mehr nur als Exkurse zusätzlich zum regulären Chemieunterricht betrachtet werden. Das Basiswissen zur Photochemie angesichts des aktuellen Forschungsstands geht auch nicht mehr nur die leistungsstarken Lernenden bei Chemiewettbewerben etwas an. Diese Inhalte müssen alle Schülerinnen und Schüler³ erfahren. In der Forschung und auch in der Technik hat die Photochemie bereits ihren Platz (s. Kap. 2.2.1). Auch den Chemieunterricht müssen jene innovativen Inhalte im ausreichenden Maße erreichen [22].

Bisher wurden viele photochemische Experimente in der Forschung mit Blick auf den Schulunterricht entwickelt. Zu diesen wurde ebenfalls zahlreich publiziert [23]. Außerdem wird das Angebot an photochemischen Inhalten teil-

² Die Arbeit wurde vollständig auf das Bundesland Nordrhein-Westfalen bezogen durchgeführt. Hier sind die Kernlehrpläne des Landes NRW gemeint.

³ Im Folgenden wird für anonyme Personengruppen auf explizit geschlechtsspezifische Formen verzichtet und zur Vereinfachung das generische Maskulinum gewählt.

weise durch Experimentierkoffer bzw. -sets und Workshops für Lehrpersonen zugänglicher gemacht [24, 25]. Aber wie viele z. B. von den an den Workshops interessierten Lehrpersonen haben letztendlich die photochemischen Experimente im eigenen Unterricht eingesetzt? Ist der reale Bedarf an diesen wirklich hoch? Demzufolge können das Ausmaß der *Diffusion* photochemischer Inhalte in der Schullandschaft (s. Kap. 2.1.1), die Möglichkeiten der konkreten, nachhaltigen Einbindung bzw. *Implementation* (s. Kap. 2.1.2) photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht und auch der reale Bedarf nach Photochemie bzw. photochemischen Experimenten *nicht* allein durch die Umsetzung von Mitteln zur Diffusion, wie z. B. Lehrerfortbildungen, Schülerlabore und Fachliteratur (s. Kap. 2.1.1) aufgezeigt werden. Was in diesem Zusammenhang noch geklärt werden muss, ist eben die Nachfrage des Chemieunterrichts.

Bislang gibt es keine bekannten veröffentlichten fachdidaktischen Untersuchungen, die sich intensiv mit dem realen Bedarf seitens der Schule, der Exploration der praktischen Umsetzungsmöglichkeiten von photochemischen Experimenten im Chemieunterricht vor Ort an Schulen und somit ihrer Relevanz im schulischen Kontext befassen. So besteht ein Bedarf nach fundierten Erkenntnissen dazu. Als Hauptziel der Arbeit soll hier diese Forschungslücke geschlossen werden. Damit kann schließlich – den unten aufgeführten beiden Zielen übergeordnet – das Potenzial für die erfolgreiche Einbindung photochemischer Inhalte [26] als curriculare Innovation (s. Kap. 2.1.3) in den Chemieunterricht begründet werden.

Das erste Ziel ist daher, das Maß an Erfolg der Umsetzungsmöglichkeiten der *curricularen Innovation* [27, 28] von photochemischen Experimenten in den Chemieunterricht zu beleuchten: Inwieweit können photochemische Inhalte in den Chemieunterricht unter den aktuellen schulischen Bedingungen im Hinblick auf die Lehrpläne eingebunden werden? Deshalb sollen *Indikatoren* (s. Kap. 2.1.2; Kap. 5.1) des Erfolgs der Integration photochemischer Experimente identifiziert werden. Dadurch könnten sich zudem sowohl die Akzeptanz von photochemischen Inhalten durch die Lehrpersonen und Lernenden als auch eventuell der praktische bzw. reale Bedarf und die Bedeutung dieser für den Chemieunterricht herauskristallisieren. Ausgewählte photochemische Experimente sollen dafür mithilfe von dafür didaktisch-methodisch entwickelten Arbeitsmaterialien NRW-weit an Schulen eingesetzt werden, wodurch auch Wege der Umsetzung dieser innovativen Inhalte und die Tragweite der Einbindungsmöglichkeiten dieser in den Chemieunterricht offengelegt werden können.

Das zweite Ziel, das mit dem ersten gleichwertig einhergeht, ist dabei den Lehrenden diese Wege der Integration von photochemischen Inhalten in den Schulunterricht vor Ort aufzuzeigen und die möglicherweise vorhandene Hemmschwelle vor den unbekanntem bzw. angeblich gefährlichen photochemischen Experimenten zu senken. Das Hauptanliegen dieser Arbeit ist deshalb, im Rahmen der curricularen Innovationsforschung eine Win-Win-Situation zu erreichen. D. h.: Es geht nicht nur darum, 1. durch die vorliegende Untersuchung explorativ neue Erkenntnisse für die Chemiedidaktik zu

gewinnen, sondern 2. auch um den unmittelbaren Nutzen durch diese Arbeit, der sich für den Chemieunterricht ergeben soll (s. Kap. 2.1.4.2). Durch die vorliegende Arbeit wird dabei sehr wohl deutlich, dass für diese Ziele unbedingt die Kooperation von Wissenschaft und Praxis erforderlich (s. Kap. 2.1.3) und deshalb die Partizipation der Schüler und Lehrer am Prozess der curricularen Integration photochemischer Inhalte beabsichtigt ist.

1.2 Aufbau der Arbeit

Aus Gründen der fehlenden Hypothesen im Hinblick auf die in Kapitel 1.1 genannten Ziele ist diese Arbeit explorativer Natur. Deshalb sollen die durch die Beantwortung von ausgewählten Fragestellungen erzielten Ergebnisse eine Grundlage zur Hypothesengenerierung für eine mögliche Fortsetzung dieser Forschungsarbeit (vgl. Kap. 7.5) bieten. Hierfür ist die Vorgehensweise wie folgt aufgebaut:

Die Arbeit beginnt nicht unmittelbar in den Chemieräumen der Schulen, sondern richtet zuerst einen weiten, relativ offenen Blick in die "Landschaft" der Photochemie und zoomt sich mit sukzessive gesammelten Erkenntnissen in die Schule – zur ganzheitlichen bzw. ausreichenden Beantwortung der Forschungsfragen.

Die Arbeit ist aufgebaut nach dem Modell aus Abb. 1. Sie orientiert sich strukturell am Verlauf eines Implementationsprozesses und funktionell an den Phasen einer typischen Implementation (s. Kap. 2.1.2).

Im **Kapitel 2, Grundlagen**, wird zuerst der methodische Aufbau der Arbeit im Vergleich mit mehreren Forschungsansätzen im Rahmen der curricularen Innovationsforschung (s. Kap. 2.1.1) legitimiert. Zudem werden hier in zwei weiteren Unterkapiteln zunächst historische (wobei auch der Status Quo der Photochemie geklärt wird), anschließend fachwissenschaftliche Informationen zur Photochemie gegeben. Diesem Wissen, noch stark theoretischer Natur und

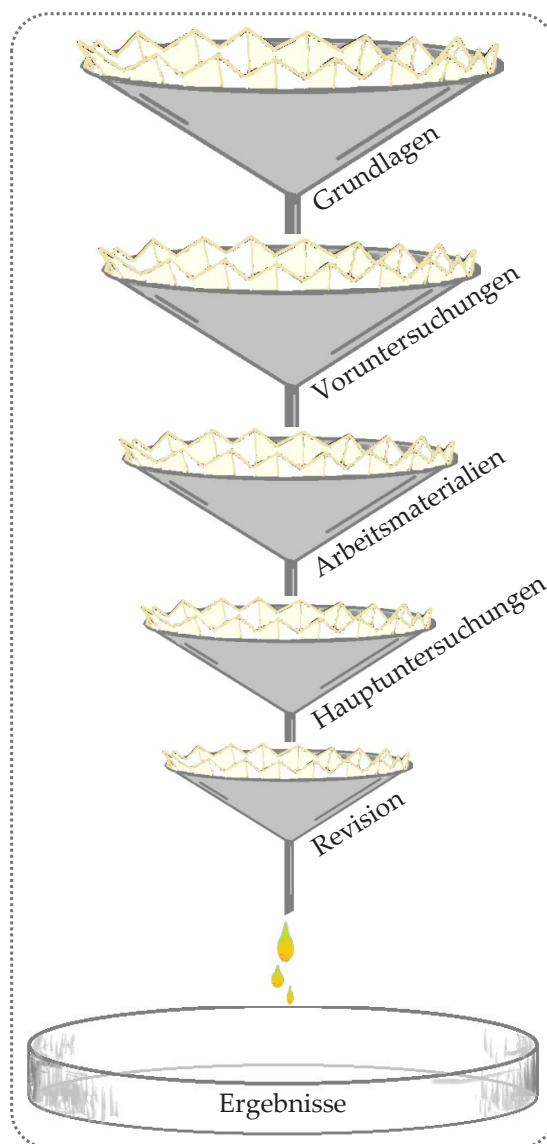


Abb. 1: Aufbau der Forschungsarbeit.

basierend auf Einzelrecherchen, folgen in **Kapitel 3** praktische Voruntersuchungen, wie Hospitationen im Chemieunterricht, Lehrerinterviews, Befragungen von Lehrerfortbildungszentren, Lehrplan- und Schulbuchanalysen. Auf Basis der Ergebnisse aus den beiden Kapiteln folgt in **Kapitel 4** die Entwicklung der zur Umsetzung der Feldstudie nützlichen Arbeitsmaterialien. Zudem werden die ausgewählten photochemischen Experimente vorgestellt. Die Hauptuntersuchung (**Kapitel 5**) umfasst eine NRW-weite Feldstudie an 18 Gymnasien. Das Untersuchungsdesign, die Organisation der Schulen, die Umsetzung der Primärstudie und zuletzt die Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden thematisiert. Wichtig für die nachhaltige Praxis ist **Kapitel 6** zur Revision und Optimierung der eingesetzten Unterrichtsmaterialien. Abschließend werden in **Kapitel 7**, über die Kapitel 1 bis 6 hinweg alle Erkenntnisse "eingeeengt bzw. aufkonzentriert", sodass zentrale Ergebnisse und die Relevanz der Arbeit für den Chemieunterricht letztendlich präsentiert werden können. Schließlich werden Forschungsansatz und -methodik kritisch reflektiert, ein Ausblick für mögliche weitere Vorgehen gegeben sowie Forschungsdesiderate gestellt.

2 Grundlagen

„Es lohnt sich, die Entdeckungen anderer zu studieren, dass für uns selbst eine Quelle der Erfindung entspringt.“ [29]

— G. W. LEIBNIZ

An erster Stelle soll hier das übergeordnete Forschungskonzept vorgestellt werden. Die das Konzept charakterisierenden und besonders ausgeprägten Forschungselemente, welche zum Verständnis des Vorgehens in der Untersuchung hilfreich sein sollen, werden einzeln erörtert. Im Anschluss wird in den beiden Unterkapiteln 2.2 und 2.3 über die Photochemie sowohl historisch als auch fachwissenschaftlich aufgeklärt. Der Inhalt des Kapitels 2.2 ähnelt einem langsamen Zoom von der Entstehung über die Entwicklung bis hin zum aktuellen Stand der Fachrichtung. Dabei soll durch eine kurze Bestandsaufnahme vor allem das Ausmaß der Beschäftigung mit Photochemie in der Forschung und im Vergleich dazu in der Schule dargelegt werden. Schließlich wird die Photochemie sachlich analysiert. Dies ist notwendig, um zum einen den fachlichen Hintergrund der in Kapitel 4 thematisierten Experimente und zum anderen deren curriculare Einordnung (siehe Kapitel 3.3) nachzuvollziehen.

2.1 Entwicklung des Forschungskonzepts

Die Arbeit ist grundsätzlich in das Prinzip der curricularen Innovationsforschung einzuordnen. Dieser Forschungsrahmen wurde von TAUSCH entwickelt und sukzessive in seinen Elementen umgesetzt, indem die damalige Wuppertaler Arbeitsgruppe sie partikulär ausformte [30, 31]. Bevor die Struktur der vorliegenden Untersuchung durch die Elemente der curricularen Innovationsforschung legitimiert wird, soll der Begriff der *Innovation* (s. Kap. 2.1.1) zunächst geklärt werden. Die Arbeit fokussiert sich dabei auf die Endphase der curricularen Innovationsforschung zur Einbindung photochemischer Inhalte in den Schulunterricht, da dort die bereits geschilderte Forschungslücke (vgl. Kap. 1.1) vorliegt. Deshalb wird zudem explizit die *Implementation* (s. Kap. 2.1.2) thematisiert.

2.1.1 Innovation

„Wenn ich die Leute gefragt hätte, was sie wollen, hätten sie geantwortet, ‚bessere Pferde‘.“ [32]

— H. FORD

Im Folgenden wird der Begriff *Innovation* definiert, charakterisiert und zudem für den Ablauf der Untersuchung fundamentales Basiswissen über den Innovationsprozess akzentuiert. Über die Phase der *Diffusion* des Innovationsprozesses wird der Bogen zum Begriff der *Implementation* im Bildungsbereich geschlagen, da durch die vorliegende Arbeit in erster Linie der Prozess der *Umsetzung* der Innovation eine Rolle spielt, welcher von dem Prozess der *Verbreitung* bzw. Diffusion abzugrenzen ist.

Nach ROGERS ist „innovation an idea, practice, or object that is perceived as new by an individual or other unit of adoption. [...] If the idea seems new to the individual, it is an innovation“ [33]. Dies ist eine sehr

offene und allgemeine Definition der Innovation und legt nahe, dass die Bezeichnung *Innovation* „prinzipiell eine subjektive Beobachtungsentscheidung ist“ [34]. Außerdem wird bereits darauf verwiesen, dass etwas zur Beobachtung vorliegen muss und nicht mehr nur ein Gedankenkonstrukt sein kann [34]. Eine breite Auswahl an Definitionen für den Begriff *Innovation* ist vorhanden. Weitgehend hat der Begriff jedoch seinen Platz in der Wirtschaftswissenschaft. Nur eine dieser Begriffserklärungen aus dem Bereich der Wirtschaft lautet: „Engineers say that a new idea has been ‘invented’ when it is proven to work in the laboratory. The ‘idea’ becomes an ‘innovation’ only when it can be replicated reliably on a meaningful scale at practical costs“ [35]. Die Schnittmenge der Definitionen sagt aus, dass die „Innovation mehr als nur eine glänzende Invention“ [36] ist, sodass erst die Umsetzung und der Nutzen einer Idee, wodurch eine sichtbare Veränderung hervorgerufen wird, die Innovation von der Invention unterscheiden lässt (vgl. Kap. 2.1.4.2) [37]. Was heißt das für den Bereich der Bildung? „Wissenschaftliche Erkenntnisse zum Lernen und Lehren, mögen sie auch noch so neu sein, sind ebenso wenig Innovation wie daraus abgeleitete Lehr-Lernkonzepte oder neue Lehr-Lernmedien an sich, allenfalls der Einsatz neuer Erkenntnisse, neuer Konzepte und neuer Medien kann – unter bestimmten Umständen – zu einer pädagogischen oder didaktischen Innovation werden“ [38]. Im Hinblick auf die Innovation im Bildungsbereich lässt sich nach REINEMANN [38] zwischen dem traditionellen und modernem Innovationsverständnis unterscheiden: Der Prozess des Ersteren kann der aus der wirtschaftswissenschaftlichen Terminologie

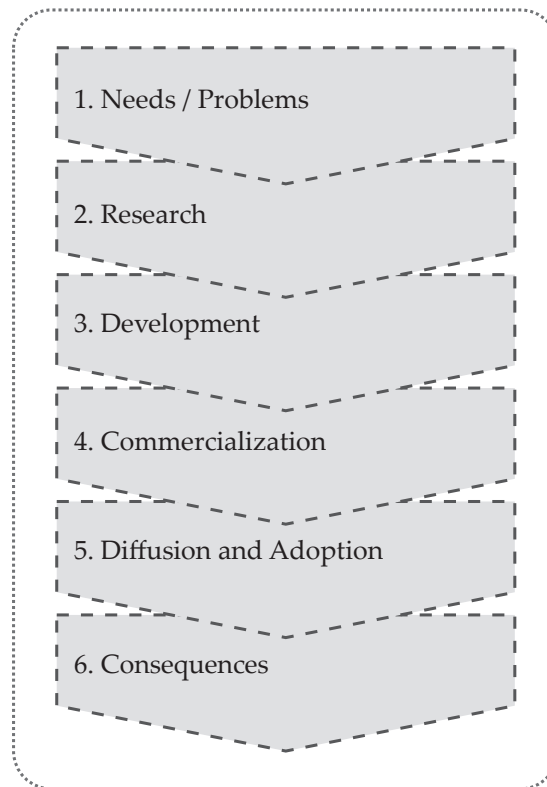


Abb. 2: Phasen der Innovation nach ROGERS [33].

bekanntem radikalen Innovation gleichgesetzt werden [39]. Die Idee stammt meist von einigen wenigen Experten und löst einen *dramatischen Effekt* aus. Die Folge dieser Innovation hingegen ist, wenn man so will, *revolutionär* für alle. Ein Beispiel dafür wäre die Einführung der Schulpflicht. Im modernen Innovationsverständnis ist der *inkremental-evolutionäre Charakter* ausschlaggebend. In erster Linie sind es eher unauffällige Effekte für die Gesamtheit. Als *Ideengeber* ist jeder willkommen. Außerdem lautet die *Devise*: Optimierung des Bestehenden. Beispielsweise spiegelt die langsame Einführung des schülerorientierten Unterrichtsstils jene Merkmale wider. [38]

Für den Innovationsprozess lassen sich verschiedene Phasenmodelle finden. Maßgeblich für die als klassisch betrachtete Abfolge sind „die Phasen von der ersten Idee bis zur Einführung der Innovation in den Markt“ [40], welche da wären: „Invention, Innovation und Diffusion“⁴ [44, 45]. ROGERS beschreibt den Prozess in sechs Phasen (s. Abb. 2). Der Zusammenhang wird wie folgt aufgezeigt: „The innovation-development process consists of all the decisions, activities, and their impacts that occur from recognition of a need or a problem, through research, development, and commercialization of an innovation, through diffusion and adoption of the innovation by users, to its consequences.“ [33] Der gesamte Prozess bildet sich, wie auch oben durch die Analyse der Definition zu bestätigen ist, hauptsächlich aus den beiden Abläufen der Innovationsentstehung und Innovationsdiffusion [46]. Dabei wird die Diffusion als ein „process by which an innovation is communicated through certain channels over time among the members of a social system“ [33] definiert, wobei sie vorwiegend als „Kommunikationsprozess“ betrachtet wird [34]. Um diese Feststellungen machen zu können, muss zwischen dem „Angebot“ an Innovationen für den Unterricht und den „potenziellen Nachfragern“, also den Lehrpersonen und Schulen, eine Kommunikation stattfinden [46]. Dies lässt schlussfolgern, dass unter anderem die Elemente der Innovationsdiffusion ein Maß für die Implementation der Innovation ist. Ein potenzieller Adapter bzw. eine Lehrperson, der die innovativen photochemischen Inhalte in ihren Unterricht einbinden könnte, durchläuft einen Entscheidungsprozess. Modellhaft lässt sich nach ROGERS [33] der individuelle Entscheidungsprozess des Adapters mit fünf Schritten beschreiben (s. Abb. 3).

Folglich wird dieser Prozess, konkret auf den Chemieunterricht bezogen, anschaulich auf der Mikroebene geschildert: Zuerst lernt die Chemielehrperson die photochemischen Experimente z. B. auf einer Tagung zum Chemieunterricht kennen. So entwickelt sie möglicherweise Interesse dafür, recherchiert im

⁴ Je nach Akzentuierung des Prozesses der Verbreitung der Innovation wird dieser in der Bildungsforschung als Diffusion, Dissemination oder auch Transfer debattiert: „Transfer“ wird „häufig bei der Übertragung von Modellversuchsergebnissen in Schulen“ verwendet [28], d. h. im Allgemeinen für die Verbreitung von einer in einem spezifischen Kontext getesteten Innovation auf einen weiteren ähnlichen Kontext [41]. In manchen Fällen wird die geplante und gesteuerte Verbreitung einer Innovation im Gesamtsystem als „Dissemination“ bezeichnet [42]. „Diffusion“ kommt aus dem englischsprachigen Raum und lässt sich tendenziell viel häufiger als Synonym in unterschiedlichen Kontexten für den Begriff der „natürlichen“, spontanen und ungeplanten Verbreitung nutzen und hat somit eine breitere Begriffsverwendung [43].

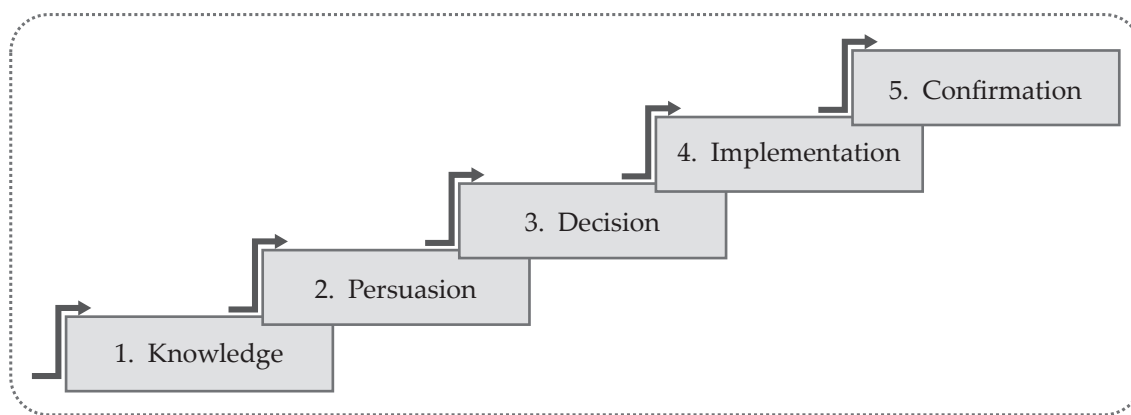


Abb. 3: Der fünfschrittige individuelle Entscheidungsprozess des Adapters nach ROGERS [33].

Internet und in Fachzeitschriften dazu. Als Nächstes kann sie durch die Möglichkeit der Teilnahme an den von der Chemiedidaktik der Universitäten angebotenen Lehrerfortbildungen diese Experimente in der Praxis bewerten, um sich für oder gegen die Umsetzung in den eigenen Chemieunterricht zu entscheiden. Diese Phase wird auch als *Adaption* bezeichnet [41]. Die darauffolgende vierte Phase der *Implementation* bedeutet nach ROGERS, dass „an individual (or other decision-making unit) puts an innovation to use [and] [...] the new idea is actually put into practise“ [33]. D. h.: Im Falle der Entscheidung für eine Implementation besorgt die Lehrperson für ihren Unterricht die nötigen Materialien und überlegt sich, an welcher Stelle ihrer Unterrichtsreihen sie diese innovativen Experimente integrieren kann, sodass sie diese schließlich zum eingeplanten Zeitpunkt mit ihren Schülern im Chemieunterricht durchführen kann. In der letzten Phase geht es darum, dass der Lehrer zur Bestätigung seiner Entscheidung z. B. mit einer zweiten Durchführung der Experimente versucht, Unstimmigkeiten zu reduzieren und dadurch sich in seiner Entscheidung zu bestätigen (*Confirmation*).

2.1.2 Implementation

Dieses Kapitel trägt zum Verständnis der Bedeutung des Herzstücks bzw. Ziels bei, nämlich der *Implementation* von curricularer Innovationsforschung im Kontext des Chemieunterrichts. Im Folgenden werden somit der Implementationsprozess, die Einflussfaktoren auf diesen und die Erfolgsindikatoren einer Implementation erläutert. Schließlich werden mögliche Hindernisse auf dem Weg zur Implementation thematisiert.

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, schließt der Begriff der Innovation – ein Prozess aus Erfindung, Entwicklung, Anwendung und Verbreitung – auch die Tätigkeiten im zeitlichen Intervall des Implementationsvorgangs ein [47]. Die Implementation konzentriert sich lediglich auf die Umsetzung einer Neuheit in die Praxis [41]. Mit den Erkenntnissen von zuvor deckt sich besonders gut die Definition von Implementation nach ALTRICHTER und WIESINGER: „Von Implementation spricht man dann, wenn eine Neuerung an

einem angezielten sozialen Ort aufgenommen und in den dafür vorgesehenen Situationen nach und nach als Standardpraktik übernommen wird“ [48] – und FULLAN sagt: „Implementation consists of the process of putting into practise an idea, program, or set of activities and structures new to the people attempting or expected to change“ [49]. Dies bedingt die Bewahrung einer Diffusion [45]. Implementation ist mehr als nur die Adaption von einer Innovation. Sie benötigt die praktische Realisierung. Erst durch die „tatsächliche [...] Umsetzung von Innovationen in der schulischen Praxis können damit intendierte Veränderungen und Folgen eintreten und auch Einschätzungen zu deren Wirkpotenzialen gemacht werden“ [41].

REINMANN und VOHLE [50] unterscheiden vier Phasen im Implementationsprozess. Unter Betrachtung von mehreren Beschreibungen zu Phasenmodellen fasst GOLDENBAUM die Aktivitäten in diesen Phasen wie folgt zusammen:

Phase	Aktivitäten
Initiation	Analyse der Ausgangssituation, Festlegung von Zielen, Konkretisierung von Startidee und Auftrag, Erstellung von Umsetzungsplan, Teambildung, Kontaktaufbau zu Kooperationspartnern → Vorbereitung
Umsetzung	Entwicklung, Aneignung und Vermittlung der Innovation, eventuell auch Nutzung von Unterstützungsmaßnahmen und Durchführung von Zwischenevaluationen → Durchführung
Evaluation	Diese Phase umfasst im Allgemeinen das Sammeln von Informationen, die Bewertung der Innovation anhand der Informationen und das Treffen von Entscheidungen in Bezug auf die Innovation → Auswertung
Institutionalisierung	U. a. Stabilisierung, Verbreitung (z. B. durch Anreizsysteme, Weiterbildungen), Innovation wird als Standardpraktik angewendet → Verankerung

Tab. 1: Aktivitäten in vier Phasen des Implementationsprozesses der Schulinnovation (vgl. [41]).

Mit der Implementation in der Schule wird der Innovationsprozess beendet. Das Abschließen der Phase der *Institutionalisierung* ist somit auch ein Indikator für den Erfolg einer Schulinnovation.

Analog zu den vier Determinanten des Diffusionsverlaufs (*Diffusions-system, -subjekt, -variablen, -objekt*) [46] aus der Wirtschaft gibt es im Bereich der Schule vier Ebenen von *Einflussfaktoren* auf den Implementationsvorgang [41, 51] (s. Abb. 4; vgl. auch [41, 46]).

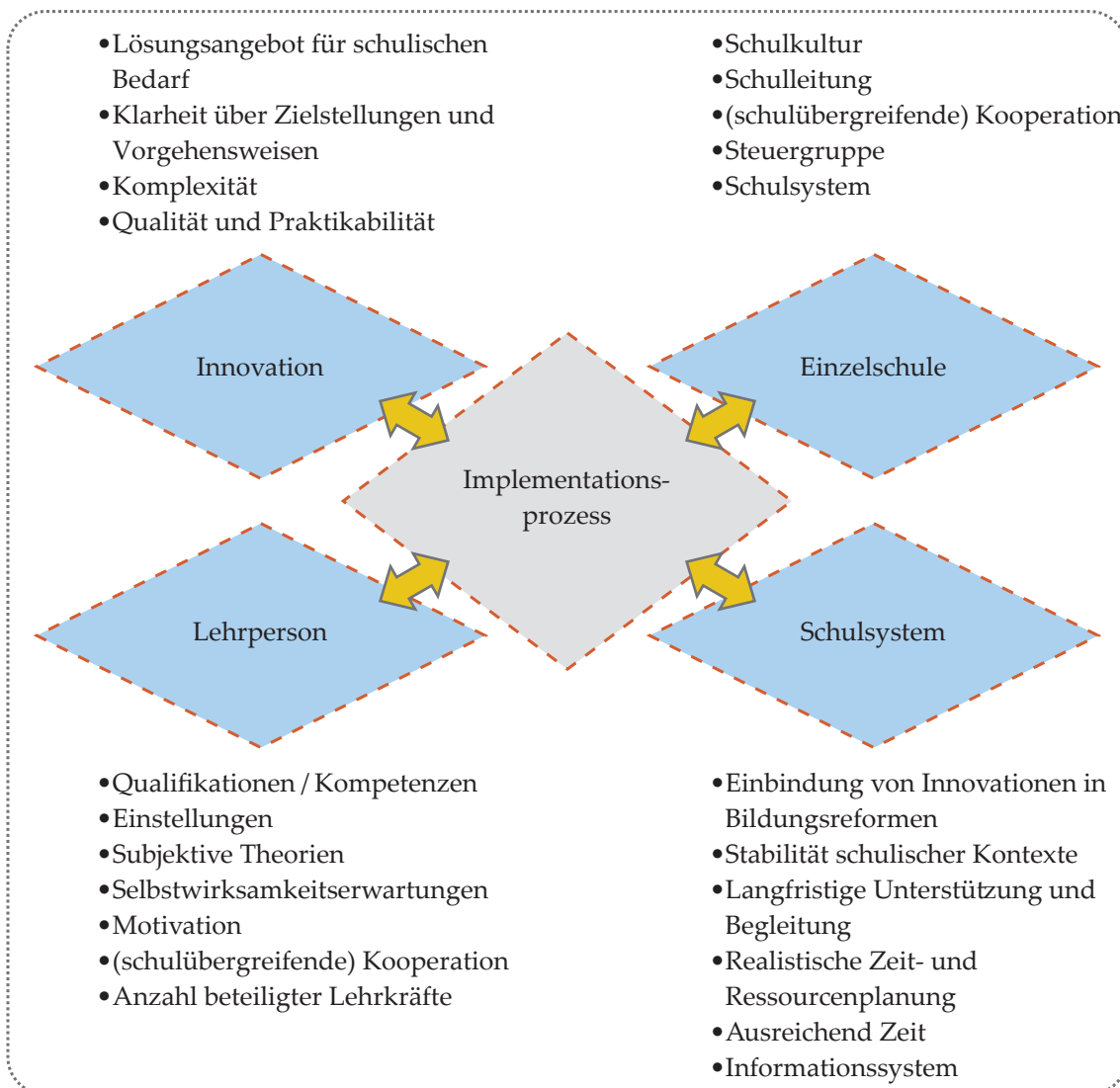


Abb. 4: Vier Einflussfaktoren auf den Implementationsvorgang.

Als Merkmale des *Innovationsgegenstandes* [51] dienen hier ROGERS [33] fünf Charakteristika: „Innovations that are perceived by individuals as having greater relative advantages, compability, triability, observability, and less complexity will be adopted⁵ more rapidly than other innovations“ [33, 34].

In der Wirtschaft, sowie auch übertragbar auf den schulischen Kontext, ist die *Adaptionsrate*, d. h. die Anzahl der Anwender der Innovation bzw. der Lehrer z. B. innovativer Schulexperimente pro Zeiteinheit, ein typisches Erfolgsmaß der Innovation. In erster Linie ist also die schnelle Verbreitung von großem Interesse [46]. Im Gegensatz dazu schlägt COBURN [52] für die Innovationsprozesse im Schulwesen zusätzlich zur quantitativen Verbreitung (*spread*) der Innovation drei weitere Erfolgsindikatoren⁶ [41] qualitativer Natur vor: Tiefe (*depth*), Nachhaltigkeit (*sustainability*) und Identifikation (*shift in reform ownership*). Diese beschreiben die Implementation in ihrer inhaltlichen, qualitativen Dimension,

⁵ Im Englischen wird, um diesen Vorgang der „unveränderten Übernahme einer Idee“ zu beschreiben, „Adoption“ genutzt. Da es im Deutschen im Zusammenhang mit Lebewesen verwendet wird, ist hier zu Deutsch „Adaption“ ein passenderer Ausdruck dafür.

⁶ Nach GOLDENBAUM sind diese „primär für die Entwicklung von Transfervorhaben entwickelt“ worden [41].

der zeitlichen Reichweite und im Ausmaß des Gefühls der Teilhabe bzw. der persönlichen Annahme der Innovation z. B. durch die Lehrpersonen [28, 41]. Von GOLDENBAUM werden diese wie folgt beschrieben:

„*Tiefe* bezieht sich auf das Ausmaß der Veränderung [...]; im Gegensatz zu oberflächlichen Veränderungen, die mit den bisherigen Überzeugungen und der bisherigen Praxis in Einklang stehen, wirken sich ‚tiefe‘ Veränderungen auf Überzeugungen von Lehrkräften, Normen sozialer Interaktion und pädagogische Prinzipien in Schulen aus. Mit *Nachhaltigkeit* ist eine dauerhafte Veränderung gemeint [...]; zur Erfassung dieses Erfolgsfaktors sind längerfristige, bestenfalls über mehrere Jahre angelegte Untersuchungen notwendig, in denen auch berücksichtigt wird, ob Innovationen lediglich oberflächlich umgesetzt sind bzw. nicht zur Anwendung kommen. Unter *Identifikation* wird das Ausmaß verstanden, in dem sich Schulen bzw. Lehrkräfte eine (extern angestoßene) Innovation zu eigen machen [...]; bemessen lässt sich dieses Merkmal etwa mit dem Ausmaß an schulinterner Akzeptanz der Innovation und der Verinnerlichung von Wissen in Bezug auf die Innovation“ [41].

Die Bereitschaft zur Innovationsumsetzung der Lehrpersonen steht mit drei Hauptargumenten in Verbindung: Mehrwörterkennung, zeitlicher Aufwand und die ausreichende Ausstattung mit didaktisch-methodischen Unterrichtsmaterialien [53].

Im Hinblick auf die im Innovationsprozess beteiligten Personen unterscheiden HALL und HORD praktisch zwischen der Entwicklung (*development*) und der Implementation (*implementation*) einer Innovation, indem sie das Verhältnis zwischen diesen metaphorisch als die zwei Seiten einer Medaille bzw. als zwei Hälften des *change process* beschreiben. Dabei schildern sie sehr authentisch die Aufgabenbereiche der *facilitators*⁷:

„However there are some very important differences in how the development and implementation phases unfold. For example, the style of the change facilitators needs to be different. Change facilitators on the development side tend to be very visible and dynamic, while implementation facilitators need to have the patience to work daily with teachers who are attempting to figure out how to use the innovation. [...] Leaders on the development side, such as policy-makers, often lose interest once development is done and implementation begins. They are ready to move on to the next initiative. By contrast, change facilitators on the implementation side have to have a great deal of patience and persistence. For example, they are frequently required to answer the same question from different individuals and to give each an appropriate response. Their patience is really tested when the same person asks the same question more than once! But to achieve implementation success, a change facilitator must properly deal with each question to prevent small problems from turning into large ones“ [54].

⁷ Dieses Wort kann mit „Prozessbegleiter“ übersetzt werden. In der Schule sind nach HALL und HORD die Schulleiter damit gemeint. Jedoch können nach Sicht des Autors die oben beschriebenen Tätigkeiten auch auf jegliche Instanzen übertragen werden, die die Aufgabe der Moderation der Implementation übernehmen.

Für gewöhnlich wird seitens der Universität für die Diffusion der in der Chemiesdidaktik entwickelten Neuheiten, seien es innovative Experimente, Unterrichtsmaterialien oder Konzepte, offenbar gesorgt. Dies geschieht routiniert über Publikationen, Lehrerfortbildungen bzw. Workshops, Schülerlabore oder Experimentiersets [55, 56]. Seitens der Forschung werden also reichlich diffusionsfördernde Angebote gemacht [57]. D.h.: Bis zur Phase der Implementation werden Chemielehrer ausreichend von der Forschung im Entscheidungsprozess begleitet. Doch gerade zwischen den Phasen der *Decision* und der *Implementation* fehlt es durchaus an sicheren Brücken. Die Motive der *Innovationsträgheit im Bildungssystem* stehen im engen Zusammenhang mit den *Einflussfaktoren* sowie auch den *Erfolgsindikatoren*. Anhand von unterschiedlichen Studien, die Schwierigkeiten und Probleme der Umsetzung von Innovation aufklären, ergibt sich folgende Liste offensichtlicher Ursachen [28, 33, 58, 59]: Mangel an...

- anerkannter wissenschaftlicher Autorität im Bildungssektor, der sich im Hinblick auf erfolgreiche Implementationen etabliert hat,
- „change agents“ zum Organisieren und Koordinieren des Implementationsprozesses,
- ökonomischer Attraktivität für die Lehrpersonen,
- Forschungsinteresse an der Vervollständigung des Innovationsprozesses,
- Realisierung des von der Wissenschaft als Anspruch gesetzten Theorie-Praxisbezugs bzw. der Verbreitung wissenschaftlicher Innovation in der Praxis.

So scheint es, dass in der Forschungslandschaft neben den schon bestehenden und tief in der Forschung verwurzelten Arbeitsbereichen, die sich mit der Entwicklung, Evaluierung oder der Diffusion von Innovation beschäftigen, der Bereich der Implementation bzw. des Innovationstransfers noch kein ausreichend großes Arbeitskollektiv gefunden hat und momentan offensichtlich vernachlässigt wird [28].

Eine mögliche Idee zur Förderung der Kooperation zwischen der Forschung und der Praxis schlägt STARK vor: „Um derartige Projekte für Wissenschaftler attraktiver zu machen, müssen sich freilich die Gratifikationsstrukturen im Wissenschaftsbetrieb verändern; hiermit sind jedoch politische Fragen angesprochen, die außerhalb der Reichweite der hier vorgestellten Forschungskonzeption liegen“ [60].

2.1.3 Curriculare Innovationsforschung

„Zeitgemäßer Chemieunterricht wird immer auch daran gemessen, inwieweit er in der Lage ist, die Distanz zwischen dem schulischen Bildungsangebot an den verschiedenen Schularten und den Anforderungen der gegenwärtigen (und zukünftigen) Lebenswelt zu verringern.“ [61]

Bevor nun die Innovationsforschung speziell im Hinblick auf Curricula betrachtet wird, muss zuerst an dieser Stelle das Wort „Curriculum“ definiert werden. Nach SCHORB ist das Curriculum „eine geordnete Zusammenfassung von Lehrzielen, die auf der Basis eines gesamtgesellschaftlichen Konsensus in einer bestimmten Auswahl und Anordnung in fachgebundenen oder fächerübergreifenden Lehrinhalten konkretisiert werden.“ [62] Das „Curriculum“ wird heutzutage oft als ein Synonym zum „Lehrplan“ verwendet. Genauer betrachtet ist jedoch zwischen diesen Begriffen grundlegend zu unterscheiden, da laut BECKER „der Lehrplan amtlichen Charakter hat und für alle Schüler und Lehrer verbindlich ist, während Curricula [...] ein Angebot für die inhaltliche Ausgestaltung seines Unterrichts darstellen hinsichtlich

- der Zielsetzung und Kontrolle der Lernziele,
- des Inhalts, seiner Differenzierung und Organisations,
- der Sequenzen und Lernschritte
- seiner Methoden
- sowie seiner Medien.“ [62]

Demzufolge ist, um es visuell verständlicher zu machen, mathematisch ausgedrückt, der Inhalt des Lehrplans (L) eine echte Teilmenge des Inhalts des Curriculums (C) (s. Abb. 5). Das Curriculum kann in diesem Sinne auch als das „schulinterne Curriculum“ betrachtet werden, welches sich an den Vorgaben der Lehrpläne bzw. Kern- oder Rahmenlehrpläne des jeweiligen Bundeslandes orientieren muss. Aufgrund der allgemeinen Formulierung bzw. nicht erwähnten Aspekte in den Lehrplänen beim Planen der Curricula werden den Lehrpersonen in gewissen Bereichen Entscheidungsfreiheiten (s.o.) zuteil [63, 64].

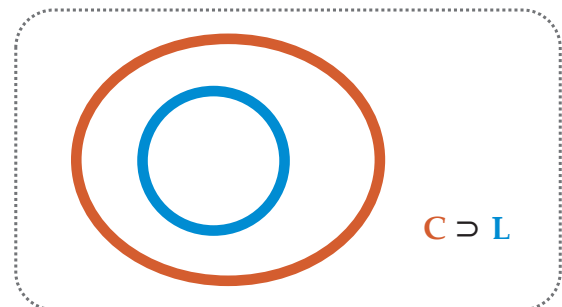


Abb. 5: Darstellung des Verhältnisses der Begriffe L und C mit der Mengenlehre.

Die *curriculare Innovation* ist ein Schwerpunkt der schulischen Implementation [41]. Aus der Chemiedidaktik kommt von TAUSCH folgende Definition: „Curriculare Innovation bedeutet die Erneuerung und Anpassung der Lehrgänge an den Entwicklungsstand wissenschaftlicher Erkenntnisse und gesellschaftlicher Lebensformen in unserer technischen Zivilisation. [...] [Sie] betrifft sowohl die Inhalte des Unterrichts, als auch die Methoden, nach denen unterrichtet wird und die Medien, die dabei verwendet werden“ [55]. Dadurch, dass der „Service für den Chemieunterricht“ [55] die Hauptaufgabe dieses Forschungsrahmens kennzeichnet, wird die Ausprägung des nutzenorientierten Gesichtspunkts betont.

Der Verlauf der curricularen Innovationsforschung wird mithilfe der Abbildung 6 in drei Schritten beschrieben:

„i) Innovative Anwendungen, Begriffe etc. werden aus den vollständig vernetzten Bereichen Wissenschaft-Technik-Umwelt-Leben extrahiert,

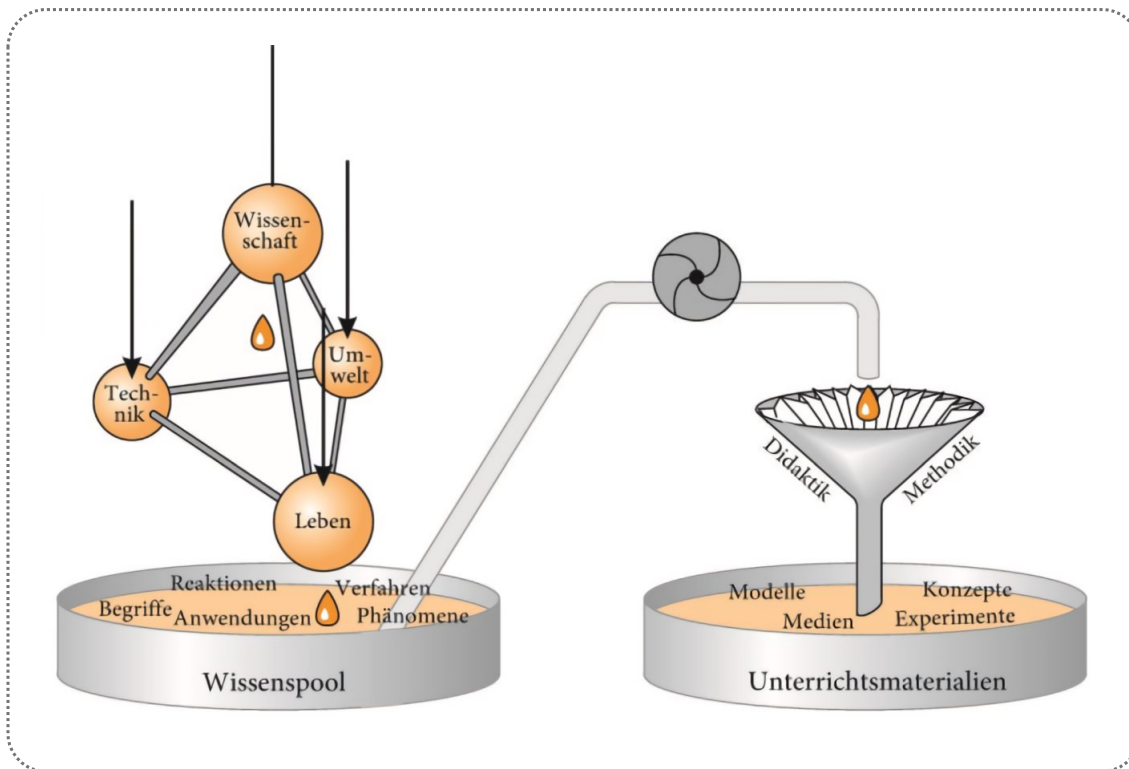


Abb. 6: Verlauf der curricularen Innovationsforschung nach TAUSCH (nach [26]).

ii) aus dem dabei resultierenden Wissenspool werden die als besonders wichtig beurteilten Inhalte ausgewählt und hochgepumpt,

iii) um über den Filter der Didaktik und Methodik für Unterricht und Lehrer aufbereitet zu werden.“ [57]

Die Abbildung 6 stellt jedoch angesichts der Darstellung des Innovationsbegriffs in Kap. 2.1.1 nur die eine Hälfte der curricularen Innovationsforschung dar. Denn an anderer Stelle wird darauf hingewiesen, dass im Anschluss an iii) die neu entwickelten innovativen Materialien, Methoden oder Medien getestet, evaluiert und laufend optimiert werden müssen [55]. Ohne diese zweite Hälfte wäre nach KREES die curriculare Innovationsforschung nicht abgeschlossen [65]. Zudem schlägt BANERJI, um die entwickelten Neuheiten in den Chemieunterricht integrieren zu können, vor, „den didaktischen Mehrwert der entwickelten Experimente, Konzepte und Modelle auch signifikant [zu belegen]“ [30].

Folglich ähnelt das Verständnis des zeitlichen Vorgangs der hier definierten curricularen Innovationsforschung der Aufspaltung dieser in die Innovationsentwicklung und -implementation nach HALL und HORD (vgl. Kap. 2.1.2). Demzufolge kann mithilfe der curricularen Innovationsforschung die Brücke zwischen Forschung und Schule geschlagen werden, wozu durch die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeit beigetragen werden soll. Im Sinne des modernen Innovationsverständnisses von REINMANN (vgl. Kap. 2.1.1) äußert sich TAUSCH zu der Vorgehensweise der Implementation der curricularen Innovation wie folgt: Die Integration von „neuen Erkenntnissen aus der fachdidaktischen Forschung und Entwicklung [...] in die Schulpraxis darf nicht

per Erlass oder Gesetz ‚von oben‘ erzwungen werden“ [22]. Dies bedingt, dass die Meinung der Hauptakteure (vgl. Kap. 2.1.2) unbedingt bei der Implementation der curricularen Innovation berücksichtigt werden muss. Deshalb wurde für die Untersuchungen ein intensiver Austausch mit den Chemielehrpersonen organisiert.

Zu den Schlüsseltechnologien gehören zahlreiche innovative Entwicklungen in den universitären Forschungslaboren im Bereich der Licht-Materie-Wechselwirkungen [66, 67]. So ist die Chemie an sich bereits ein *Innovationsmotor* [68]. Jedoch ist die curriculare Innovation nicht nur deshalb notwendig für den Chemieunterricht, weil sich der Inhalt des Chemieunterrichts gemessen an dem aktuellen Forschungsstand in Deutschland aktualisieren muss, sondern um in erster Linie die individuelle Entwicklung der Jugendlichen und ihre gesellschaftliche Teilhabe an der „zunehmend von Technik dominierten Welt bestmöglich zu fördern“ [30]. Somit ist der vorliegende Kontext der Photochemie besonders reizvoll im Hinblick auf ihre Implementation in den Chemieunterricht (vgl. Kap. 1.1 und [56]), da vor allem zahlreiche bereits für den Schulunterricht entwickelte experimentelle Zugänge vorliegen [7].

2.1.4 Forschungscharakter

Das Prinzip der im Rahmen der curricularen Innovationsforschung durchgeführten Untersuchungen, die sich auf die schulbezogene Endphase bzw. die Implementation konzentrieren, lässt sich hauptsächlich mit zwei in der Forschungslandschaft bekannten Ausdrücken beschreiben: *explorativ* und *nutzenorientiert*. Gerade im praxisorientierten Forschungsansatz der *nutzenorientierten Grundlagenforschung* können diese beiden Adjektive problemlos vereint werden. Zur Begründung der methodischen Vorgehensweise wird somit zum einen der *explorative* und zum anderen der *nutzenorientierte* Charakter der vorliegenden Arbeit betont. Auch Merkmale weiterer Forschungsansätze lassen sich in dem Untersuchungsdesign widerspiegeln, welche in Kap. 2.1.4.3 dargestellt werden.

2.1.4.1 Explorative Untersuchungen

Da zum gewählten Thema (vgl. Kap. 1.1) keine früheren Studien existieren und im Hinblick auf den Forschungsstand der curricularen Innovation von photochemischen Inhalten im schulischen Kontext (vgl. Kap. 2.1.2) noch grundlegende offene Fragen bestehen, verfolgt die Untersuchung in erster Linie ein exploratives Forschungsinteresse.

„Die Exploration bedeutet [nach WITZEL] die Untersuchung eines fremden Lebensbereiches im Rahmen einer flexiblen und reflexiven Vorgehensweise, indem Ergebnisse über Einzeldaten und deren

Zusammenhänge sowie die methodischen Schritte zu ihrer Gewinnung und Überprüfung ständig reflektiert und im Laufe des Untersuchungsprozesses korrigiert werden können. Der Forscher muss demnach bereit sein, seine theoretischen Vorstellungen ständig vom realen Untersuchungsfeld prüfen zu lassen und die methodischen Schritte den situativen Momenten entsprechend anzupassen.“ [69]

Bei explorativen Untersuchungen geht es nicht um das Überprüfen von Hypothesen, sondern lediglich um das Erweitern vorhandener Kenntnisse über den Forschungsgegenstand [70]. Nach BLUMER [71] ist

„Exploration [...] per Definition eine flexible Vorgehensweise, in der der Wissenschaftler von einer zu einer anderen Untersuchungsmethode wechselt, im Verlauf seiner Studie neue Beobachtungssituationen einnimmt, in der er sich in neue Richtungen bewegt, an die er früher nicht dachte, und in der er seine Meinung darüber, was wichtige Daten sind, ändert, wenn er mehr Informationen und ein besseres Verständnis erworben hat.“

In diesem Sinne kann während des gesamten Forschungsprozesses der explorativen Untersuchung, wie es auch hier der Fall ist (vgl. Kap. 3.1.2), methodisch betrachtet nach dem Mixed-Methods-Paradigma, d. h. sowohl qualitativ als auch quantitativ, gearbeitet werden. Üblicherweise werden dabei zudem „viele verschiedene Variablen zum Forschungsgegenstand [...] erhoben, in der Hoffnung, auf diese Weise im Rahmen der [...] Datenanalyse interessante neue Effekte zu entdecken [(vgl. Kap. 5.2.3, Feedbackbögen). [72]]“ Die Ergebnisse der Erkundung sind dann Grundlage für die Formulierung von gut begründbaren Hypothesen [73]. Die Logik solch einer Vorgehensweise und die Bedeutung des explorativen Forschens wird wie folgt beleuchtet:

„Die Hypothesen [...] fallen nicht vom Himmel; nicht Hypothesen, sondern Beobachtungen, d. h. Daten, und die Beschäftigung damit stehen am Beginn jeder Erkenntnisgewinnung. Die Anstöße zur Bildung von Hypothesen, Modellen oder Theorien gehen meist von Auffälligkeiten in diesen Daten aus. Explorative Verfahren sind Hilfsmittel bei der Suche nach solchen Auffälligkeiten, und daher ist ihre Bedeutung [...] unbestreitbar!“ [74]

Konkret wird in dieser Arbeit der "Puls" des Chemieunterrichts nach direktem Kontakt mit der Photochemie ertastet (vgl. [75], s. Kap. 5.4.1). Genauer gesagt werden die praktische Relevanz, die reale Nachfrage und der Bedarf in der Schule erkundet. Es wird weder falsifiziert noch verifiziert. Es geht darum, dass alles, was auffällt, festgehalten wird, um diese Erkenntnisse zur Fortsetzung des Innovationsprozesses verwerten zu können. So kann eben auch die Wahl des Forschungsdesigns sowohl innovationsfördernd sein, als auch in manchen Fällen zum ungünstigen Zeitpunkt des Innovationsprozesses sogar zur Innovationsbremse werden. Beispielsweise weist REINMANN darauf

hin, „dass vor allem das klassische experimentelle Vorgehen⁸ auf die unmittelbare Überprüfung von Erfolgen ausgerichtet ist, was für die Exploration und Analyse möglicher Innovationen in vielen Fällen schon von daher das Ende bedeutet“ [38].

2.1.4.2 Nutzenorientierte Grundlagenforschung

Zur Darstellung des wissenschaftlichen Interesses beim Forschen ist das von STOKES [76] 1997 veröffentlichte Quadrantenmodell (s. Abb. 7) hilfreich. Dabei wird zwischen zwei Dimensionen unterschieden, welche das Koordinatensystem aufspannen: *Erkenntnisinteresse* und *Anwendungs- bzw. Nutzeninteresse* [77, 78]. Die Forschung kann in beiden Dimensionen eine hohe oder niedrige Ausprägung haben. Abhängig davon wird das Forschungsinteresse im Koordinatensystem positioniert. Demnach teilt STOKES dieses in vier Quadranten ein. Zum Verständnis der drei *Forschungstypen* [79] im Quadrantenmodell werden diese jeweils mit einem Forscher charakterisiert, deren Forschung typisch dafür ist: Nils Bohr, Thomas Edison und Louis Pasteur.

„Bei der Grundlagenforschung handelt es sich um experimentelle oder theoretische Arbeiten, die primär der Erlangung neuen Wissens über die grundlegenden Ursachen von Phänomenen und beobachtbaren Fakten dienen, ohne eine besondere Anwendung oder Verwendung im Blick zu haben. [...] In der Grundlagenforschung werden Eigenschaften, Strukturen und Wechselbeziehungen analysiert, um Hypothesen, Theorien oder Gesetzmäßigkeiten zu formulieren und zu prüfen.“ [80]

Während des Ablaufs der Grundlagenforschung können noch weitere offene Forschungsfragen entstehen [72]. Zudem geht es dabei weniger darum, aus den Erkenntnissen unmittelbaren wirtschaftlichen Profit zu erzielen [80]. Die gewonnenen grundlegenden Ergebnisse werden z. B. von der angewandten Forschung genutzt. Das Bohrsche Atommodell und noch weitere Erkenntnisse verdeutlichen, dass Nils BOHRs theorielastige, wissenschaftliche Forschungsergebnisse in erster Linie zur Erklärung von naturwissenschaftlichen Phänomenen dienen. Diese wurden entweder weiterentwickelt oder als Grundlage in technischen Anwendungen genutzt.

⁸ Dieser Ausdruck ist hier im human- und sozialwissenschaftlichen Forschungskontext zu verstehen. „Ein Experiment ist [demnach] eine systematische Beobachtungssituation, in der die unabhängigen Variablen variiert werden, und die Versuchspersonen ansonsten streng vergleichbare Untersuchungsbedingungen vorfinden“ [73]. Es wird untersucht, „indem möglichst alle relevanten Einflussfaktoren kontrolliert oder eliminiert werden und gezielt nur die interessierenden Ursachenfaktoren variiert werden“ [72]. Es handelt sich im Gegensatz zur explorativen Forschung um eine stark kontrollierte Untersuchungsumgebung, wobei Hypothesen exakt zur Verifizierung oder Falsifizierung geprüft werden. Bei der vorliegenden stark explorativ ausgelegten Arbeit jedoch werden in erster Linie Forschungsfragen beantwortet, aus denen folglich Hypothesen generiert werden können.

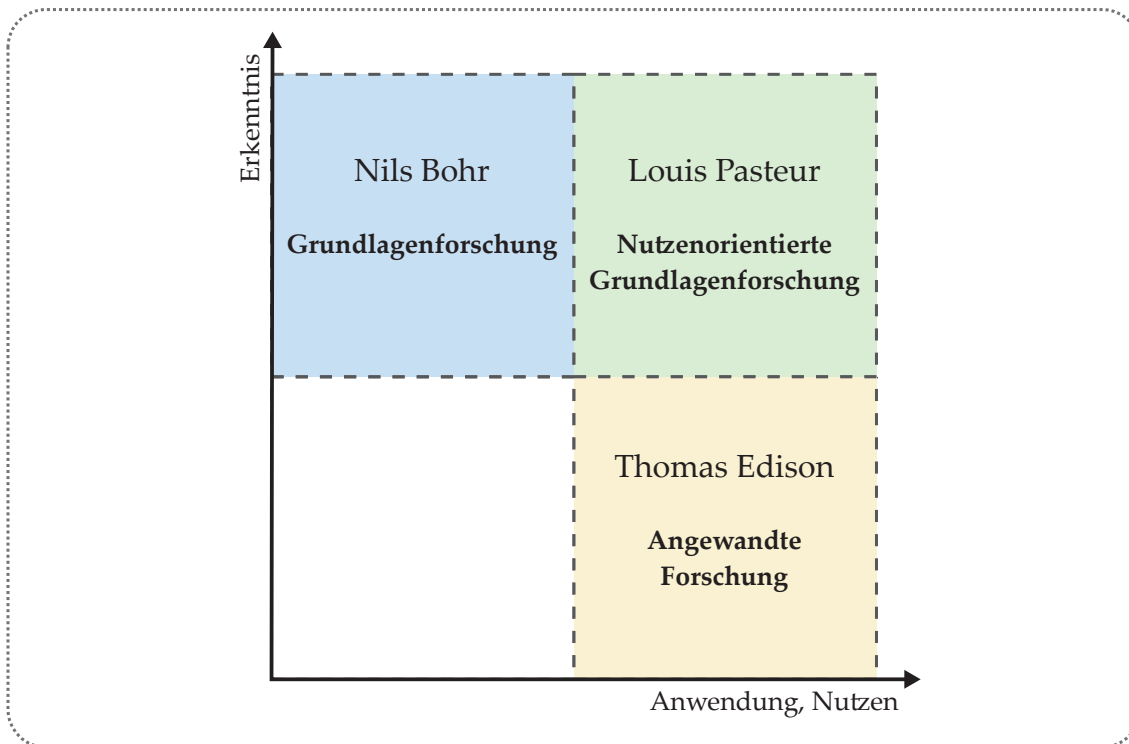


Abb. 7: Das Quadrantenmodell von STOKES [76].

„Bei der angewandten Forschung handelt es sich um originäre Arbeiten, die zur Aneignung neuen Wissens durchgeführt werden. Sie sind jedoch primär auf ein spezifisches praktisches Ziel oder Ereignis ausgerichtet“ [80].

Der Schwerpunkt ist also das Lösen von praktischen Problemen, sodass Thomas EDISON mit seinen Errungenschaften auf dem Gebiet der Elektrizität ein eindeutiger Vertreter dieses Forschungstyps ist.

„Während das Referenzsystem *universitäre Forschung* überwiegend auf ‚Erkenntnis‘ ausgerichtet ist, erwartet das Referenzsystem *Bildungspraxis* ‚Nutzen‘ aus der Forschung. Die Kombination der ‚Erkenntnisforschung‘ mit der ‚Nutzenforschung‘ ergibt den Pasteurschen Quadranten. [...] [Dadurch] können Didaktik und Fachdidaktik im Binnenbereich der Standards universitärer Forschung arbeiten und ihrem Selbstverständnis als unterrichtsnahe bzw. bildungspraxisnahe Disziplinen nachkommen.“ [79]

Wegen seiner erfolgreichen mikrobiologischen Grundlagenforschung mit hohem Nutzen in der medizinischen Praxis stellt PASTEUR beide Dimensionen des Forschungsinteresses in beachtlichem Maße dar. Für den aus der Interaktion von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung entstandenen Forschungstyp nutzt STOKES [76] den Ausdruck *use-inspired basic research*, d.h. zu Deutsch *nutzenorientierte Grundlagenforschung*. Der Beweggrund der aktuellen Thematisierung von nutzenorientierter Grundlagenforschung in der bildungsbezogenen Wissenschaft ist die vernachlässigte Anwendung von

Forschungsergebnissen im Bildungsbereich [77]. Angesichts der Tatsache, dass in der Praxis der Implementation Lehrpersonen die „Hauptakteure“ [22] sind und dass seitens HALL und HORD [54] die Schule als „the key organizational unit for making change successful“ deklariert wird, ist die Kooperation bzw. Zusammenarbeit von Wissenschaft und Praxis bzw. Schule und Universität unerlässlich und zwingend nötig. Würde die Chemiedidaktik für die Unterrichtspraxis etwas entwickeln, ohne dabei mit den Unterrichtenden zu kooperieren, wäre es diesem wirklichkeitsfremden Beispiel ähnlich: einem Gartenbesitzer einen Swimmingpool für seinen Garten zu konzipieren, ohne sich den Garten vorher anzuschauen und zu vermessen. Zudem wird auf folgende Tatsache aufmerksam gemacht: „The school can and must do a lot by itself, but it also needs to move in concert with and be supported by the other components of the system. Note the assertion that school needs outside support“ [54].

BURKHARDT und SCHOENFELD zeigen als ein weiteres Argument für eine klare Kooperation von Chemiedidaktik und Schule auf, dass es zum größten Teil eine Illusion ist, wenn Forscher davon ausgehen bzw. erwarten, dass der Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse über das eigenständige Recherchieren der Lehrpersonen in der Forschungsliteratur oder das Rezipieren von Veröffentlichungen der Fachverbände funktioniert [77, 81]. D. h.: Das Ausmaß des Diffusionsprozesses bleibt somit völlig unklar. Der Nutzen aus der Forschung muss letztendlich diejenigen erreichen, für die angeblich die Forschung betrieben wird. Nützlich sind Forschungsergebnisse aber erst dann, wenn sich beispielsweise beim Entwickeln eines Schülerexperiments zumindest an den Kompetenzen der Schüler und den materiellen Gegebenheiten in den Chemieräumen der Schule orientiert wird. Es sei denn, die Implementation der Innovation ist überhaupt nicht das Ziel. Jedoch stellt sich dann selbstverständlich die Frage nach der Intention solcher Forschung und Entwicklung (FuE).

Orientiert an der oben dargelegten Argumentation und der Intention der *nutzenorientierten Grundlagenforschung* wird in dieser Arbeit der Kontakt zur Schule gesucht, um aus der Perspektive der Lehrenden und Lernenden die photochemischen Inhalte bzw. Experimente zu betrachten (s. Kap. 3.4). Letztendlich sind sie es, die die Interventionen im Chemieunterricht unmittelbar zu spüren bekommen werden, sodass sie sich als authentischste Referenz aus der Praxis erweisen. Dies wird unter anderem durch NRW-weite Feldstudien an unterschiedlichen Gymnasien im Chemieunterricht realisiert (s. Kap. 5). An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass die „empirische Forschung [in dieser Arbeit] sich nicht auf Fragebogenaktionen und Interviews beschränkt, die schulfremde Personen an Schulen durchführen“ [82]. Vielmehr wird es als eine Pflicht betrachtet, sowohl die Erfahrung der Schüler als auch die „Erfahrung der Lehrkräfte, die täglich mit den Lernenden umgehen, in die empirische Forschung mit einfließen“ [82] zu lassen, um so durch die Erfahrung der Praktiker realitätsnahe Erkenntnisse zu erlangen, die wiederum nach dem Motto „aus der Praxis für die Praxis“ konkret z. B. bei der

Entwicklung von Unterrichtsmaterialien zum Thema *Photochemie* für den Chemieunterricht oder deren nachhaltiger Implementation in die Curricula genutzt werden sollen.

Im Hinblick auf die Definition der Innovation (vgl. Kap. 2.1.1) spielt die Nützlichkeit eine entscheidende Rolle: „Das reine Hervorbringen der Idee genügt nicht, Verkauf oder Nutzung unterscheidet Innovation von Invention [...]“ [36]. Im Rahmen der curricularen Innovationsforschung hat die vorliegende Arbeit sowohl einen erkenntnisorientierten (vgl. Kap. 2.2.1.1) als auch einen nutzenorientierten Charakter. Letzterer zeigt sich darin, dass bei der Entwicklung der Arbeitsmaterialien und der Wahl der photochemischen Experimente der Chemieunterricht in den schulischen Räumlichkeiten bzw. die Schulbedingungen, die Kompetenzen der Schüler und finanziellen Möglichkeiten von Schulen als Richtwerte aus der Praxis dienten. D. h.: Neben der Tatsache, dass explorativ Erkenntnisse gewonnen wurden, konnte durch die ersichtliche Praxistauglichkeit eine nachhaltige Implementation in den Chemieunterricht an verschiedenen Schulen bewirkt werden. Dies zeigte sich in den recht positiven Rückmeldungen der Lehrpersonen (vgl. Kap. 5.4.4.2), die durch die unmittelbare persönliche Erfahrung der Umsetzung der photochemischen Experimente mithilfe der dafür entwickelten Arbeitsmaterialien (vgl. Kap. 4) bestimmte ausgewählte photochemische Inhalte weiterhin in ihrem Chemieunterricht einsetzen möchten. Dadurch wird der Unterricht dem Basiskonzept *Energie* ein Stück weit gerechter, sodass im Sinne der Dimension *Anwendungsinteresse* im *Quadrantenmodell* eine Optimierung in der Praxis bzw. ein praktischer Nutzen erreicht wird.

2.1.4.3 Verbindung und Abgrenzung zu anderen Forschungsansätzen

Neben den beiden oben aufgeführten wichtigen charakteristischen Elementen des Forschungskonzepts dieser Arbeit werden im Folgenden weitere entscheidende Erkennungsmerkmale der Untersuchung dargestellt, wobei jedoch zur klaren Standortbestimmung bzw. Positionierung auch die Grenzen zu diesen benachbarten Forschungsansätzen mit angesprochen werden.

Zuerst soll klargestellt werden, dass es sich hierbei um keine reine *Evaluationsforschung* handelt, welche total *produktorientiert* ist. Ziel ist es bei jener Art von Forschung, den Evaluationsgegenstand wissenschaftlich fundiert zu bewerten. Es wird an grundlagenwissenschaftliche Ergebnisse angeknüpft [72]. Im Gegensatz dazu geht es hier nicht darum, dass erste Informationen gesammelt werden, um ein Produkt neu zu kreieren, sondern darum, dass ein fertiges Produkt, wie die photochemischen Experimente und die Arbeitsmaterialien (s. Kap. 4), getestet wird. Außerdem ist das explorative Vorgehen dagegen zieloffener, methodenreicher und flexibler in der Planung.

Die Bedeutung der Teilhabe der Lehrer an der Innovation bringt FULLAN [49] wie folgt auf den Punkt: „Educational change depends on what teachers do and think — it's as simple and complex as that.“ Die *Partizipation*

der Schule spielt eine entscheidende Rolle für die Hauptuntersuchung. Im Sinne der *partizipativen Aktionsforschung*⁹ [83] gab es während der Untersuchungen der vorliegenden Arbeit eine starke Kooperation zwischen dem Forscher aus der Universität und den Praktikern, d. h. den Lehrern aus der Schulpraxis. Den Lehrenden wurden zur selbstständigen Umsetzung der Feldstudie an ihren Schulen im Chemieunterricht Fortbildungen bzw. Briefings angeboten und mit den Interessenten durchgeführt. Besonders hilfreich und von großer Bedeutung waren dabei deren jegliche Rückmeldungen zu den Unterrichtsmaterialien, den Durchführungen der Experimente oder auch die zwischenzeitlichen Optimierungsvorschläge und weiteren Anmerkungen unabhängig von ihren Einträgen in den Feedbackbögen. Diese wurden so weit wie möglich in den Forschungsprozess einbezogen und zu den Ergebnissen der Exploration ergänzt (vgl. Kap. 6.3). Die so entstandenen Aktualisierungen bzw. Detailanpassungen oder hilfreichen Hinweise zu der Umsetzung der Feldstudie wurden allen teilnehmenden Lehrern mitgeteilt. Zwar wurde durch intensive Telefon- und E-Mail-Kontakte der Informationsfluss somit gewährleistet, jedoch sieht es die partizipative Aktionsforschung vor, dass sich die *professionelle Lerngemeinschaft* aus Lehrern und Forschern in regelmäßigen Zeitabständen persönlich trifft, sich so austauscht, den Forschungsgegenstand gemeinsam weiterentwickelt und außerdem den Forschungs- und Entwicklungsprozess dokumentiert [84]. Gezielt wird also dabei die Entwicklung eines neuen Konzepts oder Instruments für den Unterricht zur Verbesserung der Praxis vorangetrieben. Hierin liegt ein entscheidender Unterschied, denn das Ziel dieser Untersuchung ist es, viel mehr den Bedarf und die Relevanz photochemischer Inhalte *explorativ* zur nachhaltigen Implementation (vgl. Kap. 7.1) zu identifizieren und die potenziellen Implementationsmöglichkeiten des Forschungsgegenstands in der Schulpraxis aufzuzeigen (s. Kap. 4.1.3). Dass dabei die bereits von dem Forscher auf der Grundlage der Voruntersuchungen entwickelten Arbeitsmaterialien an der einen oder anderen Stelle etwas verändert oder optimiert wurden und von vielen Lehrern, die teilgenommen haben, in den Unterricht nachhaltig integriert werden, ist ein willkommener Effekt. Die während der Hauptuntersuchung eingesetzten Konzepte und Materialien sind somit eher Mittel zum Zweck, sodass die Prüfung dieser nicht intendiert wurde. Außerdem würde dies sowohl den zeitlichen als auch den beabsichtigen Rahmen (vgl. Kap. 1.1) der Arbeit sprengen.

Ein anderer Aspekt, der den *emanzipatorischen* Charakter fördert [85], ist die Initiierung des Forschungsprozesses. Diese soll laut partizipativer Aktionsforschung sowohl von den Lehrpersonen als auch von den externen Forschern ausgehen, sodass ein „in der Praxis drängendes Problem“ [83] zur Legitimation des Forschungsprojekts aufgezeigt wird. In der vorliegenden Arbeit wurde der Forschungsprozess von dem Forscher initiiert und in den Voruntersuchungen aus den unterschiedlichen Perspektiven beleuchtet (vgl. Kap. 3.1.2).

⁹ Die Intention und die Bedingungen der Aktionsforschung stimmen mit denen der *praxisnahen curricularen Entwicklungsforschung* [83] überein.

Weiterhin nimmt der *Forscher* bei der partizipativen Aktionsforschung eine eher beobachtende Rolle ein und ist unter anderem für die Organisation des Forschungsprojekts, für Publikationen, Strukturierung und Ausführung der Evaluationen zuständig und nicht an erster Stelle für die Anwendung des Forschungsgegenstands und die Umsetzung der Interventionen in der Schule. Dagegen wirkte hier der Forscher sowohl beobachtend als auch gestaltend in der Schule während des Forschungsprozesses aktiv mit, indem er aus der Rolle eines Lehrers den Unterricht plante, die Materialien vorbereitete und die Feldstudie durchführte. Diese Weise des Forschens ist mit den Prinzipien der *Design-Based Research*¹⁰ kompatibel [87]. Betont wird, dass der Forscher selbst auch zum *Entwickler* von Interventionen in der Praxis werden kann [88].

Design-Based Research (DBR) wird „relativ einstimmig dem Pasteurschen Quadranten zugeordnet“ [89]. Dabei geht es nämlich fast ausschließlich „um die rekursive, iterative, zirkuläre Abfolge von Forschungsphasen, um die integrative Kooperation von Theorie und Praxis und um das Verständnis von Forschung als gemeinsamer Lernprozess aller Beteiligten“ [90]. Es wird die Ansicht verfolgt, dass der Realitätsbezug alleine nicht ausreichend ist. Entscheidend ist insbesondere der *Realisierungsbezug* des Forschungsgegenstands. REINMANN beschreibt das eigentliche Ziel der Design-Based Research wie folgt: „Es geht um Entwürfe für die Zukunft bzw. um Entwürfe möglicher Welten, wobei nicht nur prinzipiell denkbare oder einfach nur wünschenswerte Welten, sondern solche gemeint sind, die sich an der Wirklichkeit bewähren müssen“ [91]. D. h.: Es geht darum, dass neben theoretischen Erkenntnissen auch eine Innovation erreicht werden soll [92]. Gerade dies ist der Ausblick bzw. das Forschungsdesiderat der vorliegenden Forschungsarbeit, wobei durch die Entscheidung der Lehrer für eine langfristige Einbindung photochemischer Inhalte ein Indiz für den Realisierungsbezug gegeben ist (vgl. Kap. 7.5). Die Bewertungskriterien zur Legitimation der Forschung, die auch bei der vorliegenden Arbeit zur Orientierung dienen, sind *Neuheit*, *Nützlichkeit* und *nachhaltige Innovation* [38]. Jedoch wird das Letztere mit dieser Arbeit nicht vollkommen abgeschlossen. Es wäre ein nächster Schritt auf der Makroebene des Forschungsprozesses.

Im Sinne der DBR ergeben sich „Einschränkungen in der Art der eingesetzten Erhebungs- und Auswertungsmethoden [...] ausschließlich aus der Fragestellung der jeweiligen Forschungsphasen und / oder aus dem Untersuchungsgegenstand“ [87]. Diese Herangehensweise ist insbesondere zur explorativen Erkenntnisgewinnung nützlich. D. h.: Es ist kein *systematisches Methodenrepertoire* [90] vorgesehen, viel mehr ist die *Methodenwahl* situativ. Dies deckt sich mit dem Prinzip der Methodenwahl in explorativen Untersuchungen.

Oft wird in der DBR an Einzelfällen geforscht. Deshalb kann sich der *Generalisierungsanspruch* nur schwierig gestalten. Demnach ist es eine Herausforderung, Ergebnisse praktischer Problemlösungen und theoretischer Erkennt-

¹⁰ Dieser Forschungsansatz wird im deutschsprachigen Raum von REINMANN als *entwicklungsorientierte Bildungsforschung* [86] bezeichnet.

nisse als dekontextualisierte Gesetzmäßigkeiten formulieren zu wollen [90]. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, wurde – abgekoppelt vom Mainstream der DBR – die für die Forschungsarbeit vorgesehene Stichprobe mit einem viel größeren Umfang gewählt. Dies ist die Folge der explorativen Vorgehensweise und die Absicht der Erschließung von aussagekräftigen und generalisierbaren Erkenntnissen.

Ein entscheidendes Merkmal der DBR ist die *iterativ-zyklische Vorgehensweise* innerhalb eines Forschungsprojekts anhand von mindestens zwei Forschungszyklen, welche zur Begründung der Praxisentwicklung dienen sollen. Zwar gibt es unterschiedliche Darstellungsformen, jedoch ist die Aktivitätsabfolge in allen Fällen gleich [93]: 1. Phase der Problemdefinition, 2. Design-Phase (Entwicklung eines didaktischen Designs), 3. Prototypen-Phase (iterative Design-Zyklen) und 4. Evaluations- und Reflexionsphase. An der Feldstudie (vgl. Kap. 5) nahmen viele Schulklassen bzw. Oberstufenkurse teil. Wenn jeder Durchlauf der Feldstudie als ein Mikrozyklus der Prototypen-Phase gesehen werden darf, kann davon ausgegangen werden, dass jedes Arbeitsmaterial bzw. Experiment (vgl. Kap. 4.3, Kap. 4.4) mehrere Male von Schülern durchgeführt wurde und mit jedem Mikrozyklus bei Anmerkungen und Verbesserungsvorschlägen versucht wurde, diese in den Entwicklungsprozess der Arbeitsmaterialien zu integrieren. Jedoch muss hier darauf verwiesen werden, dass nicht das Perfektionieren der Materialien die Priorität der Arbeit war, sondern hauptsächlich die ersten authentischen Erkenntnisse zur Integration photochemischer Inhalte bzw. zur Umsetzung photochemischer Experimente konkret im Chemieunterricht unter den üblichen Schulbedingungen, in realen Situationen. Dies mag auch der größte Unterschied der vorliegenden Forschung zur DBR sein, denn das „unmittelbarste Ziel im DBR-Ansatz ist die Lösung von Problemen in der Bildungspraxis“, d. h. die „nachhaltige Innovation“ [38]. Dies wird (s.o.) hier als übergeordnetes Ziel im Sinne der curricularen Innovation betrachtet. Die Forschungsergebnisse der vorliegenden Arbeit dienen im besten Fall lediglich als ein möglicher Katalysator im *evolutionären Prozess* der Verankerung photochemischer Inhalte in den Lehrplänen. Der Innovationsabschluss an sich ist jedoch abhängig von den Behörden und nicht zuletzt von der Bildungspolitik [26] (vgl. Kap. 4.1.3).

2.2 Historische Betrachtung der Photochemie

Nachdem im Jahr 1912 der italienische Chemiker CIAMICIAN, Mitgründer der synthetischen Photochemie und der *grünen Chemie* [94], in New York beim *8. Internationalen Kongress für Angewandte Chemie* eine sehr einsichtige Argumentation für seine Visionen für die Zukunft und das Potenzial der Photochemie darlegte, stellte er am Ende seines legendären Vortrags eine schon beinahe rhetorische Frage:

"The earth still holds enormous quantities of it, but coal is not inexhaustible. The problem of the future begins to interest us [...]. So far, photochemistry has only been developed to a very slight extent, perhaps because chemists have been attracted by problems which thermochemistry and electrochemistry have already reached a high degree of development, photochemistry is still in its infancy... If our black and nervous civilization, based on coal, shall be followed by a quieter civilization based on the utilization of solar energy, that will not be harmful to progress and to human happiness. The photochemistry of the future should not however be postponed to such distant times; I believe that industry will do well in using from this very day the energies that nature puts at its disposal. So far, human civilization has made use almost exclusively of fossil solar energy. Would it not be advantageous to make better use of radiant energy?" [95]

Die Zeit sollte zeigen, dass diese Visionen mit ansteigender Geschwindigkeit Realität wurden. Diesbezüglich kann aus heutiger Sicht im Grunde von zwei Lebensabschnitten der Photochemie die Rede sein: die Phase vor etwa 1950 und die danach. Dabei ist es nicht verwunderlich, dass die Entwicklung der wissenschaftlichen Erkenntnisse in der Photochemie regional abhängig begann:

„Initially the growth in photochemical knowledge was sporadic and restricted to countries which basked under bright skies. Thus it is not surprising that much of the early work stems from the countries around the Mediterranean.“ [96]

Phase I: Schon vor Christus war den Wissenschaftlern in der Zeit der griechischen und römischen Hochkultur bekannt, dass sich nur in Anwesenheit von Lichtenergie das Wachstum von Pflanzen verwirklicht [97] und somit die Lichtenergie lebensnotwendig sein muss. Archimedes setzte bereits Sonnenlicht als Energiequelle in seinen Forschungen ein. Vereinzelt nahm die Beschäftigung der Alchemisten mit der Lichtenergie zu. „Bescheidenere Apparate für Laboratoriumsversuche oder Freiluftexperimente“ prägten die Photochemie zwischen dem 16. und 19. Jahrhundert [98]. Gegen Ende des 17. und Anfang des 18. Jahrhunderts berichteten Wissenschaftler von photochemischen Untersuchungen [99]. Jedoch wurde mit einigen Ausnahmen (s. Tab. 2, 1669 – 1862) die Sonnenenergie im Alltag und in der Forschung bei chemischen Vorgängen nur thermisch genutzt. So war seit Lavoisier, d. h. gegen Ende des 18. Jahrhundert bis weit in das 20. Jahrhundert hinein, sowohl im Forschungslabor als auch in der Industrie nicht die Lichtenergie, sondern Wärme die entscheidende Energieform. Die Neigung der Wissenschaft zur Bevorzugung der thermischen Chemie¹¹ zeigt sich auch in der Entwicklung thermodynamischer Grundtheorien [8]. Einige noch für die heutige Zeit bedeutenden Errungenschaften wurden bereits vor 1950 erreicht (s. Tab. 2). In den Anfängen der gezielten Forschung zur Photochemie wurde in erster Linie präparative Photochemie betrieben (s. Tab. 2, 1867 – 1888). Diese trieben Anfang des 20. Jahrhunderts Wissenschaftler wie G. CIAMICIAN und SILBER in Italien und

¹¹ Mit diesem Ausdruck sind durch thermische Energie ausgelöste chemische Reaktionen gemeint.

etwa 40 Jahre später auch SCHÖNBERG und MUSTAFA in Ägypten im Hinblick auf lichtinduzierte Dimerisierung und Cycloadditionsreaktionen weiter voran. Der bewusste Startschuss für die Photochemie wurde jedoch erst etwa 1950 gegeben.

Zeit / Ort	Ereignis / Erfindung
um 330 v. Chr., antikes Griechenland	ARISTOTELES bündelte in seinem <i>Brennspiegel</i> Sonnenstrahlen und fokussierte dieses Lichts auf entfernte feindliche Schiffe der Römer, um diese in Brand zu setzen.
um 330 v. Chr., antikes Griechenland	Die Truppen von ALEXANDER DEM GROSSEN nutzten photochromen Farbstoff auf einer Stoffbinde als <i>antike Armbanduhr</i> . Durch ihr Ausbleichen sollte der Angriff auf gegnerische Truppen koordiniert werden.
1559, Schweiz	GESNER beschrieb in seinen Forschungsschriften, wie mithilfe der Wärme der Sonne <i>destilliert</i> werden kann.
1608, Deutschland	Zur Nutzung der Wärme beschrieb LIBAVIUS in seinem Werk <i>Alchymia</i> das <i>Fokussieren von Sonnenstrahlen</i> mithilfe von Linsen und Hohlspiegeln.
1669, Deutschland	BRAND entdeckte wahrscheinlich als Erster die <i>Chemolumineszenz</i> . Das kalte Leuchten der Calcinationsrückstände des menschlichen Urins führte dazu, dass er im Grunde das Element Phosphor hergestellt hatte.
1725, Russland	Der russische Feldmarschall BESTUSCHEFF beschrieb die Entfärbung einer medizinischen Tinktur aus einer ätherisch-alkoholischen Eisen(III)-chlorid-Lösung, welche auf eine Photoreduktion zurückzuführen sein sollte.
1757, Schweden	C. W. SCHEELES Erkenntnis war, dass photochemische Reaktionen unter anderem von der Wellenlänge des Lichtes abhängen. Er stellte auf der Basis des Versuchs von J. SCHULTZE, dem Schwärzen von Silbercarbonat, fest, dass dies nicht im kompletten Spektralbereich des Lichtes funktioniert.
1790, USA	Indem J. PRIESTLY Ampullen mit Salpetersäure dem Sonnenlicht aussetzte, beobachtete er die Bildung einer rötlichen Substanz in der Gasphase. Dies wurde als erste <i>Photoreaktion in der Gasphase</i> festgehalten.
1801 [100], Deutschland	J. W. RITTER entdeckte bei der Reaktion vom Silberchlorid jenseits des violetten Lichts das <i>UV-Licht</i> .
1839	Der photoelektrische Effekt, die Grundlage der heutigen Photovoltaik, wurde von EDMUND BEQUEREL entdeckt.
1842, England	J. HERSCHEL stellte als erster <i>Blaupausen</i> mithilfe der Cyanotopie her, welche auf der <i>lichtempfindlichen Redoxreaktion</i> von Citrat-Anionen und Eisen(III)-Kationen beruht.
1862, Frankreich	EDMUND BEQUEREL und Sohn HENRY stellten die <i>Fluoreszenz</i> und <i>Phosphoreszenz</i> bei Materialien fest, die sie kurz vorher bestrahlt hatten.
1867, Russland	Von C. J. FRITZSCHE wurde die erste <i>lichtinduzierte Dimerisierung</i> beobachtet. Um dieselbe Zeit beschäftigte sich auch LIEBERMANN (Berlin) damit.
1881, England	W. H. PERKIN publizierte erste Erkenntnisse zur <i>photochemischen cis-trans-Isomerisierung</i> .
1883-1886, Deutschland	Die erste <i>Photoreduktion von Carbonylverbindungen</i> führte der Photochemiker H. KLINGER durch.
1884-1888, Deutschland	J. SCHRAMM führte erste Untersuchungen zu <i>lichtinduzierter Halogenierung</i> von aromatischen Verbindungen durch.

Tab. 2: Bedeutende Ereignisse in der Geschichte der Photochemie (vgl. [8, 96 – 98]).

Phase II: Die Entwicklung der Photochemie wurde maßgeblich in den 1950ern mit einer Art Kraftstoß durch die wissenschaftlich bemerkenswerten Fortschritte in

der Quantenmechanik katalysiert, sodass von da an auch eine „tragfähige theoretische Basis“ für sie ausgebildet wurde [8, 101]. Als ein nicht zu vernachlässigender Katalysator diente auch die Ölkrise von 1973, wodurch die Nutzung *nicht-fossiler* alternativer Energiequellen an Aufmerksamkeit gewann. Dies führte dazu, dass der Forschung in der Photochemie, insbesondere im Bereich der Photovoltaik, starke finanzielle Fördermaßnahmen zukamen [102]. Damit ging an vielen Universitäten die Berufung von Photochemikern einher [94]. Ihre Zahl nahm rasant zu, sodass damit auch der Austausch und die Kooperationen zunahm. Zudem wurde zur Etablierung der Photochemie und der Fortschritte in ihrer Forschung der Bedarf nach Interessengemeinschaften bzw. Organisationen und Verbänden deutlich. Viele von den heute aktiven *photochemical societies* entstanden somit in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts (s. Tab. 3).

Organisation	Gründungsjahr
International Solar Energy Society [103]	1954
European Photochemistry Association [104]	1970
Fachgruppe Photochemie der GDCh [105]	1971
Korean Society of PhotoScience [106]	1993
European Society for Quantum Solar Energy Conversion [107]	1994
The Japanese Photochemistry Association	
Inter-American Photochemical Society	

Tab. 3: Bekannte Organisationen von Photochemikern [108].

Autor	Buchtitel	Jahr
J. M. Eder	Photochemie: die chemische Wirkung des Lichtes	1906
R. E. Liesegang	Photochemie der Erde	1914
I. S. Plotnikov	Allgemeine Photochemie: ein Hand- und Lehrbuch für Forschung, Praxis und Studium	1920
A. Coehn	Photochemie und photographische Chemikalienkunde	1929
O. Stasiw, J. Teltow	Zur Photochemie der Silberhalogenide	1944
T. Förster	Fluoreszenz organischer Verbindungen	1951
P. A. Leighton	Photochemistry of Air Pollution	1961
H. Staude	Photochemie	1962
H. Meier	Die Photochemie der organischen Farbstoffe	1963
M. J. Turro	Molecular Photochemistry	1965
J.G. Calvert, J. N. Pitts Jr.	Photochemistry	1966
H. Staude	Photochemie	1966
P. G. Ashmore	Photochemistry and Reaction Kinetics	1967
R. O. Kan	Organic Photochemistry	1967
D. C. Neckers	Mechanistic Organic Chemistry	1967
R. Steinmetz	Photochemie	1967
A. Schönberg et al.	Preparative Organic Photochemistry	1968
M. Mousseron-Canet, J.-C. Manet	Photochimie et réactions moléculaires	1969
V. Balzani, V Carassiti	Photochemistry of Coordination Compounds	1970
R. P. Wayne	Photochemistry	1970
R. B. Candell, A. Gilbert	Photochemistry	1970

Tab. 4: Fachliteratur zur Photochemie in Anlehnung an [96, 110].

Im Anschluss an die Gründung dieser Organisationen wurde schnell zwischen den Disziplinen differenziert und es entstand z. B. 1972 die *American Society of Photobiology* [109]. Um diese Zeit herum erschien auch das erste Bündel an Fachliteratur von den damaligen in dem photochemischen Zweig der Chemie weltweit aktiven Photochemikern (s. Tab. 4).

Die Phase des Aufbruchs der Photochemie wird von TAUSCH et al. wie folgt kommentiert: „Doch intellektuelle Faszination allein reicht häufig nicht aus, um die Forschung auf einem Gebiet rasch voranzutreiben, handfester praktischer Nutzen muß daran gekoppelt sein“ [8]. Als bald wurden zahlreiche spektroskopische Methoden entwickelt, die ihre Anwendungen hauptsächlich in der analytischen Chemie zur Strukturaufklärung fanden. 1976 nennt BECKER die Photochemie „eine typische Querschnittsdisziplin, die von der Physik bis zur Biochemie und zur Technik reicht“ und zählt die zu seiner Zeit zu erforschenden Gebiete dazu auf [101], welche mit denen von heute fast kongruent sind (vgl. Kap. 2.2.1.1):

- Speicherung der Sonnenenergie durch chemische Verfahren,
- Aufzeichnung von Informationen durch photochemische Verfahren,
- Photochemie als Wirkprinzip in der chemischen Technik,
- Wechselwirkungen zwischen Chemie- und Atmosphäre,
- Bio-Photochemie.

2.2.1 Status Quo der Photochemie

„Und die Erkenntnis der Endlichkeit *fossiler solarer Energie*¹², 100 Jahre nach Ciamician, ist ein lohnenswerter Antrieb für eine intensive Forschung auf dem Gebiet der Photochemie.“ [94]

— A. G. GRIESBECK

Dass das Jahr 2015 von der UNESCO zum *International Year of Light and Light-based Technologies* proklamiert wurde, ist auch ein Indiz dafür, dass sich Photochemie bis heute durch ihre zunehmende Bedeutung einen ersichtlichen Namen gemacht hat. Wie stark bestimmt Photochemie aktuell die Forschung, wie viel wird in der universitären Lehrerausbildung vermittelt – und wie viel davon wird auf den Chemieunterricht in der Schule projiziert? Diese Frage kann mithilfe einiger Indikatoren andeutungsweise beantwortet werden. Im Folgenden sollen daher Ergebnisse von Recherchen zur Bestandsaufnahme dazu vorgestellt werden.

¹² Dieser Ausdruck von CIAMICIAN meint nach [95] die Kohle. Jedoch kann er im weiteren Sinne im aktuellen Kontext auch als *fossile Brennstoffe* übersetzt werden.

2.2.1.1 In der Forschung

„I do not believe, however, that the industries should wait any longer before taking advantage of the chemical effects produced by light. The polymerizations, the isomeric change, the reductions and oxidations with organic and inorganic substances, and the autoxidations which light causes so easily should already find profitable applications in some industries if researches were carried out carefully with this in mind.“ [95]

— G. L. CIAMICIAN

Die Aufzählung von CIAMICIAN findet sich in den von der Fachgruppe Photochemie der GDCh aktuell aufgelisteten, den Teilgebieten der Chemie übergeordneten Arbeitsschwerpunkten wieder (s. Abb. 8).

D. h.: Deutschlandweit forschen Chemiker zu diesen Themen. Deutlich zu erkennen ist auch hier (wie schon bei BECKER, vgl. Kap. 2.2), dass die Photochemie im 21. Jahrhundert von einer starken Verbindung zwischen Chemie, Physik und Biologie abhängt. Auch wenn in den Medien hauptsächlich im Zusammenhang mit der Mobilität und dem Energiehaushalt Stichworte wie *erneuerbare Energien*, *Energiekonversion und -speicherung* fallen, ist zu erkennen, dass auf dem Gebiet der Photochemie noch andere Themen eine Rolle spielen.

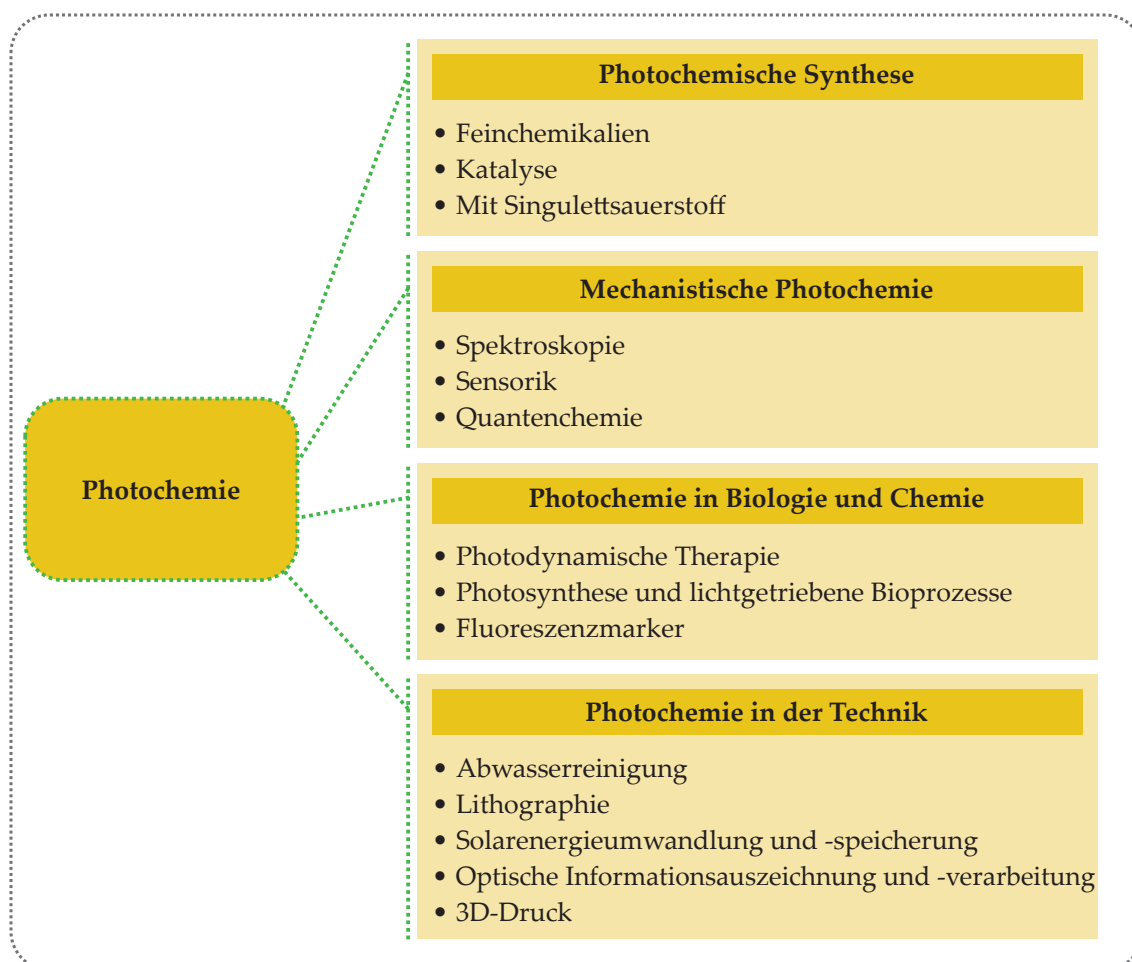


Abb. 8: Arbeitsschwerpunkte der Fachgruppe Photochemie der GDCh [105].

Anlässlich des Internationalen Jahres des Lichts veröffentlichte 2016 die GDCh das 11. Band der HighChem-hautnah-Reihe mit dem Titel *Aktuelles zu Chemie und Licht*. Das Inhaltsverzeichnis spiegelt eindeutig die Reichweite der Photochemie in der Forschung und nicht zuletzt im Alltag wider (s. Tab. 5) [111].

Chemie und Licht im Unterricht
Aktualität im Unterricht! <i>Chemie und Licht – Ein Imperativ für Schule und Lehrer</i>
Die Ordnung macht's. <i>Didaktische Erschließung der Funktionsweise von Flüssigkristallen</i>
Eigenbau! <i>OLED.Education – Organische Leuchtdioden in der Curricularen Innovation</i>
Fundgrube für den Unterricht. <i>Bau eines LED-Photometers</i>
Umwelt, Licht, Chemie
Vom Schmetterlingsflügel lernen. <i>Touchless Displays</i>
Der Natur abgeschaut. <i>Nachhaltige Reinigung und Entgiftung von Wasser mit Licht</i>
Ein riesiger photochemischer Reaktor. <i>Zur Chemie der Erdatmosphäre</i>
Gebündelte Sonnenenergie. <i>Solare Brennstoffe aus Wasser und Kohlendioxid</i>
Licht im Dienst der Medizin
Entwicklung von Nanofähren. <i>Gezielte Krebsbekämpfung mit Hilfe superhochauflösender Lichtmikroskopie</i>
Kampf gegen Hautkrebs. <i>Photodynamische Therapie (PDT) in der Dermatologie</i>
Gezielt lichtgesteuert! <i>DNA: Assoziation und Dissoziation photochromer Liganden</i>
Dr. Jekyll und Mr. Hyde. <i>Triplet- und Singulett-Sauerstoff</i>
Licht in der Diagnostik. <i>Optische Sensoren in medizinischer Diagnostik und Umweltanalytik</i>
Schall aus Licht. <i>Photoakustische Spektroskopie in der Analytik</i>
Farbwahrnehmung, Farbmessung, Lichtquellen
Mehr als ein Seherlebnis. <i>Farbe als Qualitätskriterium</i>
Mikroskopische Licht-Manager. <i>Effektpigmente zur Erzeugung optischer Effekte in Lacken</i>
Farbe auf Abruf. <i>Schaltbare Farbigkeit in der Natur und in Materialien der Zukunft</i>
Kann Wäsche leuchten? <i>Optische Aufheller in Waschmitteln</i>
Erst gelb – jetzt rot. <i>Weiß LEDs: Licht mit Spitzenleistung</i>
Chemiker bringen Licht ins Dunkel. <i>Millionen Lichter – Top Thema der GDCh</i>
Leuchtende Winzlinge. <i>Fluoreszierende organische Nanoteilchen als neuartige lichtemittierende Materialien</i>
Vom Ultraviolett bis Infrarot. <i>Lichtquellen für die Lackchemie</i>
Einfach und schnell. <i>Absolute und spektrale Kalibrierung von optischen Detektoren durch die Sonne</i>
Chemische Informationen aus Licht
Informationen aus Licht. <i>Chemische Analytik</i>
Leuchtendes Blut. <i>Analytik mit Chemolumineszenz</i>
Von groß zu klein. <i>Poröse Katalysatoren im richtigen Licht</i>
Super aufgelöst! <i>STED-Mikroskopie</i>
Vom Laserschuss zum Bild. <i>Element(bio)imaging mit LA/ICP-MS</i>
Geringste Atomzahlen nachweisbar! <i>Ultrapurenanalytik mit Laserlicht</i>
Moleküle sortieren. <i>Holographische Photopolymere für die diffraktive Optik mit Laserlicht</i>
Der vierte Zustand. <i>Spektroskopiker entschlüsseln Informationen im Plasma-Licht</i>
Argon eingespart. <i>Spektroskopiker entschlüsseln Informationen im Plasma-Licht</i>
Gefüllte Schlitze. <i>Hochsensitive infrarotspektroskopische Analytik mittels plasmonischer Feldverstärkung</i>
Entdeckung und Untersuchung lichtinduzierter Prozesse
Paris – Berlin – Wolfen. <i>Agfa und die beschaulichen Anfänge der Fotografie</i>
Druck mit Licht. <i>Offsetdruckplatten für Laserbelichtung</i>
Licht und Farbe. <i>Photochrome organische Verbindungen in den Lebens- und Materialwissenschaften</i>
Klein und hochwirksam. <i>Photoinduzierte Freisetzung von kleinen Molekülen und Radikalen aus Komplexen</i>
Schnell, schneller, ultraschnell. <i>Femtochemie</i>
Spot on. <i>Photoinduzierte Katalyse mit Licht verfolgen</i>

Licht für die chemische Synthese
Historische Vision aktuell umgesetzt. <i>Organische Synthese mit sichtbarem Licht</i>
Zurück auf die Dächer! <i>Photochemie im Sonnenlicht!</i>
Photochemie im Durchfluss. <i>Kombination aus photochemischer Synthese und Mikroverfahrenstechnik</i>
Gezielte Freisetzung. <i>Photochemische Schutzgruppen</i>
Chiralität und Licht. <i>Enantioselektive Katalyse photochemischer Reaktionen</i>
Photosynthese, Photokatalyse, Photovoltaik
Lernen von der Natur (Teil 1). <i>Oxygene Photosynthese und lichtinduzierte Wasserspaltung</i>
Lernen von der Natur (Teil 2). <i>Oxygene Photosynthese und lichtinduzierte Wasserspaltung</i>
Wie in der Natur. <i>Supermolekulare Molekülverbände für die artifizielle Photosynthese</i>
Mit der Kraft des Lichts. <i>Halbleiter als Photokatalysatoren</i>
Vom Molekül zum Katalysator. <i>Solarer Wasserstoff aus Designer-Polymeren</i>
Grüne Energie aus blauen Sechsecken. <i>Materialien der organischen Photovoltaik auf der EXPO 2015 in Mailand</i>
Aus eins mach zwei. <i>Intermolekulare Singulett-Spaltung</i>

Tab. 5: Inhaltsverzeichnis des 11. Bands der von der GDCh veröffentlichten *HighChem-hautnah-*Reihe mit dem Titel *Aktuelles zu Chemie und Licht*.

Zeitschrift	Ort	Gründungsjahr
<i>Photochemistry and Photobiology</i>	USA	1962
<i>Imaging Science and Photochemistry</i>	China	1983
<i>Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology</i> ¹³	Niederlande	1987
<i>Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry</i>	Niederlande	1987
<i>Journal of Fluorescence</i>	USA	1991
<i>Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews</i>	Niederlande	2000
<i>Photochemical and photobiological Sciences</i>	Europa	2002
<i>Rapid Communication of Photoscience</i>	Korea	2012
<i>ChemPhotoChem</i>	Deutschland	2017

Tab. 6: Fachzeitschriften zu speziell photochemischen Inhalten [112, 113].

So gibt es neben mittlerweile umfangreicher Fachliteratur zusätzlich eine beachtliche Anzahl an sich etablierenden Fachzeitschriften¹⁴ speziell für photochemische Inhalte zur zeitnahen Publikation von neuen Erkenntnissen (s. Tab. 6).¹⁵ Publiziert wird zudem in den Peer-Review-Fachzeitschriften wie dem *Journal of American Chemical Society (JACS)*, *Chemical Review* oder auch in der Zeitschrift *Angewandte Chemie*.

Das Bundesministerium für Forschung und Entwicklung (BMBF) veröffentlichte für die letzten Jahre die Ausgaben des Bundes für Wissenschaft, FuE. Laut diesen Angaben liegt die finanzielle Förderung der bundesweiten FuE im Bereich der erneuerbaren Energien über der der Umwelt- und Nachhaltigkeits-

¹³ Diese Zeitschrift hieß vereint mit der *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* von 1972 bis 1987 *Journal of Photochemistry* [114].

¹⁴ Alle hier genannten Fachzeitschriften wurden über die Entwicklung der Publikationen zum Thema *Photochemie* zur Evaluation bzgl. der Recherche für Informationen angefragt. Eine positive Rückmeldung wurde nur von dem aktuellen Editor der *Photochemical and Photobiological Sciences*, D. BASSANI, erhalten. Auf Nachfrage beim Autor kann in die Antwort von Herrn BASSANI eingesehen werden.

¹⁵ Die wahrscheinlich erste deutschsprachige Zeitschrift, die im Namen den Ausdruck *Photochemie* trug und deren erste Ausgabe 1903 erschien, hieß *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie, Photophysik und Photochemie*.

forschung, der Nanotechnologien und auch Werkstofftechnologien [115]. Unklar ist, welcher Anteil dieser Forschungsgelder dem Bereich der Photochemie zukam.¹⁶ Dass jedoch photochemische Errungenschaften sogar zu *Nobelpreisen* verhelfen, wurde direkt am Anfang des 21. Jahrhunderts zweimal gezeigt: Der Nobelpreis für Chemie im Jahr 2014 wurde für die Entwicklung von *superauflösender Fluoreszenzmikroskopie* und 2016 für den Entwurf und die Synthese *Molekularer Maschinen* vergeben [119]. In beiden Fällen nutzten die Wissenschaftler photochemische Kenntnisse.

Auch namentlich weltweit bekannte Chemieunternehmen betätigen sich in ihrer Forschung unter anderem im photochemischen Bereich¹⁷ bzw. nutzen bei den chemischen Prozessen unter anderem auch Lichtenergie. Beispielsweise arbeitet die BASF momentan bei der Entwicklung von Photopolymeren für 3D-Druckprozesse [120]. „In der Industrie ist chemische High Tech [...] ohne photochemische Verfahren kaum noch denkbar“ [56]. Hier wird einmal mehr klar, dass eine Kooperation der FuE mit der Industrie und Wirtschaft problemlos möglich ist bzw. dass der Übergang fließend ist. Doch wie weit reicht die Brücke von dort zu der Bildung? Denn letztendlich besuchen die Forscher von morgen die Schulen und Universitäten von heute.

2.2.1.2 In Bildungseinrichtungen

Im Folgenden werden zur photochemischen Fachrichtung universitäre Einrichtungen, Schulen und schulexterne Angebote für Schüler betrachtet.

Im Chemiestudium und erst recht in der universitären Lehrerausbildung wird Photochemie kaum explizit als Veranstaltung angeboten (s. Tab. 7). Dies ist unter anderem der Tatsache geschuldet, dass Photochemie ein Gebiet ist, das die klassischen Disziplinen der Chemie übergreift, d. h. sie ist eine Querschnittsdisziplin (vgl. Kap. 2.2). Beispielsweise sind in die unterschiedlichen Lehrveranstaltungen wie in den Praktika der organischen oder physikalischen Chemie, photochemische Experimente integriert (vgl. Kap. 3.4.2.3) [121 – 124]. Nichtsdestotrotz gibt es mittlerweile Arbeitsgruppen, die sich auf das Forschungsgebiet der Photochemie konzentrieren (s. Tab. 7).

Die GDCh hat zur Orientierung und Information von Interessenten für das Chemiestudium eine Website namens *Chemie studieren* eingerichtet [137]. Auf

¹⁶ Im Vergleich zur Photochemie gibt es für das Gebiet der Nanotechnologie vom BMBF z. B. eine *nanomap* [116] mit einem Register der Organisationen im diesem Bereich, *Nano.DE-Reporte* [117] zum Status quo der Nanotechnologie in Deutschland und zudem noch alle fünf Jahre die *Aktionspläne Nanotechnologie der Bundesregierung* [118]. Außerdem werden die Forschungsgelder für Nanotechnologie in den Daten der BMBF explizit aufgeführt. Demzufolge gibt es für den Bereich der Photochemie nicht die Möglichkeiten, im vergleichbaren Ausmaß statistische Daten zu erhalten. Somit handelt es sich hierbei um eine stark qualitative Bestandsaufnahme.

¹⁷ Es wurden die größten Chemieunternehmen in Deutschland (BASF, BAYER AG, EVONIC Industrie, Lanxess) angeschrieben, um Informationen über ihre Forschung im photochemischen Bereich zu erfahren. Auf die Anfragen wurden keine erwähnenswerten Rückmeldungen erhalten. Aus zeitlichen Gründen wurde diese Recherche an dieser Stelle beendet.

Bezeichnung	Einrichtung
Arbeitsgruppe: <i>Fotochemie</i>	<i>Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg</i> [125]
Arbeitsgruppe: <i>Organische Photochemie</i>	<i>Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf</i> [126]
Arbeitsgruppe: <i>Ultraschnelle Photochemie</i>	<i>Ruhr-Universität Bochum</i> [127]
Arbeitsgruppe: <i>Molekularspektroskopie und Photochemie</i>	<i>Universität Regensburg</i> [128]
Arbeitsgruppe: <i>Organische Chemie, Organische Synthese, Photochemie</i>	<i>Technische Universität München</i> [129]
Forschungsgebiete: <i>Photochemie</i> u. a.	<i>RWTH Aachen</i> [130]
Forschungsgebiete: <i>Organische Photochemie</i> und <i>Photobiologie</i> u. a.	<i>Universität Siegen</i> [131]
Seminar: <i>Aktuelle Fragen der Photochemie</i>	<i>Universität Potsdam</i> [132]
Vorlesung: <i>Anorganische Photochemie</i>	<i>Universität Ulm</i> [133]
Vorlesung: <i>Photochemie und theoretische Analyse</i>	<i>Technische Universität Kaiserslautern</i> [134]
Vorlesung: <i>Organische Chemie II – Organische Photochemie</i>	<i>Universität Kassel</i> [135]
Vorlesung: <i>Organische Photochemie</i>	<i>Karlsruher Institut für Technologie</i> [136]

Tab. 7: Erste Ergebnisse einer Recherche über die Google-Suchmaschine zu universitären Veranstaltungen und Arbeitsgruppen, die explizit im Zusammenhang mit der photochemischen Wissenschaft stehen.

dieser Seite erscheinen neben den klassischen Fachrichtungen auch Gebiete wie *Nuklearchemie*, *Wasserchemie* und auch *Photochemie*. Dort heißt es, dass „die Bedeutung photochemischer Inhalte in der universitären Ausbildung zugenommen [habe]. [...] Einen allgemeingültigen Lehrplan in Photochemie [gebe] es bislang allerdings noch nicht.“ Obwohl in neu entwickelten aktuellen Studienplänen der Bachelor- und Masterstudiengänge im Fach Chemie, in Angeboten für spezielle Masterprogramme oder in gut vernetzten Forschungsprojekten die Integration photochemischer Inhalte zu sehen ist, bleibt die Ausbildung im Studium dahingehend stark von den Forschungsbereichen der Dozenten abhängig [105]. Zum Beispiel wurden 2009 von den Chemiedidaktikern REINERS und TAUSCH [138], wobei TAUSCH für seine curriculare Innovationsforschung in der Photochemie für die Schule bekannt ist [139], Vorschläge zur Restrukturierung und zur curricularen Entwicklung für das Lehramt Chemie gemacht. Demnach sollen *Grundlagen der Photochemie* fester Bestandteil des Moduls der *Organischen und biologischen Chemie* werden. Nicht umsonst verlangen sie, dass „an der Schnittstelle zwischen Fachwissenschaft und Fachdidaktik [...] Fachwissenschaftler und Fachdidaktiker in einzelnen Modulen gemeinsame Lehrveranstaltungen konzipieren, in denen die fachwissenschaftlichen Themenstellungen didaktisch rekonstruiert und in schulische [...] Kontexte gestellt werden“.

Ein breites externes Angebot für Schulen bieten bundesweit Schülerlabore, welche zum größten Teil als Projekte von Universitäten als Bildungsinitiativen für Schulen ausgerichtet werden. Auf dem *Schülerlabor-Atlas* des Bundesverbands der

Schülerlabore, *LernortLabor*[®], [21] befinden sich derzeit 382 angemeldete Schülerlabore. Davon sind 195 der Fachrichtung *Chemie* zuzuordnen. Laut Angaben zum Profil des jeweiligen Schülerlabors beschäftigen sich 12 Schülerlabore mit Themen wie *Solarenergie, erneuerbare Energien, Brennstoffzellen* etc. (s. Tab. 8).

Dabei ist die Wuppertaler *Chemie-Labothek* [140, 141] das einzige Schülerlabor, das explizit nur photochemie Experimente anbietet. Dort bekommen Schüler die Möglichkeit, eine große Vielfalt an Experimenten aus dem Bereich der Photochemie je nach Wahl der Lerneinheit selber durchzuführen (s. Abb. 9).

Neben der Universität ist ein weiterer formaler Bildungsbereich die Schule. In Anbetracht der anwachsenden Bedeutung der Photochemie in der FuE und des reichhaltigen Angebots, wie oben zu sehen ist, lässt sich vermuten bzw. erhoffen, dass diese Innovation bereits in den Schulen angekommen sein sollte. Wie viel Photochemie erfahren Schüler aktuell in der Schule? In den naturwissenschaftlichen Fächern und auch in Geographie ist Energie ein Thema. *Globale Erwärmung, Klimaschutz* und *Energieverbrauch* sind in die Inhaltsfelder der aktuellen Kernlehrpläne (KLP) des Faches *Geographie* [142, 143], *Licht, Strahlung* und *Eigenschaften von Photonen* des Faches *Physik* [144, 145], *Energiefluss* und *Photosynthese* des Faches *Biologie* [146, 147] integriert. Auch in den Richtlinien für das Fach *Chemie* gibt es Hinweise auf die Möglichkeit der Umsetzung photochemischer Inhalte im Unterricht (s. Kapitel 3.5). Zudem ist *Energie* eines der vier Basiskonzepte für die naturwissenschaftlichen Fächer. Gewöhnlich werden im Chemieunterricht einige wenige photochemische Experimente durchgeführt. Klassische Schulversuche jener Art sind unter anderem die Chlorknallgas-Reaktion oder die Bromierung bzw. Chlorierung von Alkanen (vgl. Kap. 3.4.2.2) [56, 148]. Im Vordergrund steht dabei jedoch nicht der Einsatz und die Wirkung von Lichtenergie. Diese führt weiterhin nur ein Schattendasein.

Schülerlabor	Beschreibung
<i>Energiezentrum Pankow</i> (Berlin)	<i>Solarenergie, Energieumwandlungen, Solarfahrzeuge</i>
<i>DLR_School_Lab Göttingen</i> (Niedersachsen)	<i>Solarturm</i>
<i>OLaF das offene Labor Fulda</i> (Hessen)	<i>Solarautos</i>
<i>Chemie-Labothek</i> (NRW)	<i>Photochemie</i>
<i>EnergieLab im Wissenschaftspark Gelsenkirchen</i> (NRW)	<i>Erneuerbare Energien, Solarzellen, Brennstoffzellenautos</i>
<i>MINT LAB</i> (NRW)	<i>Erneuerbare Energie, Solarenergie</i>
<i>MINTmobil</i> (NRW)	<i>Erneuerbare Energie, Brennstoffzelle, Solarenergie</i>
<i>zdi-Schülerlabor LNU-Frechen</i> (NRW)	<i>Energietechnik</i>
<i>zdi-Schülerlabor: Perspektive Technik</i> (NRW)	<i>Energie</i>
<i>DLR_School_Lab TU Dresden</i> (Sachsen)	<i>Solarzellen, Energieaufwand</i>
<i>UFZ Schülerlabor</i> (Sachsen)	<i>Erneuerbare Energien</i>
<i>Lübecker offenes Labor LoLa</i> (Schleswig-Holstein)	<i>Photometrie</i>
<i>Schülerlabor Quantensprung</i> (Schleswig-Holstein)	<i>Erneuerbare Energien</i>

Tab. 8: Schülerlabore mit photochemischen Inhalten

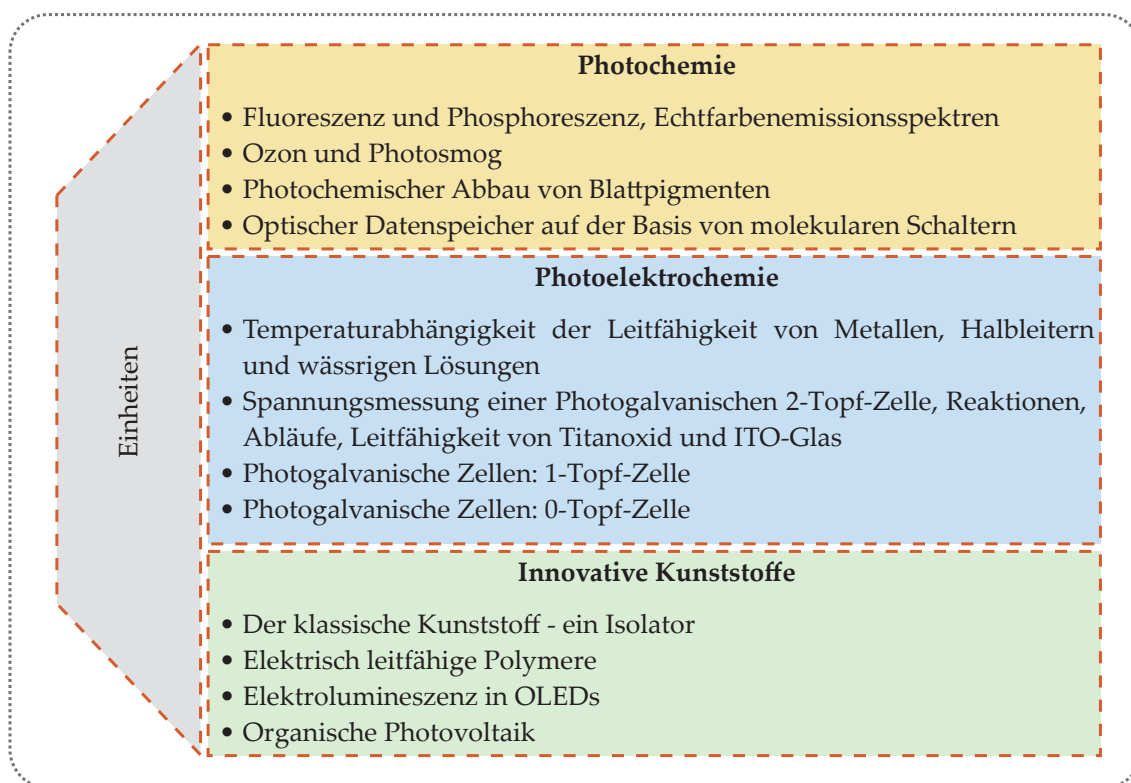


Abb. 9: Die drei Einheiten der Schülerlabothek der Universität Wuppertal [141].

Dass sich in Ausnahmefällen in der Schule interessierte Schüler tiefgründiger mit der Photochemie beschäftigen können, zeigen die Bundessieger der Kategorie *Chemie* der letzten Jahre bei *Jugend forscht* (s. Tab. 9) [149]. Dabei führen die Schüler ihre Untersuchungen meist in einer Chemie-AG¹⁸ der Schule durch, in der sie von einem Chemielehrer betreut werden.

Thema des Siegers	Jahr
Fettlöser mit Lichtschalter. Synthese und Untersuchung fotochemisch schaltbarer Tenside	2018
Optimierte Wärmebatterie. Chemische Speicherung der Sonnenenergie mittels PCM ¹⁹ -Materialien	2015
Leuchtende Enzyme. Fluoreszenzpolarisation – Drehung im Gigahertzbereich	2008
Von der Partyleuchte zum Spektrometer. Spektec	2004
Schnelltest mit Licht und Farbe. Entwicklung eines Schnelltests zur halbquantitativen PAK ²⁰ -Bestimmung in Straßenaufbruchmaterialien	2003

Tab. 9: Bundessieger der Kategorie Chemie bei *Jugend forscht*, deren Forschungsthema *Photochemie* beinhaltet.

¹⁸ AG: Arbeitsgruppe.

¹⁹ PCM: Phase Change Material.

²⁰ PAK: Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe.

2.3 Sachanalyse photochemischer Inhalte

„Wenn ein Molekül und ein Photon sich zu einem Bündnis vereinigen, gilt die Regel, *alles oder nichts*. Das Bündnis kommt nur zustande, wenn das Photon das passende Kapital mitbringt. Das Photon geht dann vollständig in der neuen Allianz auf, aber diese ist nur von kurzer Dauer. Daraus kommt das Photon niemals wieder so heraus, wie es vorher war...“ [150]

— M. W. TAUSCH

Wie bereits aufgezeigt wurde (s. Kap. 2.2), ist die Photochemie eine Querschnittsdisziplin. Demzufolge wäre der Umfang des zu klärenden Sachgegenstands im Hinblick auf die Ziele der Untersuchung erheblich zu groß, um im Rahmen dieser Arbeit einer detaillierten Sachanalyse in der entsprechenden Breite und Tiefe gerecht zu werden. Deshalb wurde sinnvollerweise entschieden, die Sachanalyse einzugrenzen. Somit wird hier auf den fachwissenschaftlichen Hintergrund der Photochemie im Hinblick auf Kapitel 4 (*Entwicklung von Arbeitsmaterialien*) eingegangen.

Da es sich im Allgemeinen um die Wechselwirkung zwischen Energie und Materie²¹ handelt bzw. *das Bündnis* der Wechselwirkenden, wie TAUSCH dies bildlich beschreibt (s.o.), aus Zweien besteht, wird zuerst der Begriff *Energie* definiert und *Licht* als eine der möglichen Energieformen tiefgründiger vorgestellt. Im Anschluss daran kann in Kapitel 2.3.2 der Partner in dem Bündnis, d. h. hier konkret die organischen Verbindungen, im Hinblick auf die Lichtabsorption charakterisiert werden. Dieses Kapitel leitet langsam über zur Photochemie. Schließlich wird auf die *Allianz*, d. h. die lichtinduzierten Prozesse bzw. auf die Wechselwirkung selber viel genauer eingegangen.

2.3.1 Energiebegriff in der Chemie

„Alle Elementarteilchen können in hinreichend hoher Energie in andere Teilchen umgewandelt oder einfach aus kinetischer Energie erzeugt werden, und sie können sich in Energie, z. B. in Strahlung verwandeln. Daher haben wir hier tatsächlich den endgültigen Beweis für die Einheitlichkeit der Materie. Alle Elementarteilchen sind aus derselben Substanz, aus demselben Stoff gemacht, den wir nun Energie oder universelle Materie nennen können; sie sind nur verschiedene Formen, in denen Materie erscheint [...] die Energie tritt als materielle Realität durch die Form in Erscheinung, wenn ein Elementarteilchen erzeugt wird.“ [151]

— W. HEISENBERG

²¹ Dies können Atome oder auch chemische Verbindungen wie Moleküle und Ionen sein.

Energie ist ein universeller und vielseitig genutzter Begriff, ob in dem Fach Chemie, Physik, Biologie, Geographie, Technik, Politik, Wirtschaft, Sport oder einfach im alltäglichen Leben, wenn es um Strom- und Gasrechnungen oder den Sprit im Auto geht. Zwar ist der Begriff schon im 19. Jahrhundert mit der Entstehung der Thermodynamik definiert worden [152], trotzdem wird er von FEYNMAN als eine ungeklärte, undeutliche Konzeption betrachtet:

„It is important to realize that in physics today, we have no knowledge what energy is. We do not have a picture that energy comes in little blobs of a definite amount. It is not that way. However, there are formulas for calculating some numerical quantity, and when we add it all together it gives "28" — always the same number. It is an abstract thing in that it does not tell us the mechanism or the reasons for the various formulas.“ [153]

Diese Größe wird häufig gerne auch über die Definition als „spezieller Begriff der Mechanik“, d. h. als die mathematische Beziehung $Arbeit = Kraft \cdot Weg$ ²² eingeführt. Demnach ist die Energieeinheit *Newtonmeter* bzw. *Joule* (J). Energie und Arbeit haben zwar auch dieselbe Einheit, jedoch ist es nicht völlig richtig, die Energie der Arbeit gleichzusetzen. Physikalisch betrachtet ist Energie ein Systemzustand, in dem das Verrichten von Arbeit möglich ist [154]. Energie wird in der Mechanik somit auch als gespeicherte Arbeit bezeichnet [152], wobei diese mechanische Arbeit nur eine von vielen Formen der Energiezufuhr ist [155]. Zu diesen gehören unter anderem den Schülern zum größten Teil aus dem Unterricht bekannte Formen wie potenzielle Energie, kinetische Energie, Wärme, Elektrizität, chemische Energie²³ und Strahlung bzw. Licht (s. Abb. 10).

Für ROGERS ist Energie „eine Art universeller Treibstoff, um für den Menschen nützliche Arbeit zu verrichten“ (nach [157]). JOULE dagegen betont in seiner Definition deren entscheidendste Eigenschaft: „Energie kann nicht erzeugt, sondern nur von einer Form in die andere umgewandelt werden“ (nach [154]). Nachdem die Chemiedidaktiker FLINT und WAGNER zahlreiche Definitionen kritisch verglichen und didaktisch abgewogen haben, formulieren Sie eine hilfreiche Legierung daraus:

„Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten. Sie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur von einer Energieform in die andere umgewandelt werden.“ [156] Nach dem Energieerhaltungssatz kann innerhalb eines geschlossenen Raumes Energie weder im Nichts verschwinden, noch aus dem Nichts erzeugt werden. D. h.: Energie ist vorhanden und wird nur von einer Form in eine andere Form umgewandelt. Unter der Prämisse des Energieerhaltungs-

²² Kräfte sind mathematisch gesehen Vektoren, d. h. richtungsabhängig. Demnach müsste es genauer heißen: „Weg mal Kraftkomponente in Wegrichtung“ [154].

²³ (a) Dieser Ausdruck wird von FLINT und WAGNER kritisch betrachtet. Sie bevorzugen noch vor der Alternative *innere Energie* — dieser sei im Falle der Aggregatzustandsänderung ungünstig — den Ausdruck *Enthalpie*. Jedoch ist der Ausdruck *chemische Energie* eines Teilchens für Schüler greifbarer und plausibel [156]. Aus diesem Grund wird dieser in der Arbeit verwendet. (b) Zudem kann die Gesamtenergie eines Moleküls quantenmechanisch noch detaillierter dargestellt werden. Die Ausführung hierzu folgt.

satzes fasst ATKINS aktuell das Wichtigste zum Thema *Energie* im chemischen Kontext in seinem Buch *Physikalische Chemie* in drei Punkten zusammen:

„(a) Energie ist die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten.

(b) Die Gesamtenergie eines Teilchens ist die Summe seiner potenziellen und kinetischen Energie. Die kinetische Energie ist die Energie, die ein System aufgrund seiner Bewegung besitzt; die potenzielle Energie (oder Lageenergie) ist die Energie, die ein System aufgrund seiner Lage oder Position besitzt.

(c) Die potenzielle Energie der Coulomb-Wechselwirkung zweier Teilchen in einem Abstand r voneinander ist proportional zu $1/r$ “ [158].

Die Energie (E) eines Teilchens²⁴ kann aus quantenmechanischer Sicht noch weiter differenziert betrachtet werden. So setzt sich die Gesamtenergie eines Teilchens wie folgt zusammen [159 – 161]:

$$E_{\text{gesamt}} = E_{\text{elektronisch}} + E_{\text{Schwingung}} + E_{\text{Rotation}} + E_{\text{Translation}} \quad (1)$$

$$E_{\text{elektronisch}} \gg E_{\text{Schwingung}} > E_{\text{Rotation}} \quad (2)$$

(2) zeigt grob die Größenverhältnisse der Energieformen. Im Vergleich zu den ersten drei Energieformen ist die Translationsenergie $E_{\text{Translation}}$ nicht gequantelt und kann sich daher beliebig bzw. kontinuierlich ändern. Dagegen können sich die anderen Energieformen nur um bestimmte Energiebeträge ändern, nämlich um die ganzzahligen Vielfachen von

$$\Delta E = h \cdot \nu, \quad (3)$$

wobei das Plancksche Wirkungsquantum

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Js} \quad (4)$$

beträgt und ν die Frequenz der vom Teilchen z. B. absorbierten elektromagnetischen Strahlung bzw. von Lichtquanten geeigneter Energie ist [162].²⁵ Eine Übersicht über die in den Naturwissenschaften üblichen Energieformen stellt Abbildung 10 dar.

²⁴ Dies kann ein Atom oder eine chemische Verbindung wie Molekül, Ion und Radikal sein. Im Folgenden wird hauptsächlich auch im Hinblick auf Kapitel 2.3.2 der Ausdruck *Molekül* verwendet.

²⁵ Die gequantelten Energieformen sind anhand eines *Jablonski*-Diagramms in Kap. 2.3.3.2 in Abb. 22 dargestellt.

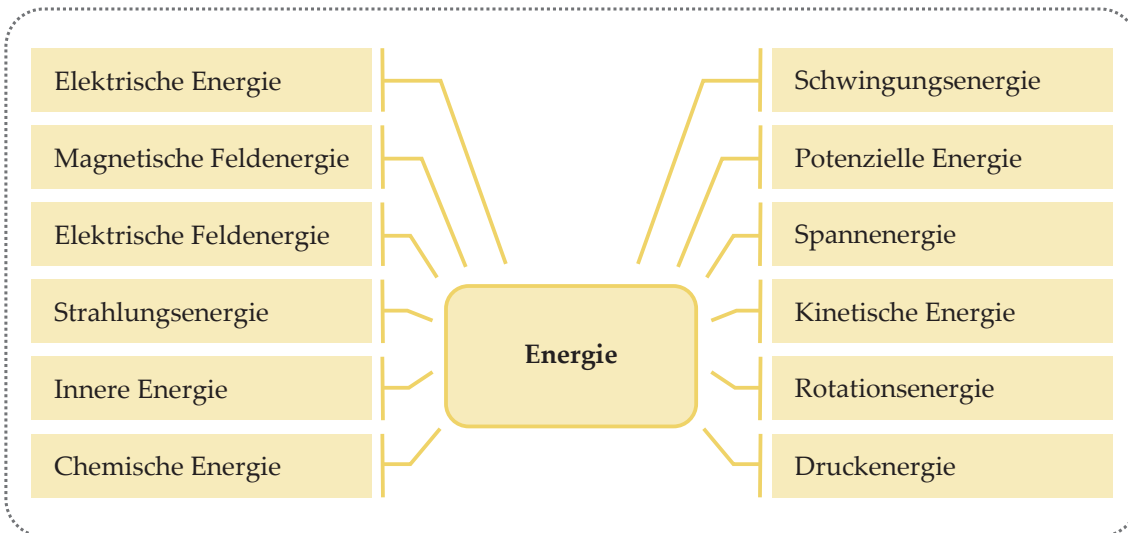


Abb. 10: Mögliche Energieformen in den Naturwissenschaften (vgl. [154]).

2.3.1.1 Licht als Energieform

Im Gesamtbereich der elektromagnetischen Strahlung nimmt das „für die Reizempfindung des menschlichen Auges“ sichtbare Licht (VIS) ein vergleichsweise sehr kleines Intervall ein (s. Abb. 11) [163]. Elektromagnetische Strahlung bzw. Licht trägt sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften. Dieses Phänomen wird als *Welle-Teilchen-Dualismus* bezeichnet. DE BROGLIE postulierte in seiner Doktorarbeit 1924, dass auch Materie wie Elektronen oder Protonen dieses Phänomen zeigen müssten [164]. Folgerichtig und äquivalent dazu überträgt dann sowohl Materie als auch Licht auf den Absorber – abgesehen von der Energie – auch einen Impuls, den *Lichtdruck* [165]. D. h.: Lichtquanten sind Elementarteilchen ohne Ruhemasse und besitzen einen Impuls,

$$p = \frac{h}{\lambda}, \quad (5)$$

wobei λ die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung ist [101]. Sie werden als *Photonen* bezeichnet. Je nach Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung hat ein Photon eine bestimmte Wirkung, die im Teilchen Veränderungen unterschiedlicher Art auslöst (s. Abb. 11) [99]. Die elektromagnetische Strahlung bzw. die Energie der Lichtquanten wird mathematisch mit $\Delta E = h \cdot \nu$ (s.o.)²⁶ formuliert.

Bei langwelligem Strahlen, wie Mikrowellen und noch längeren, wird höchstens die Rotationsenergie des Teilchens beeinflusst. In diesem Bereich sind chemische Reaktionen (sowie auch photochemische) nicht möglich. Letztere sind nämlich insbesondere durch die Beteiligung der Valenzelektronen gekennzeichnet. Zwar können im kurzwelligen Bereich z. B. Röntgenstrahlen

²⁶ Symbolisch wird diese Formel für die Lichtenergie genutzt (vgl. Kap. 2.3.2).

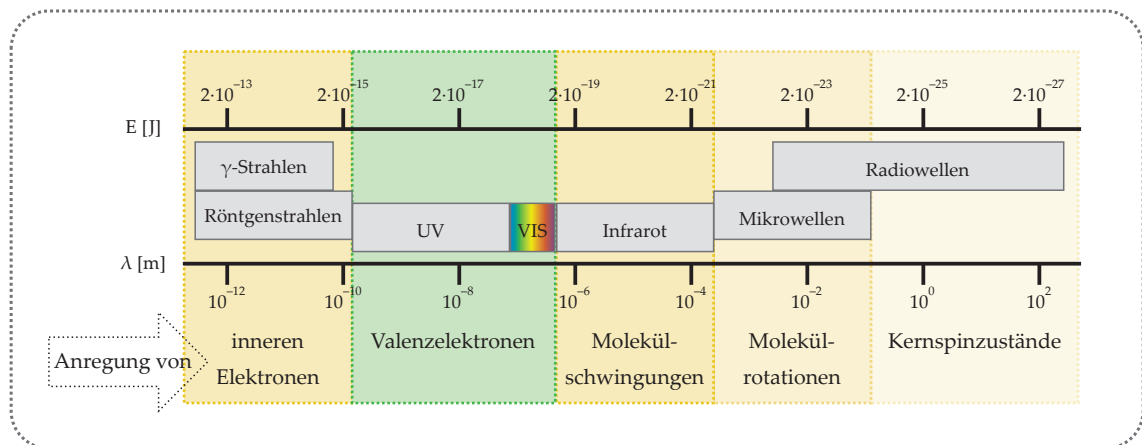


Abb. 11: Elektromagnetische Strahlung und die möglichen Wechselwirkungen mit der Materie (nach [166], [167]).

sekundär, d. h. erst durch Wechselwirkung zwischen den aktivierten inneren Elektronen mit den Außenelektronen, eine chemische Umsetzung bewirken, jedoch sind dies keine unmittelbar primär entstandenen chemischen Reaktionen. Wenn davon ausgegangen wird, dass photochemische Reaktionen direkt durch die Strahlung hervorgerufen werden, dann eignet sich dafür nur der ultraviolette und sichtbare Bereich (UV/VIS-Bereich) der elektromagnetischen Strahlung. Die Außenelektronen, d. h. Valenzelektronen, werden direkt angeregt. Allgemein sind drei Beziehungen zwischen Licht und Materie möglich:

1. „Die optischen Eigenschaften der Stoffe werden durch Licht beeinflusst“ [99] wie ihre Farbe²⁷, Lichtbrechung und Polarisation.
2. „Durch chemische Vorgänge lässt sich Licht erzeugen“ [99]. Beispiele dafür sind die Oxidation von gelbem Phosphor oder auch die natürlichen Lumineszenzerscheinungen wie bei den Leuchtkäfern und den leuchtenden Tiefseefischen²⁸. Sie zeigen *Chemolumineszenz*. Auch bei der *Elektrolumineszenz*²⁹ wird Licht erzeugt, aber in diesem Fall aus elektrischer Energie z. B. durch LEDs (light emitting diodes) [30, 168, 169].
3. Durch Lichteinwirkung kann man chemische Prozesse hervorrufen oder beeinflussen. Hierzu gehören alle Vorgänge aus Abb. 23 (s. Kap. 2.3.3.3). Diese Wechselwirkung ist nach STAUDE im eigentlichen Sinne die Photochemie. [99]

Um noch tiefer in die photochemischen Prozesse eindringen zu können, wird im Folgenden der andere Teilnehmer, nämlich die Materie, in ausreichender Form charakterisiert.

²⁷ In Kap. 2.3.2 wird auf den physikalischen Vorgang *Farbeindruck* näher eingegangen.

²⁸ Letztere werden auch der Unterkategorie *Biolumineszenz* zugeordnet.

²⁹ Dazu gehört auch die Elektrochemolumineszenz. Zusätzlich kommt es dabei im Unterschied zu 1. und 3. jedoch zu chemischen Prozessen im Material.

2.3.2 Organische Verbindungen – Farbstoffe

Alle Stoffe – ob natürlichen Ursprungs oder synthetischer Herkunft –, die farbgebend sind, werden als Farbmittel bezeichnet. Die Klasse der löslichen organischen Farbmittel³⁰ heißt *Farbstoff*³¹ [170].

Das menschliche Auge hat drei Farbrezeptoren, welche für die Farbeempfindung zuständig sind. Fällt auf einen gefärbten Stoff weißes Licht, d. h. das komplette Spektrum des VIS-Bereichs, absorbieren die Farbstoffmoleküle selektiv das Licht und der Rest wird reflektiert oder durchgelassen. Dieser ist für den im Auge entstehenden Farbeindruck verantwortlich und wird als Komplementärfarbe bezeichnet (s. Abb. 12 nach [166]). Auf die gleiche Art und Weise tritt auch beim Anblick lichtemittierender Stoffe ein Farbeindruck auf [101, 171]. Dass ein Stoff farbig ist, ist ein Indiz dafür, dass Licht aus dem sichtbaren Bereich der elektromagnetischen Strahlung (s. Abb. 11) absorbiert wird. Wenn das Absorptionsvermögen eines Stoffes im UV/VIS-Bereich, d. h. bei einer Wellenlänge von 380 bis 780 nm liegt, dann erscheint er für das menschliche Auge farbig.³²

MEIER erklärt 1963 die Bedeutung der Farbstoffe in seinem Lehrbuch *Die Photochemie der organischen Farbstoffe*:

„Von den verschiedenen, im Sichtbaren absorbierenden Verbindungen zeichnen sich dabei die organischen Farbstoffe durch ein besonders starkes Absorptionsvermögen und somit durch die Fähigkeit zu einer Energieaufnahme im lanwelligen Spektralbereich aus. Diese Eigenschaft gibt den Farbstoffen von vornherein eine Sonderstellung auf dem Gebiet der Photochemie der sichtbaren Strahlen, die durch eine konstitutionsbedingte Neigung zur Umwandlung, Speicherung und Übertragung von Energie noch weiter ausgeprägt wird. Die photochemische Bedeutung der Farbstoffe liegt dabei weniger in direkten, zu irreversiblen strukturellen Änderungen der Farbstoffmoleküle

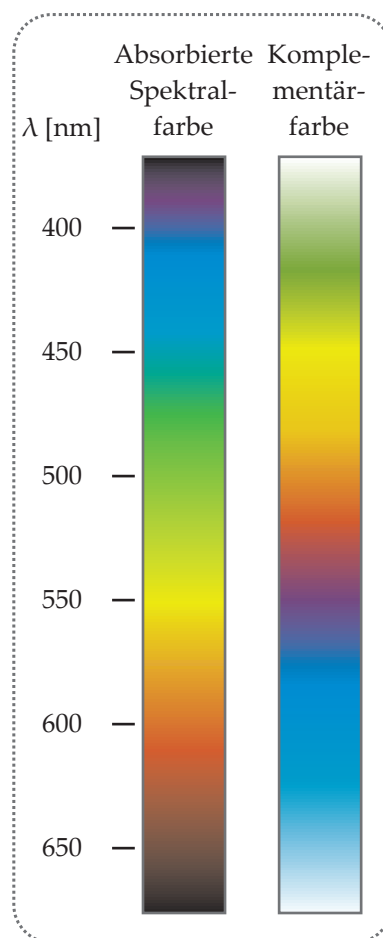


Abb. 12: Absorbierte Spektralfarbe und die für das menschliche Auge sichtbare Komplementärfarbe.

³⁰ Pigmente dagegen sind die in Löse- und Bindemitteln unlöslichen Farbmittel.

³¹ Der Ausdruck *organischer Farbstoff* beinhaltet nach der gewählten Definition eine semantische Redundanz, sodass im Folgenden auf das Adjektiv *organisch* verzichtet wird.

³² Wird das Licht vollständig durchgelassen, so erscheint die Substanz farblos, wenn es komplett reflektiert wird, erscheint sie weiß und bei vollständiger Absorption des Lichts schwarz [170].

führenden Photoreaktionen, sondern mehr in ihrer Fähigkeit, als eine Art photochemischer Katalysator auf die Umgebung zu wirken.“ [172]

Insbesondere Farbstoffmoleküle verfügen über ein ausgesprochen starkes Absorptionsvermögen und können Energie im UV/VIS-Bereich aufnehmen. Die photochemische Aktivität einer elektronenangeregten organischen Verbindung bzw. eines Farbstoffmoleküls ist jedoch abhängig von mehreren Faktoren wie Energiegehalt, Lebensdauer, aber auch der molekularen Struktur und Elektronenverteilung. Als Hilfsmittel dafür dienen Absorptions- oder auch Emissionsspektren (vgl. Kap. 2.3.3.4, Abb. 36) [101].

Die meisten Atome, aus denen organische Verbindungen bestehen, haben nur s- und p-Elektronen zur Ausbildung von Atombindungen zur Verfügung. Die σ -, π - und n-Orbitale sind mit den Valenzelektronen der Moleküle besetzt. Diese sind nach dem Pauli-Prinzip gepaart, sodass sich durch die abgeschlossenen³³ Elektronenschalen für den Grundzustand der Gesamtspin

$$S = \frac{n_{\text{ungepaart}}}{2} = \frac{0}{2} = 0 \quad (6)$$

und schließlich für die Spinmultiplizität

$$(2 \cdot S + 1) = (2 \cdot 0 + 1) = 1 \quad (7)$$

ergibt. Demzufolge befinden sich die organischen Moleküle dabei im *Singulett-Zustand* [101, 173].

Insgesamt sind nach WITT die *chromophoren* und *auxochromen*³⁴ Gruppen, bzw. die Substituenten im Molekül ausschlaggebend für die Farbigkeit eines Stoffes (nach [172]). Zu den chromophoren Gruppen zählen unter anderem $-\text{C}=\text{C}-$, $-\text{C}=\text{O}-$, $-\text{N}=\text{N}-$ oder auch $-\text{NO}_2$. Sie alle haben gemeinsam, dass sie eine Doppelbindung bzw. π -Bindung besitzen. Ein relativ ausgedehntes System aus konjugierten Doppelbindungen³⁵ wird als *Chromophor*³⁶ bezeichnet, sodass ein Stoff durch chromophore Gruppen *chromogen*, d. h. farbbildend wird. Dabei ist eine chromophore Gruppe allein nicht ausreichend für eine Lichtabsorption im VIS-Bereich. Je größer das delokalisierte π -Elektronensystem ist, umso langwelliger ist das absorbierte Licht. Dadurch wird das Energieniveau HBE³⁷ angehoben und das der NUE³⁷ erniedrigt (siehe Abb. 13, Tab. 10).³⁸

³³ Radikale stellen eine Ausnahme dar. Im Grundzustand wären sie im Dublett-Zustand.

³⁴ Im weiteren Verlauf wird unterschieden zwischen auxochromen und antiauxochromen Gruppen, die konventionell auch zusammengefasst werden unter dem Begriff *Auxochrome*.

³⁵ Dies ist eine Verknüpfung von Einfach- und Doppelbindungen innerhalb einer chemischen Verbindung im Wechsel. Anders betrachtet ist dies die Trennung von chromophoren Gruppen über Einzelbindungen.

³⁶ chroma (griech.) = Farbe, phoron (griech.) = Träger.

³⁷ In Energiestufen-Modellen werden die höchste (mit Valenzelektronen des organischen Moleküls) besetzte Energiestufe (**HBE**) und die niedrigste unbesetzte Energiestufe (**NUE**) unterschieden.

³⁸ Hier sind die Energieniveaus im elektronischen Grundzustand des Moleküls gemeint.

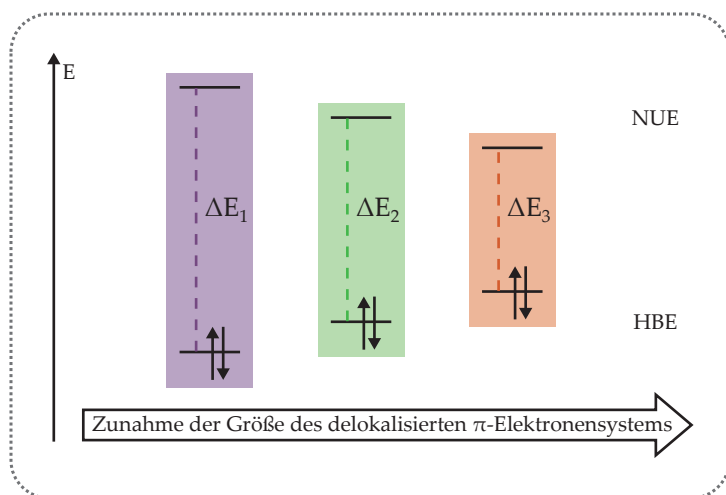


Abb. 13: Abnahme der zur Absorption nötigen Energie durch die Zunahme der Größe des delokalisierten π -Elektronensystems

n	λ_{\max} [nm]
2	217
3	268
4	304
5	334
6	364
7	390
8	410

Tab. 10: Absorptionsmaxima λ_{\max} von Alkenen mit zunehmender Anzahl n an $-C=C-$ Bindungen.

Somit wird die für die zur Anregung des Moleküls nötige Energie ΔE kleiner (s. Kap. 2.3.3.1) [170].³⁹ Das Absorptionsmaximum verschiebt sich zu längeren Wellen des sichtbaren Farbspektrums, was als *bathochromer*⁴⁰ Effekt oder auch als Rotverschiebung bezeichnet wird. Polyene sind ein Beispiel dafür. Dazu gehören Carotinoide wie β -Carotin (s. Abb. 14) mit einem Absorptionsmaximum λ_{\max} bei 494 nm⁴¹ oder Lycopin in Möhren bzw. Tomaten [170, 172, 174].

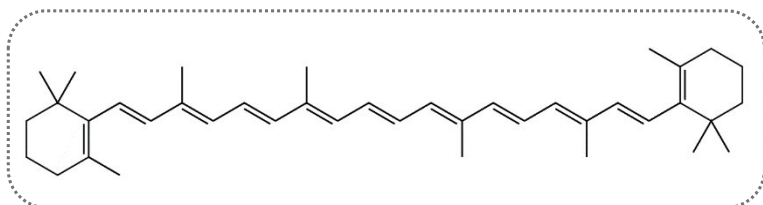


Abb. 14: Strukturformel eines β -Carotin-Moleküls.

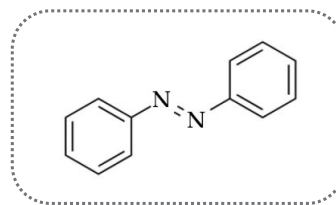


Abb. 15: Strukturformel eines Azobenzol-Moleküls.

Ein Chromophor ist zwar notwendig, aber nicht hinreichend für den typischen Farbstoffcharakter, das Färben. Beispielsweise gehört das orange-rote Azobenzol (s. Abb. 15), Stammverbindung der Azofarbstoffe, trotz seiner Farbigeit nicht zu der Klasse der Farbstoffe [174]. Notwendig sind dafür Substituenten am Aromatenring des Farbstoffmoleküls, die sowohl das Absorptionsverhalten als auch die Färbereigenschaften ändern. Denn auch für das licht- und waschechte Färben von Stoffen wie Naturfasern oder synthetischen Fasern reicht es nicht aus, dass ein Molekül nur einen Chromophor besitzt. Erst durch Substituenten ist dies möglich. Sie werden als *Auxochrome*⁴² und *Antiauxochrome* bezeichnet. Erstere sind Substituenten 1. Ordnung, die durch die elektronenschiebende Art eine Erhöhung der Elektronendichte im Molekül hervorrufen. Grund dafür sind die +M- und

³⁹ Da hier die Materie im Fokus liegt, wird die Lichtabsorption in Kap. 2.3.3.1 ausführlicher thematisiert.

⁴⁰ bathys (griech.): tief.

⁴¹ [nm]: Nanometer (Einheit).

⁴² auxesis (griech.): Zunahme.

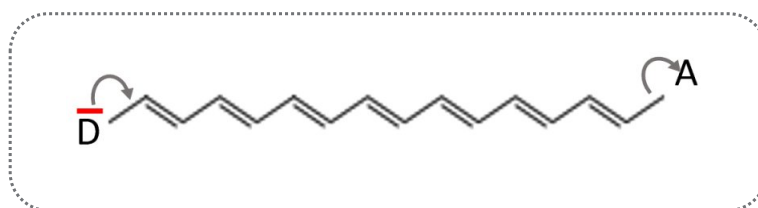


Abb. 16: Bildung eines Push-Pull-Systems im Farbstoffmolekül durch die Donator- und Akzeptorgruppen (nach [175]).

+E-Effekte dieser Elektronendonator-Gruppen (D). Sie sind zwar keine Chromophore, jedoch bewirken sie Bathochromie. Beispielsweise sind die folgenden funktionellen Gruppen Auxochrome: $-\text{NH}_2$, $-\text{OH}$, $-\text{OR}^{43}$, $-\text{NR}_2$, $-\text{O}^-$. Dagegen ziehen Antiauxochrome, d. h. Substituenten 2. Ordnung, als Akzeptorgruppen (A) durch die $-M$ - und $-I$ -Effekte Elektronen aus dem Konjugationssystem heraus. Als Beispiele hierfür fungieren folgende Gruppen: $-\text{N}=\text{O}$, $-\text{C}=\text{N}$, $-\text{CHO}$, $-\text{COO}^-$. Diese Gruppen können in Kombination mit einer auxochromen Gruppe innerhalb eines Moleküls den bathochromen Effekt durch ein *Push-Pull-System* verstärken. Dabei werden Elektronen intramolekular von der Donator- zur Akzeptorgruppe verschoben (s. Abb. 16).

Zudem liegt die Bindungsordnung in einem konjugierten System grundsätzlich zwischen der einer Einfach- und der einer Doppelbindung. Somit liegen die Elektronen delokalisiert vor, sodass mehrere Grenzstrukturen zur Darstellung der Elektronenverteilung im Molekül vorhanden sind. Diese Erscheinung wird als Mesomerie bezeichnet [174,175]. Ein Beispiel für mesomere Grenzstrukturen anhand des Farbstoffmoleküls Merocyanin befindet sich in Abb. 19 (s. Kap. 2.3.2.1).

Im Hinblick auf die Molekülstruktur werden Farbstoffmoleküle schematisch vereinfacht in Abbildung 17 wie folgt dargestellt (nach [172]):

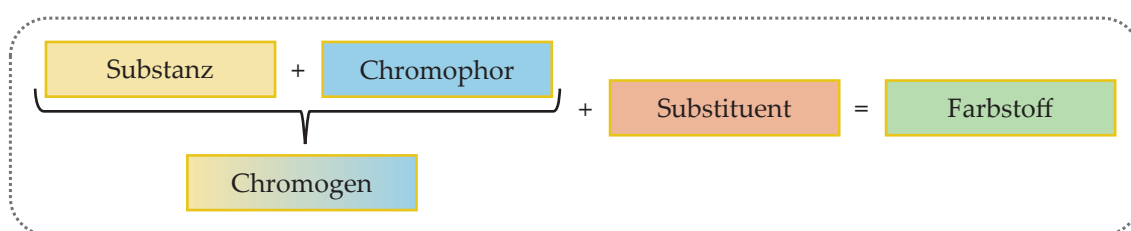


Abb. 17: Schematisch vereinfachte Darstellung eines Farbstoffmoleküls.

Als Faustregel gilt: Das gemeinsame Strukturmerkmal der Farbstoffmoleküle ist ein ausgedehntes System konjugierter Doppelbindungen. Je größer das System aus konjugierten Doppelbindungen ist, desto größer ist die Wellenlänge des durch das Molekül absorbierten Lichts [97, 175]. Als Beispiel für ein Farbstoffmolekül, das in der Molekülstruktur sowohl eine auxochrome als

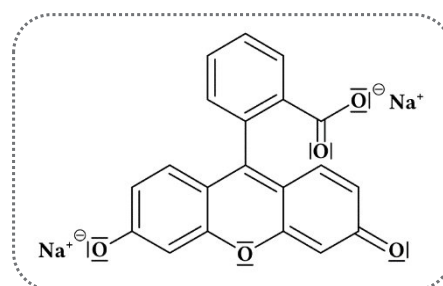


Abb. 18: Molekülstruktur eines Fluoreszein-dianion-Moleküls.

⁴³ R: Alkyl-Rest.

auch eine antiauxochrome Gruppe aufweist, ist das Fluoreszein-dianion anzuführen (s. Abb. 18).

2.3.2.1 Solvatochromie

„Das Elektron beobachtet die Umgebung, soweit es auf eine Bedeutung in seiner Umgebung reagiert. Es handelt genauso wie die Menschen.“ [176]

— D. BOHM

Wenn die Lösungsfarbe einer organischen Verbindung (nicht nur von der einfallenden elektromagnetischen Strahlung, sondern auch) von der Polarität der Lösemittel-Moleküle abhängt, wird diese als *solvatochrom* bezeichnet [177]. Es konnte experimentell nachgewiesen werden, dass nur organische Verbindungen (mit π -Elektronen), deren Elektronenkonfiguration sich im Grundzustand und im angeregten Zustand wesentlich voneinander unterscheiden, eine ausgeprägte Solvatochromie zeigen [178]. „Typically, solvatochromic compounds can be described by two extreme resonance contributing structures: one form is [...] non-polarized, [...] the other is zwitterionic, polarized“ [177]. Demnach müssen die Farbstoff-Moleküle mindestens zwei Grenzstrukturen haben, die sich in der Polarität unterscheiden. Ein Beispiel hierfür ist die organische Verbindung Merocyanin⁴⁴ (s. Abb. 19) [178].

Die Merocyanin-Lösung nimmt in den Lösemitteln Xylol⁴⁵, Aceton und Ethanol jeweils die Farbe blau, violett und rot-pink an (Abb. 20) [180].⁴⁶ Wird das Absorptionsmaximum durch steigende Polarität bathochrom verschoben, ist das die *positive*⁴⁷, und wird sie hypsochrom verschoben, so ist dies die *negative*

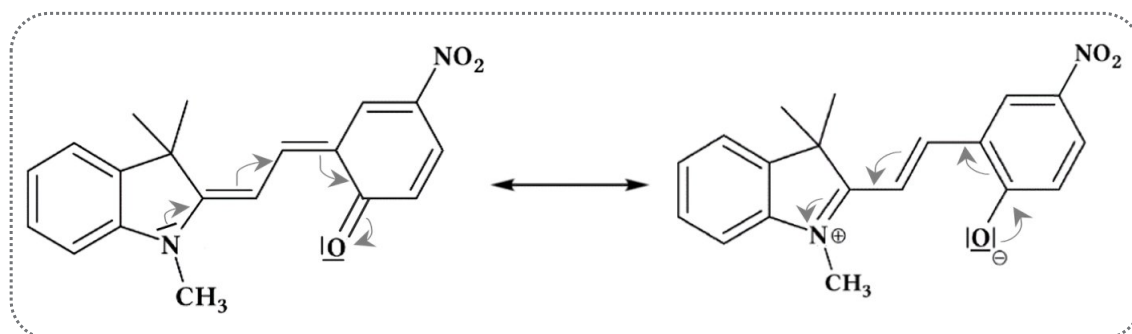


Abb. 19: Strukturformel von einem Merocyanin-Molekül und seiner mesomeren Grenzstruktur (nach [179]).

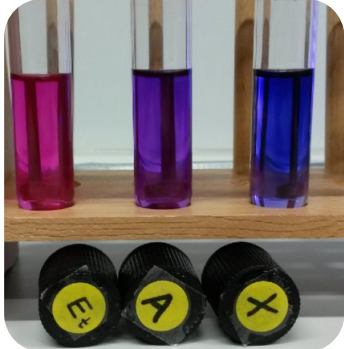
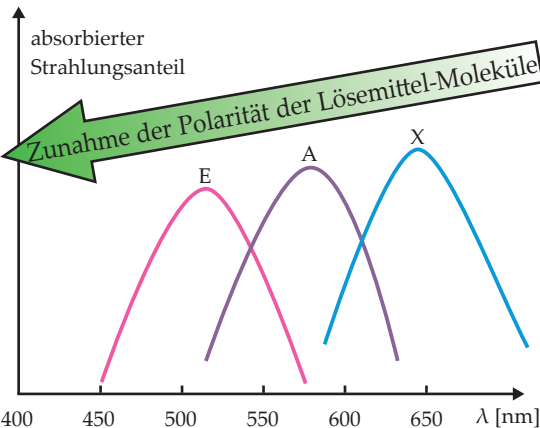
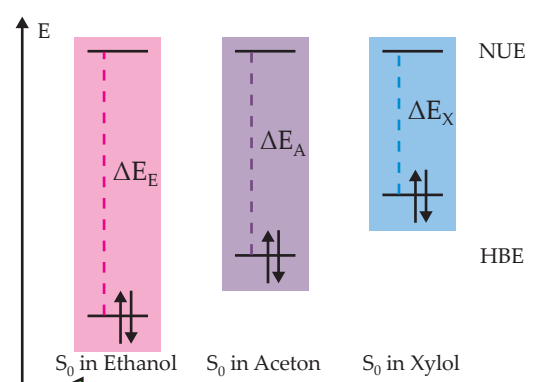
⁴⁴ Merocyanin ist der Trivialname für das Isomer der chemischen Verbindung 1,3,3-Trimethylindolino-6'-Nitrobenzopyrrolspiran, das in der vorliegenden Arbeit *Spiropyran* genannt wird.

⁴⁵ Stattdessen wurde während der Untersuchungen auch Toluol verwendet, wobei auch eine blaue Lösung zu sehen ist (vgl. auch Kap. 6.3).

⁴⁶ Dies geschieht erst nach der Bestrahlung mit UV-Licht, da es sich hierbei gleichzeitig um eine photoisomere Verbindung handelt (s. Kap. 2.3.3.4).

⁴⁷ Die positive Solvatochromie kann analog zur negativen beschrieben werden. Ausgangspunkt ist jedoch im Gegensatz zur negativen Solvatochromie eine bathochrome Verschiebung.

Solvatochromie [181]. Dies ist abhängig davon, welche der beiden Grenzstrukturen im höheren Ausmaß die Elektronenverteilung des Moleküls (im Hinblick auf chemische Eigenschaften) im Grundzustand S_0 mitbestimmt. Anhand des Beispiels Merocyanin kann die negative Solvatochromie mithilfe einer Kette aus logischen Zusammenhängen schrittweise beschrieben werden:

Negative Solvatochromie	
 <p style="text-align: center;">← Zunahme der Polarität der Lösemittel-Moleküle</p>	<p>Abb. 20: Mit steigender Polarität der Moleküle der verwendeten Lösemittel (Xylol, Aceton, Ethanol) ist auf der phänomenologischen Ebene (s. Kap. 4.1.2, Abb. 68) die Entwicklung einer Rotverschiebung /Bathochromie zu beobachten.</p>
 <p style="text-align: center;">← Zunahme der Polarität der Lösemittel-Moleküle</p>	<p>Das Absorptionsmaximum verschiebt sich bei zunehmender Polarität der Lösemittel-Moleküle zu kleineren Wellenlängen, d.h. es liegt eine hypsochrome Verschiebung vor [166].</p>
 <p style="text-align: center;">← Zunahme der Polarität der Lösemittel-Moleküle</p>	<p>1) Die Energiedifferenz ΔE bzw. die elektronische Anregungsenergie zwischen der HBE und der NUE nimmt mit steigender Polarität zu [174].</p> <p>2) Die Erklärung dafür ist: Je polarer die Lösemittel-Moleküle, desto mehr wird die HBE abgesenkt. Die zwitterionische Grenzstruktur von Merocyanin wird über die Bildung von intermolekularen Wechselwirkungen wie Van-der-Waals-Kräften, Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Wasserstoffbrückenbindungen zu den Lösemittel-Molekülen stabilisiert.</p>

	Aus 1) und 2) folgt, dass der elektronische Grundzustand S_0 mit steigender Polarität der Lösemittelmoleküle energetisch abgesenkt wird [172]. (Die Veränderung des NUE ist vernachlässigbar klein) [166]. Die Stabilisierung der Grenzstruktur bedeutet die energetische Absenkung der HBE.
Allgemeine Schlussfolgerungen:	Die im Grundzustand vorliegende Elektronenverteilung der Verbindung wird bei der negativen Solvatochromie maßgeblich durch die polare mesomere Grenzstruktur bestimmt. Experimentell betrachtet gilt, dass mit zunehmender Polarität der Lösemittelmoleküle die Merocyanin-Moleküle besonders stabilisiert werden und somit mehr Energie zu deren Anregung aufgebracht werden muss.

Mit steigender Polarität der Lösemittel-Moleküle ist in jedem Fall die polare mesomere Grenzstruktur thermodynamisch stabiler, d. h. energieärmer. „Obviously, solvatochromism is caused by differential solvation of the ground and the first state of the light-absorbing molecule (or its chromophore): if, with increasing solvent polarity, the ground-state molecule is in the excited state, negative solvatochromism will result. Or vice versa, better stabilization of the molecule in the first excited state relative to that in the ground state, with increasing solvent polarity, will lead to positive solvatochromism“ [181]. Solvatochrome Farbstoffe könnten somit auch als Indikator zur qualitativen Bestimmung der Polarität von Lösemittel-Molekülen verwendet werden [82, 166, 177].

2.3.3 Wechselwirkung zwischen Licht und Materie - Photochemie

Photochemische Vorgänge sind allgegenwärtig: Bei jedem Augenblick im Sehvorgang, mit jeder Pflanze im Wachstumsvorgang, mit jedem Ozon-Molekül in der Stratosphäre im Chapman-Zyklus oder mit jeder Solarzelle bei der Stromerzeugung, in vielen technischen Prozessen und in der Forschung. Die Photochemie findet schon seit jeher reichlich Anwendung. So gibt es einige chemische Prozesse, welche ausschließlich durch Lichteinwirkung funktionieren. Das Licht als Energieform in lichtinduzierten Prozessen kann nicht durch andere Energieformen ersetzt werden. Photochemie wird wie folgt definiert:⁴⁸

⁴⁸ Nach IUPAC wird die Photochemie kurz wie folgt definiert: „The branch of chemistry concerned with the chemical effects of light (far UV or IR)“ [182]. IR: Infrarot.

„Photochemistry is the branch of chemistry which relates to the interactions between matter and photons of visible or ultraviolet light and the subsequent physical and chemical processes which occur from the electronically excited state formed by photon absorption.“ [183]

Den elektronisch angeregten Zustand, den alle photochemischen Prozesse gemeinsam haben, bezeichnet TURRO sogar als „the heart of all photoprocesses“ [184]. Nicht umsonst wird Photochemie im englischen Sprachraum auch als *excited state chemistry* bezeichnet [185 – 187]. Dies ist auch der grundlegende Unterschied zwischen photochemischen und thermischen Reaktionen, da Letztere nur im elektronischen Grundzustand stattfinden. Zum Erreichen dieses besonderen elektronisch angeregten Zustands ist bei photochemischen Prozessen die Lichtabsorption (s. Kap. 2.3.3.1) zwar *notwendig*, aber dennoch nicht *hinreichend* [97]. Im Folgenden wird der photochemische Prozess zeitlich in drei Phasen unterteilt. Dabei umfasst die erste Phase den Teilprozess bis zum Erreichen des (im ganzen Prozess energiereichsten bzw.) angeregten Zustands durch Lichtabsorption. Im Anschluss daran werden in Kapitel 2.3.3.2 die Vorgänge im angeregten Zustand selbst beleuchtet. Diese sind bereits als Beginn bzw. Teil des Desaktivierungsprozesses zu verstehen, da währenddessen schon ein (relativ kleiner) Teil der absorbierten Energie wieder freigegeben wird. Dennoch wird dieser von der letzten Phase (s. Kap. 2.3.3.3) separiert betrachtet, da bei photochemischen Prozessen hauptsächlich der letzte Part des Desaktivierungsprozesses sich grundlegend unterscheiden kann (s. Kap. 2.3.3.3, Abb. 23). So werden dort alle für die Arbeit relevanten Möglichkeiten der Desaktivierung aus dem angeregten Zustand, d. h. Photolumineszenz, Photoisomerisierung und lichtinduzierter Energietransfer, aufgezeigt.

2.3.3.1 Angeregter Zustand durch Lichtabsorption

Licht kann von einem System reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden. Nur die Lichtabsorption kann jedoch nach GROTHUS und DRAPER chemisch wirksam werden (vgl. [101]). Die Gesamtenergie im elektronischen Grundzustand eines Moleküls setzt sich aus verschiedenen intramolekularen Energien⁴⁹ zusammen (s. Kap. 2.3.1) und bestimmt sein Energieniveau (im Energiediagramm). Durch Absorption von Energie muss sich zwangsläufig das Energieniveau ändern. Dazu bestimmt der "molekül-spezifische" energetische Abstand zwischen der höchsten besetzten Energiestufe (HBE) und der niedrigsten unbesetzten Energiestufe (NUE) die zur Anregung der Elektronen des Moleküls aufzuwendende Energie. So muss also für die Wechselwirkung die Lichtenergie dem Energieabstand zwischen den Molekülorbitalen entsprechen [188]. Die Position des Absorptionsmaximums im elektromagnetischen

⁴⁹ Die drei quantisierten Energieformen sind anhand eines Jablonski-Diagramms in Kap. 2.3.3.2 in Abb. 22 dargestellt.

Lichtspektrum hängt demnach von der Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem angeregten Zustand ab (s. Kap. 2.3.2, Abb. 13). Je größer die benötigte Anregungsenergie, desto kurzwelliger sind die absorbierten Photonen [170]. Da nach STARK und EINSTEIN pro Photon ein Teilchen angeregt wird, werden für 1 mol Teilchen genau 1 mol Lichtquanten⁵⁰ zur Anregung benötigt (vgl. [97, 101]). Da die π -Elektronen von Mehrfachbindungen energetisch höher liegen als die Elektronen von σ -Bindungen, können folglich insbesondere die π -Elektronen in chromophoren Farbstoff-Molekülen leichter für den Übergang in andere Elektronenniveaus angeregt werden ($\pi \rightarrow \pi^*$) [174].⁵¹

Die Moleküle befinden sich bei Raumtemperatur normalerweise im untersten Schwingungsniveau, d. h. sie führen nur die Nullpunktschwingung aus [101], weil bei Temperaturen von 20 bis 25 °C nicht ausreichend Wärme zur Anregung auf höhere Schwingungsniveaus vorhanden ist [189].⁵² Durch Lichtabsorption wird das Molekül in seinem elektronischen Grundzustand S_0 angeregt, sodass ein Elektron aus einem mit zwei Elektronen besetzten Orbital in ein energetisch höher liegendes unbesetztes (anti-bindendes) Orbital übergeht. Da das angeregte Elektron im angeregten Zustand des Moleküls seinen Spin aus dem Grundzustand nicht verändert (s. Abb. 21), zeigt sich im Gesamtspinmoment weiterhin ein Singulett-Zustand (vgl. Kap. 2.3.1.1). Diese Art von Übergängen sind sehr wahrscheinlich bzw. "erlaubt" [101].

Die Energiedifferenz zwischen dem Grundzustand und dem angeregten Zustand ist gequantelt, da sowohl der jeweilige Energiegehalt der Molekülorbitale und folglich auch die Gesamtenergie des Moleküls gequantelt sind. Daraus folgt, dass der Übergang immer nur zwischen diskreten Energieniveaus stattfinden kann [174]. Zur Anregung werden Energiequanten benötigt, sodass im elektronisch angeregten Zustand das Molekül sich um das Vielfache⁵³ dieses Energiebetrags über dem S_0 [101] befindet. Also geht das Molekül durch Absorption eines Lichtquants in den angeregten S_1 -Zustand über und seine Energie wird dadurch erhöht. Innerhalb eines Energieniveaus S_x ($x \in \mathbb{N}_1$)⁵⁴ besitzt das Molekül verschiedene Schwingungszustände (bzw. -quantenzahlen ($v = 0, 1, 2, \dots$)⁵⁵) (s. Abb. 21). Diese unterscheiden sich in ihrem Energiegehalt so geringfügig, dass das angeregte Elektron gegebenenfalls seinen Schwingungszustand ändern kann. Aufgrund der Vielzahl an praktisch möglichen Schwingungsniveaus innerhalb des angeregten Energiezustands bei den $S_0 \rightarrow S_1$ -Anregungen sind in den durch spektroskopische Verfahren aufgenommenen UV-Spektren keine scharfen Linien, sondern Banden zu sehen [189].

⁵⁰ Dies gilt für die jeweils den Molekülen zur Anregung entsprechende Wellenlänge. 1 mol Photonen werden mit einer Einstein-Einheit definiert.

⁵¹ Der energieärmere Übergang vom nichtbindenden n- bzw. sp-Orbital zum antibindenden π^* -Orbital findet kaum statt, weil er symmetrieverboten ist. Die sp-Orbitale liegen energieärmer als die π -Orbitale und so auch uninteressant für die Photochemie [189].

⁵² Experimentell ist nachzuweisen, dass die Moleküle teilweise rotatorisch angeregt sein müssen [190].

⁵³ Es sind nicht nur ganzzahlige Vielfache gemeint, da sowohl harmonische als auch anharmonische Schwingungen des Moleküls möglich sind. In Abb. 21 ist dies durch unterschiedliche Δv dargestellt.

⁵⁴ Die Multiplizitätsregel bzw. der Spinerhaltungssatz besagt, dass elektronische Übergänge vom Grundzustand in energiereichere Singulett-Zustände S_x nur unter Spinerhalt erlaubt sind [173, 191].

⁵⁵ Der Schwingungszustand $v = 0$ ist am wahrscheinlichsten, und je höher der Schwingungszustand, desto unwahrscheinlicher ist dieser für das Molekül [190].

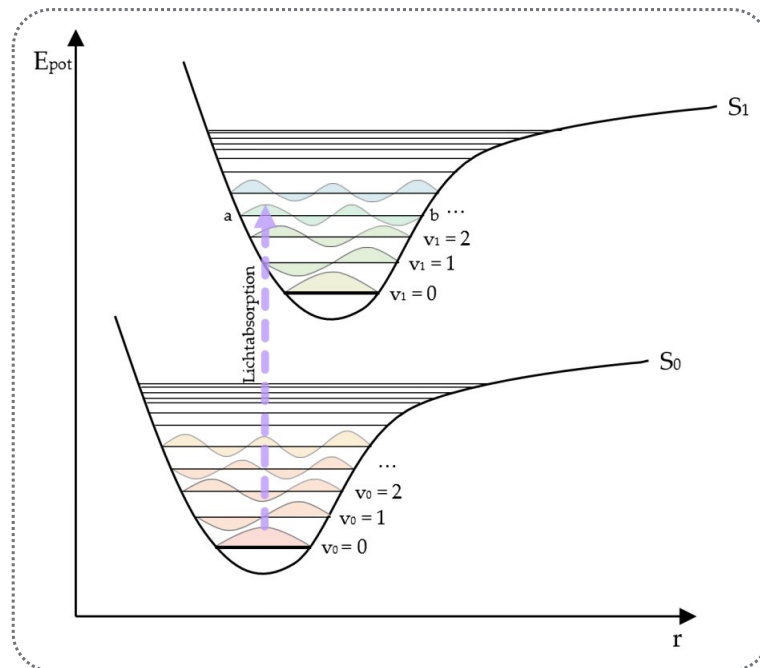


Abb. 21: Vertikaler $S_0 \rightarrow S_1$ -Übergang durch Lichtabsorption nach dem *Franck-Condon-Prinzip* (vgl. [161, 194]).⁵⁶

Der Elektronenübergang findet innerhalb von ca. 10^{-15} s statt [192]. Weil dieser viel schneller als Atomschwingungen (ca. 10^{-12} s) stattfindet, folgt nach dem *Franck-Condon-Prinzip*, dass während der Übergänge zwischen den Energiezuständen die Kernabstände der Molekül-Atome sich nicht ändern, d. h. die Geometrie des Moleküls unmittelbar nach der Lichtabsorption gleichgeblieben ist [99, 190]. In Abbildung 21 wird der Elektronenübergang von der unteren Potenzialenergiekurve (S_0) mit einer Senkrechten zur oberen Potenzialenergiekurve (S_1) dargestellt. Diese werden auch als *vertikale Übergänge* bezeichnet [193].⁵⁷ Sobald das elektronisch angeregte Molekül mit seiner Umgebung im Gleichgewicht ist (und weil nun mathematisch betrachtet die Potenzialfunktion eine andere ist), ändert sich die Molekülstruktur, indem das Teilchen in einem Intervall $[a, b]$ schwingt [160, 189].

Das Molekül befindet sich nach Lichtabsorption nun mit einer veränderten Elektronenkonfiguration in einem energiereicheren angeregten Zustand, z.B. S_1 [101].⁵⁸ Nach IUPAC⁵⁹ ist der angeregte Zustand offiziell wie folgt definiert [182]:

„State of a system with energy higher than that of the ground state. This term is most commonly used to characterize a molecule in one of its electronically excited states, but can also refer to vibrational and/or rotational excitation in the electronic ground state.“

⁵⁶ In dieser Abbildung werden als Potenzialform die Morse-Potenzialkurven zur Darstellung der potenziellen Energie E_{pot} eines zweiatomigen Moleküls in Abhängigkeit von dem Kernabstand r gewählt [194]. Dieser Zusammenhang kann aufgrund der Komplexität nur für zweiatomige Moleküle mit Morse-Potenzialkurven vereinfacht erklärt werden [190].

⁵⁷ Dieser Ausdruck wird ebenso bei mehrdimensionalen Potenzialkurven verwendet.

⁵⁸ In der Abbildung sind auch die Schwingungseigenfunktionen der Schwingungsquantenzahlen $v \in \{0, \dots, 5\}$ zu erkennen. Je größer die Amplitude, desto höher ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Moleküls. Demnach wäre der günstigste bzw. energieärmste Übergang hier $v_0 = 0$ nach $v_1 = 3$ (s. Abb. 21) [190, 160].

⁵⁹ IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry.

Aufgrund dessen und obwohl das Molekül im angeregten Zustand und im Grundzustand aus der gleichen Anzahl an gleichen Atomen besteht, handelt es sich im elektronisch angeregten Zustand um eine andere *chemische Spezies* [97]. TURRO bezeichnet das Molekül im angeregten Zustand sogar als „the electronic isomer of the ground state“ [184]. Die beiden Isomere unterscheiden sich in ihren physikalischen und chemischen Eigenschaften bzw. in ihrer geometrischen Molekülstruktur durch die veränderte Elektronenkonfiguration und auch in ihren Lebensdauern [97]. Im Vergleich zur Lebensdauer im S_0 verweilt das Molekül im S_1 -Zustand aufgrund der Tatsache, dass dieser Zustand energetisch sehr ungünstig ist, nur ca. 10^{-8} s.

2.3.3.2 Vorgänge im angeregten Zustand

Als Hauptaktivitäten der Materie bzw. des Moleküls wird allgemein von der Anregung und der Desaktivierung gesprochen. Doch nicht umsonst bezeichnet TURRO gerade die Verbindung zwischen diesen beiden – und wohlgermerkt die Phase mit den meisten möglichen Energiezuständen innerhalb eines Photoprozesses, nämlich den angeregten Zustand – als *das Herz aller Photoprozesse* (s. Kap. 2.3.3). Deshalb sollen nun, wenn auch nur in einer überschaubaren Kürze mit ausgewählter Fachliteratur ([101, 189, 190, 194]), bevor ausführlich die (weiteren) Desaktivierungsmöglichkeiten ausgeführt werden (s. Kap. 2.3.3.3), die zunächst strahlungslosen Vorgänge bzw. Desaktivierungsprozesse im angeregten Zustand selbst, beschrieben werden. D. h.: Hier werden die Desaktivierungsprozesse innerhalb des angeregten Zustands des Moleküls dargestellt und später diejenigen, die aus dem angeregten Zustand zum Grundzustand wieder zurückführen.

Zur Beschreibung der möglichen Vorgänge wird ein *Jablonski-Diagramm* gewählt und von einem S_0 - S_2 -Übergang ausgegangen (s. Abb. 22). Im Jablonski-Diagramm sind rovibronische Übergänge, d. h. Rotations-, Schwingungs-, und elektronische Übergänge (r , v , S) sowie die Molekülorbital-Elektronenkonfigurationen dargestellt [159].⁶⁰

Ein Molekül wird durch Absorption (A) von Lichtenergie innerhalb von 10^{-15} s angeregt. Weil es währenddessen (– begründet durch das *Franck-Condon-Prinzip* –) zu keiner Spin-Umkehr kommt und organische Moleküle durch ihre Elektronenpaare sich in Singulett-Zuständen aufhalten (s. Kap. 2.3.1.1), befindet sich das Molekül im angeregten Zustand zuerst in einem S_x -Zustand ($x \in \mathbb{N}_1$), hier beispielsweise S_2 (s. Abb. 22) [189].⁶¹ Außerdem können aufgrund der so hohen Geschwindigkeit des Anregungsvorgangs keine der Desaktivierungsprozesse zur inter- und intramolekularen Umwandlungen der elektronischen Energie damit konkurrieren [101]. Die Geschwindigkeiten einzelner physika-

⁶⁰ In der Regel wird auf die Darstellung der Rotationsschwingungen verzichtet, wie auch in diesem Fall in Abb. 22.

⁶¹ Nach der Spinauswahlregel muss $\Delta S = 0$ ergeben. Dies ist bei einem $S_0 \rightarrow T_x$ ($x \in \mathbb{N}_1$) nicht der Fall, da $\Delta S = 1$ ist [101].

lischer Prozesse bestimmen, ob ein anderer Desaktivierungsprozess oder gar eine chemische Reaktion konkurrenzfähig ist oder nicht [190].

Im S_2 -Zustand ist das Molekül nicht nur elektronenangeregt [101]. Ein Teil der überschüssigen elektronischen Anregungsenergie wird normalerweise über Schwingungsrelaxationen (SR), d. h. über intermolekulare Umwandlung strahlungslos und sukzessive in thermische Schwingungs-, Rotations- und Translationsenergie umgewandelt und an die Umgebung, d. h. in thermischen Zusammenstößen meistens an das Lösungsmittel, in dem sich die angeregten Moleküle befinden [190]. So wird nach ca. 10^{-12} s der $S_2(v_0 = 0)$ -Zustand erreicht. An diese SR ist die *Internal Conversion* (IC) angeknüpft (s. Abb. 22). Dies ist eine intramolekulare Umwandlung der Anregungsenergie, wobei das Molekül (mit gleicher Spinmultiplizität) vom S_2 - in den schwingungsangeregten S_1 -Zustand übergeht [189, 190, 194]. Durch weitere SR erreicht das Molekül das $S_1(v_0 = 0)$ -Niveau. Der S_2 - S_1 -Übergang dauert insgesamt 10^{-11} s. Energiereichere Singulett-Zustände sind noch kurzlebiger [189]. Da die Lebensdauer im energieärmsten angeregten Zustand mit ca. 10^{-8} s relativ lang ist und zudem die Energiedifferenz zum Grundzustand $S_0(v_0 = 0)$ größer ist als zum $S_2(v_2 = 0)$, tritt in diesem Zeitintervall Konkurrenz zwischen den Desaktivierungsprozessen ein [189, 195]. Sind für ein Molekül auch die Triplett-Zustände quantenmechanisch erlaubt, kann die Desaktivierung einen anderen Weg nehmen. So ändert das Molekül im angeregten Zustand seine Spinmultiplizität: Daher kann nun aufgrund der geringeren Energiedifferenz eine weitere intramolekulare Umwandlung – oder auch Intersystem Crossing (ISC)⁶² genannt – zwischen dem S_1 - und dem Triplett-Zustand⁶³ (T) stattfinden. D. h.: Der Anregungszustand S_1 wird unter Spin-Umkehr eines angeregten Elektrons durch den Übergang des Moleküls in den energetisch tieferliegenden T_1 -Zustand einer anderen Spinmultiplizität desaktiviert [189, 194].⁶⁴ Von den Spinauswahlregeln her sind Übergänge zwischen Zuständen verschiedener Spinmultiplizität (im Vergleich zu den Singulett-Singulett-Übergängen) *spinverboten*. Dies bedeutet, dass sie quantenmechanisch nicht erlaubt bzw. sehr unwahrscheinlich sind und deshalb langsamer ablaufen, sodass sie länger als 10^{-6} s (in manchen Fällen bis zu einigen Minuten oder sogar Stunden) andauern können [189, 190, 192]. Außerdem gibt es relativ viele Moleküle, die diesen Zustand erreichen können [189].

Schließlich ist es wichtig, nach den Abläufen an dieser Stelle ebenfalls mit einem Zitat von TURRO hervorzuheben, dass es sich bei allen Formen des Moleküls in seinen unterschiedlichen – sowohl angeregten Zuständen als auch Grundzuständen – letztendlich um *elektronische Isomere* und *Spinisomere* handelt [184]:

⁶² Sowohl IC als auch ISC sind isoenergetische Prozesse [190]. (Deshalb werden in der Abb. 22 keine schwingenden Linien zu deren Darstellung verwendet.)

⁶³ Die Spinmultiplizität beträgt drei, woher auch der Name dieses elektronisch angeregten Zustands kommt.

⁶⁴ Zwar sind Übergänge zwischen Zuständen verschiedener Spinmultiplizität *spinverboten* (im Vergleich zu den Singulett-Singulett-Übergängen), jedoch findet ISCs bei vielen Molekülen statt [189].

„Each excited state is different from the ground state even though their molecular constitutions are identical, [...] all the states in an energy diagram are isomeric. What is the basis of the isomerism? It is the electronic differences or the spin differences between the displayed states.“

Zwar ist der angeregte Zustand "nur" ein *elektronisches Isomer* eines Moleküls, insbesondere durch diesen können jedoch thermodynamisch betrachtet die im Grundzustand unmöglichen Wege überquert werden (s. Kap. 2.3.3.3). Außerdem ist es ein fundamentales Ziel der Photochemie, in der Forschung und für die Anwendung wichtige Reaktionen mit $\Delta G^0 > 0$ ⁶⁵ *energieeffizient* zu aktivieren [196]. Vergleichbar wäre folgende Metapher: Mit einem Auto zum Mond zu fliegen ist unmöglich; aber mit einer Rakete hingegen ist der Mond erreichbar. Es sei denn, dass Auto ist so schnell wie eine Rakete, aber dann würde das Auto die Strecke mit dem Tempo und der dabei entstehenden Wärme nicht aushalten und zerstört werden. Auch die konkrete Analogie zur submikroskopischen Ebene wäre möglich: Die Energiedifferenz zur Umsetzung einer chemischen Reaktion könnte vielleicht mit ausreichend Wärme versucht werden zu bewältigen, jedoch würde dabei das molekulare System sich thermisch zersetzen. Demnach wäre es am sinnvollsten, die Rakete bzw. die Lichtenergie zu nutzen.

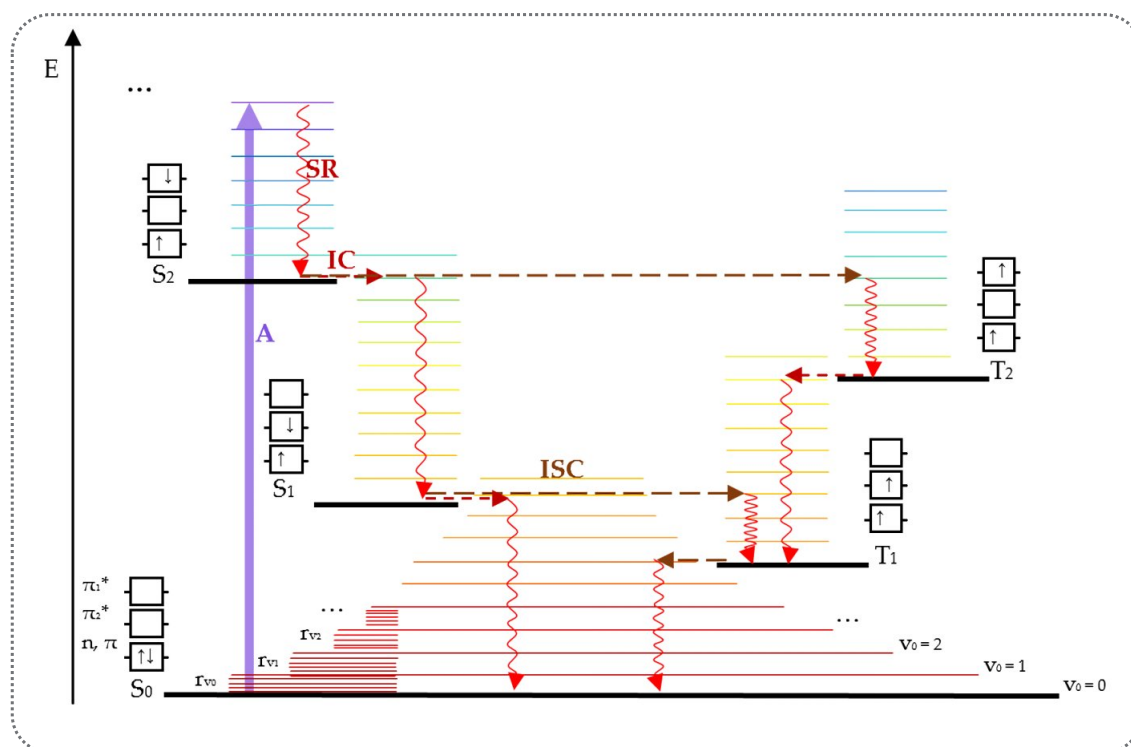


Abb. 22: Desaktivierungsmöglichkeiten im elektronisch angeregten Zustand des Moleküls (nach [190, 194, 197]).⁶⁶

⁶⁵ ΔG^0 ist die Differenz zwischen der freien Enthalpie bzw. der Gibbs-Energien der Reaktionsprodukte und der Ausgangsstoffe. Wenn $\Delta G^0 > 0$ ist, dann gilt, dass die chemische Reaktion thermodynamisch gesehen in Richtung der Ausgangsstoffe verlaufen würde.

⁶⁶ In der Abb. 22 befinden sich bereits Darstellungen für den Prozess der strahlungslosen Desaktivierung in den S₀-Zustand, die erst in Kap. 2.3.3.3.3 näher erläutert werden.

2.3.3.3 Desaktivierung des angeregten Zustands

Aufgrund der relativ langen Lebensdauer sind der T_1 - ($> 10^{-6}$ s) [198] aber auch der S_1 -Zustand (ca. 10^{-8} s) (im Vergleich zu allen anderen) photochemisch besonders interessant, weil aus diesen beiden Zuständen photochemische Reaktionen am wahrscheinlichsten sind [183,189].⁶⁷ Sowohl die Lebensdauer des S_1 - als auch die des T_1 -Zustands können daher durch alternative Desaktivierungsmöglichkeiten (s. Kap. 2.3.3.3.1) begrenzt werden. Dies steht unmittelbar im Zusammenhang mit Faktoren wie der Molekülstruktur, der Anzahl an Schweratomen, der relativen bzw. molekülspezifischen Lage der Energieniveaus. Auch physikalische Größen wie Druck und Temperatur (s. Kap. 2.3.3.3.1), und selbstverständlich die Umgebung aus Lösemittel-Molekülen (s. Kap. 2.3.3.3.4) spielen dabei eine Rolle. Vom elektronisch angeregten S_1 - bzw. T_1 -Zustand (A^*) ausgehend kann das Teilchen (A) durch verschiedene Vorgänge in den elektronischen Grundzustand wieder zurückkehren.

Die für die Arbeit relevanten, in der Abb. 23 explizit aufgeführten Desaktivierungsmöglichkeiten *Photolumineszenz*, *Photoisomerisierung*, *Elektronentransfer* und die Möglichkeit des S_1 - S_0 -Übergangs über Schwingungsrelaxationen, d. h. *Wärmeemission*, werden im Folgenden ausführlicher dargestellt [97]. Häufig wird in der Literatur zwischen *strahlenden* und *strahlungslosen Desaktivierungsprozessen*⁶⁸ unterschieden. Bis auf die Photolumineszenz handelt es sich bei allen anderen Prozessen um strahlungslose Desaktivierungen des A^* , denn zu diesen gehört jeder Desaktivierungsprozess, der „entweder auf einen Energieaustausch mit den umgebenen Molekülen zurückgeht oder innerhalb des (!) angeregten Farbstoffmoleküls abläuft“ [172].

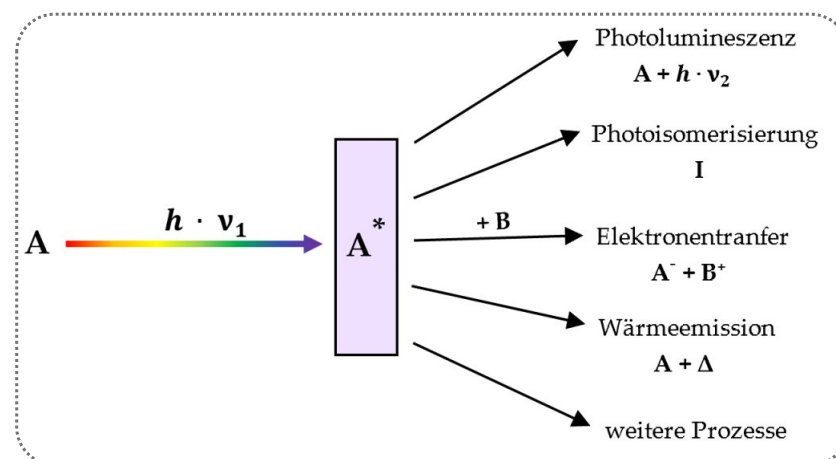


Abb. 23: Desaktivierungsmöglichkeiten in den S_0 -Zustand (nach [7, 199]). Weitere Prozesse sind z. B. der Energietransfer und die Photovoltaik.

⁶⁷ T_x -Zustände mit ($x \in \mathbb{N} > 1$) sind wie auch die S_x -Zustände ($x \in \mathbb{N} > 1$) folglich instabiler bzw. kurzlebiger.

⁶⁸ Da nach der Anregung der Desaktivierungsprozess beginnt, gehören alle Schritte ab diesem Zeitpunkt dem Desaktivierungsprozess an. Ab hier ist jedoch, wie bereits in Kap. 2.3.3 erklärt, mit Desaktivierungsprozessen nur das Ende, d. h. der Übergang vom angeregten Zustand in den Grundzustand gemeint.

2.3.3.3.1 Durch Photolumineszenz

Bestimmte Farbstoffe sind in der Lage, die absorbierte Lichtenergie wieder in Form von elektromagnetischer Strahlung spontan⁶⁹ zu emittieren. Die strahlende Desaktivierung als Phänomen ist im Alltag in unterschiedlichen Situationen zu beobachten, wie z.B. unter *Schwarzlicht*⁷⁰ auf Geldscheinen und der Wäsche und im Dunkeln am Ziffernblatt der Armbanduhr oder bei Notfallschildern (s. Abb. 24). Alle diese Gegenstände enthalten im Material fluoreszierende bzw. phosphoreszierende Farbstoff-Moleküle.

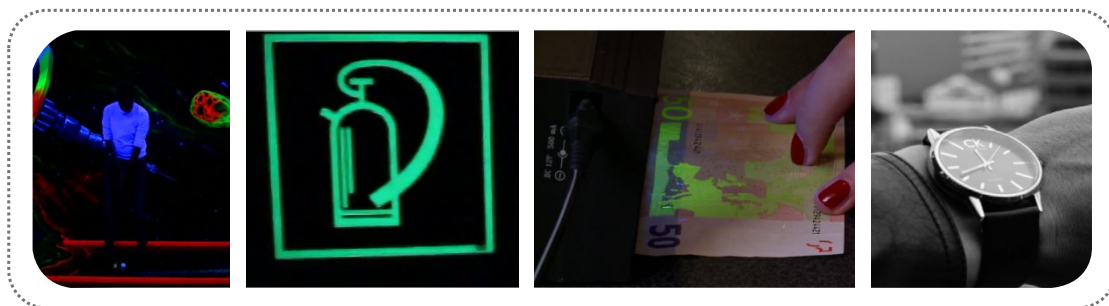


Abb. 24: Photolumineszenz in Alltagsgegenständen (Fotos aus [202]).

Die Regel von KASHA besagt: „The emitting level of a given multiplicity is the lowest level of the multiplicity“ [203]. Alle strahlenden Desaktivierungen finden demnach erst dann statt, wenn das Molekül im energieärmsten Schwingungsniveau v_0 des jeweiligen angeregten Energiezustands ist (s. Abb. 25).⁷¹ Deshalb treten bei Lichtemissionen fast ausschließlich S_1-S_0 - und T_1-S_0 -Übergänge ein [159]. Diese Tatsache steht eng in Verbindung mit der *Stoke'schen Regel*. Sie besagt, dass das emittierte Licht energieärmer als das von dem gleichen System zuvor absorbierte Licht ist, da mit Blick auf die KASHA-Regel ein Teil der absorbierten Energie bis zum Erreichen des energieärmsten Schwingungszustands des entsprechenden angeregten Energieniveaus durch Energiedissipation an die Umgebung abgegeben wird (s. Kap. 2.3.3.2).⁷² Folglich muss das Emissionsspektrum im Vergleich zum Absorptionsspektrum der entsprechenden Substanz bathochrom verschoben sein. In solchen Fällen wird diese Verschiebung als *Stokes-Shift* bezeichnet. Neben der negativen Energieausbeute beträgt die Quantenausbeute bzw. das Verhältnis der emittierten Photonenzahl (r_e) zur absorbierten Photonenzahl (r_a) bei der Photolumineszenz [97, 172, 198]

$$\varphi = \frac{r_e}{r_a} < 1 \quad (8)$$

⁶⁹ Im Gegensatz dazu gibt es zudem die stimulierte Emission zur Erzeugung von Laserlicht [200, 201].

⁷⁰ Im Alltag wird gewöhnlich für ultraviolettes Licht auch die Bezeichnung *Schwarzlicht* verwendet. Im Text wurde diese aus kontextuellen Gründen gewählt.

⁷¹ Da das Beobachtete von der Genauigkeit und Empfindlichkeit des Detektors abhängt, ist die Regel von KASHA nicht absolut übertragbar auf alle Farbstoffmoleküle. Beispielsweise wurden nach 1950 bei benzoiden Aromaten wie z. B. bei Azulen (wahrscheinlich aufgrund der großen Energielücke) S_x-S_0 -Übergänge ($x > 1$) festgehalten [198, 159].

⁷² Hier wird von monomolekularen photochemischen Prozessen ausgegangen, in denen pro Teilchen ein Photon absorbiert wird. Anderenfalls gilt die Stoke'sche Regel nicht für Photolumineszenz durch die Aufwärtskonvertierung von Photonen (photon upconversion). D. h.: Es wird kurzwelligeres Licht emittiert, als absorbiert wurde. Dies entsteht entweder durch die Absorption von mehr als einem Photon pro Molekül (two-photon absorption, TPA,) [204–206] oder durch die sogenannte Triplett-Triplett-Annihilation (TTA), die durch bimolekulare Prozesse im angeregten Zustand eintritt [207, 150].

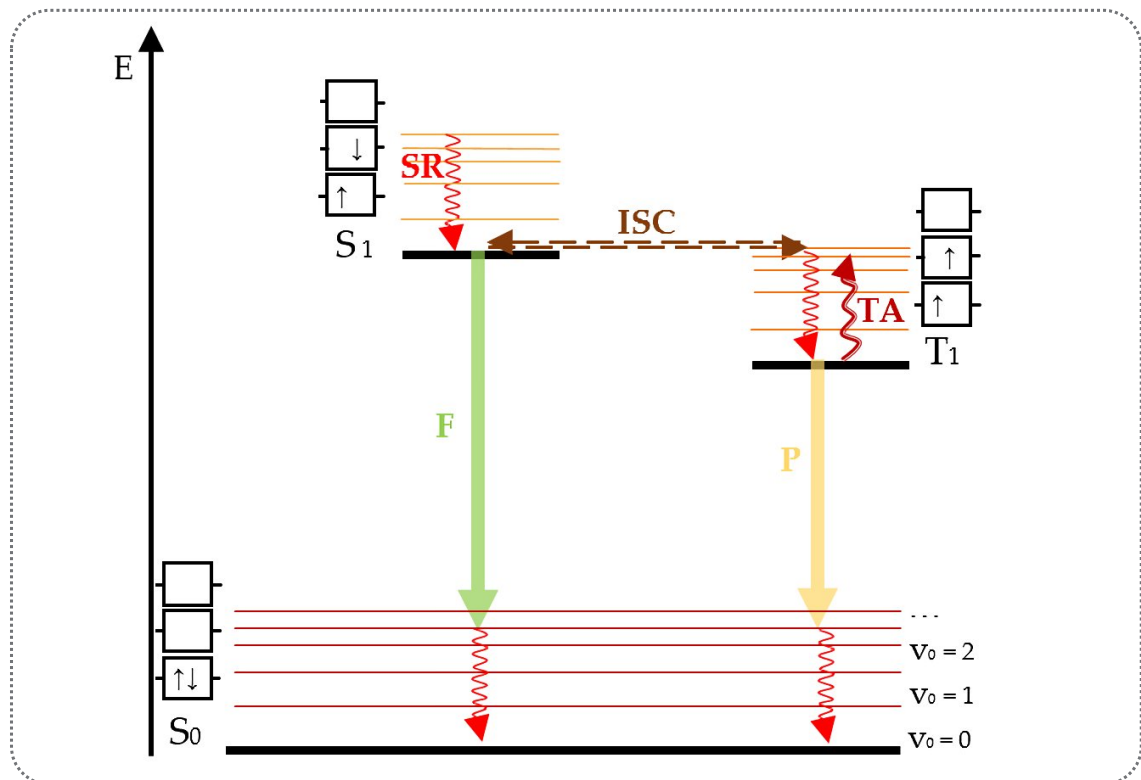


Abb. 25: Strahlende Desaktivierungsmöglichkeiten des angeregten Zustands (vgl. [183]).

Photoemission kann auf drei Arten geschehen: Fluoreszenz (1), Phosphoreszenz (2) und die verzögerte Fluoreszenz (3).

1. Die *Fluoreszenz* (F) ist phänomenologisch gesehen die Lichtemission einer Substanz, die schon während der Bestrahlung auftritt.⁷³ Quantenmechanisch betrachtet ist sie die temperaturunabhängige [172] strahlende Desaktivierung von Molekülen beim Übergang von einem angeregten Zustand S_x ($x \in \mathbb{N}_1$) zum Grundzustand S_0 [183, 208], wobei nach KASHA dieser der S_1 - S_0 -Übergang ist (s. Abb. 25).⁷⁴ Dabei wird der $S_0(v_0 = 0)$ -Zustand nicht direkt erreicht, sondern erst durch eine weitere SR von einem der Oberschwingungen v_x ($x > 0$) in den Schwingungsgrundzustand des S_0 [190, 193]. Die Größenordnung für die Dauer der Fluoreszenz liegt bei ca. 10^{-15} s [150].⁷⁵ Dass der S_1 - S_0 -Übergang nicht komplett über SR oder über IC stattfindet, liegt an den strukturellen Eigenschaften dieser organischen Verbindungen. Beispielsweise ist das Fluoreszein-Dianionsalz ein Fluorophor, d. h. ein Stoff, der fähig ist zu fluoreszieren. Wird es in Wasser gelöst, so fluoresziert die Lösung gelb-grün. Im Vergleich dazu fluoresziert die als pH-Indikator bekannte Phenolphthalein-Dianion-Lösung nicht. Den grundlegenden Unterschied machen die Freiheitsgrade aus, wie Schwingungs- und Rotations-

⁷³ Die Fluoreszenz einer Lösung kann von der Konzentration der darin gelösten fluoreszierenden Substanz und auch dem pH-Wert des Lösemittels abhängen. Z.B. kann die Fluoreszenzintensität in den meisten Fällen durch eine stark erhöhte Konzentration gelöscht werden [172].

⁷⁴ In der Literatur wird bei der Fluoreszenz nicht explizit ausschließlich von dem S_1 - S_0 -Zustand ausgegangen. Diese Nichtfestlegung wird nach Recherchen bekräftigt, da auch strahlende Desaktivierungen vom S_2 -Zustand laut Literatur möglich sein sollen und unter der Bezeichnung *two-level emission* bekannt ist. [209, 208].

⁷⁵ In der Literatur werden für die Lebensdauer auch Angaben wie $10^{-2} - 10^{-6}$ s [183] oder $10^{-9} - 10^{-7}$ s [208] gemacht.

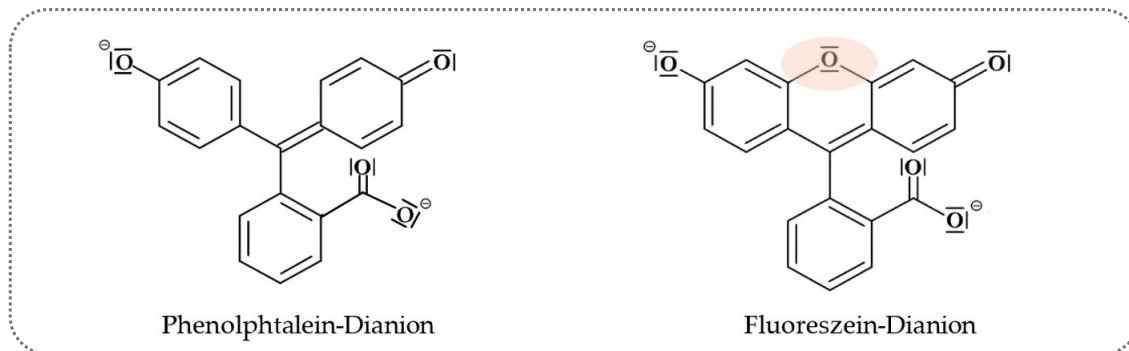


Abb. 26: Die Molekülstrukturen vom Phenolphthalein-Dianion und Fluoreszein-Dianion im Vergleich.

möglichkeiten, die dem Fluoreszein-Dianion aufgrund der vorhandenen Sauerstoff-Brücke zwischen den beiden Benzolringen fehlen (s. Abb. 26). Dadurch wird verhindert, dass die aufgenommene Energie in Torsions- und Schwingungsenergien umgewandelt werden kann, sodass diese in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder emittiert wird [189, 190].⁷⁶

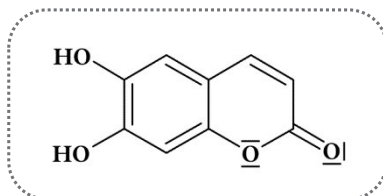


Abb. 27: Molekülstruktur von Esculin.



Abb. 28: Emission von Blaulicht durch einen angeschnittenen Kastanienzweig in wässriger Lösung unter UV-Licht.

Ein weiterer natürlicher Farbstoff, der in Kastanienzweigen zu finden ist und ebenfalls in der Lage ist, zu fluoreszieren, ist Esculin (s. Abb. 27). Unter der Bestrahlung mit UV-Licht emittieren die dadurch elektronisch angeregten Esculin-Moleküle blaues, stets energieärmeres Licht (s. Abb. 28).

2. Die *Phosphoreszenz* (P) ist nach dem anhaltenden Leuchten der Phosphorkristalle benannt worden. Bei dem Phosphor ist das Leuchten jedoch die Auswirkung seiner Oxidation⁷⁷ und nicht die Folge der Lichtabsorption einer organischen Verbindung, wie bei der hier gemeinten Phosphoreszenz von organischen Verbindungen.

Im Unterschied zur Fluoreszenz entspricht die Phosphoreszenz dem quantenmechanisch verbotenen Übergang (zwischen zwei Zuständen unterschiedlicher Spinmultiplizität) $T_1 \rightarrow S_0$. Die Geschwindigkeit des Phosphoreszenzvorgangs ist im Vergleich zu Fluoreszenz relativ stark verringert [189]. Deshalb ist die Phosphoreszenz mit dem menschlichen Auge als ein *Nachleuchten* der mit Licht passender Wellenlänge bestrahlten Substanz bzw. eines Materials, das den ent-

⁷⁶ In einigen Fällen können die in wässrigen oder alkoholischen Lösungen nichtfluoreszierenden Substanzen durch die Adsorption an feste Stoffe wie Baumwolle oder durch die Auflösung in einer Feststoffmatrix, z. B. aus Borax oder Gelatine, zur Lichtemission angeregt werden [189, 172].

⁷⁷ Das durch eine chemische Reaktion induzierte Leuchten einer Probe bzw. Substanz wird als *Chemolumineszenz* bezeichnet.

sprechenden Farbstoff enthält, wahrzunehmen (s. Kap. 2.3.3.3.1, Abb. 24). Das emittierte Licht ist aufgrund des (im Jablonskidiagramm (s. Abb. 25)) vergleichsweise tiefer liegenden Energieniveaus des T_1 -Zustands und seiner daraus folgenden kleineren Energiedifferenz zum Grundzustand S_0 langwelliger, d. h. rotverschoben [192]. Die Unwahrscheinlichkeit der spontanen Desaktivierung des angeregten Moleküls im T_1 ohne weitere Anregungsenergie via S_1 , d. h. durch die Übergangsabfolge $T_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$ (s. 3. Verzögerte Fluoreszenz) ist begründet durch die in diesem Zustand tiefer liegenden Energieniveaus. Der vom S_1 -Zustand aus über ein spinverbotenes ISC erreichte T_1 -Zustand wird von dem angeregten Molekül unter Lichtemission verlassen [190]. Es erreicht durch Lichtemission seinen ursprünglichen Grundzustand S_0 , wobei, wie auch bei der Fluoreszenz, nach dem strahlenden Desaktivierungsvorgang ein Schwingungsniveau $v_0 > 0$ erreicht wurde und somit sehr häufig erst durch eine weitere SR der $S_0(v_0 = 0)$, d. h. der Zustand mit Nullpunktschwingung innerhalb des Grundzustands, eingenommen wird (s. Abb. 25) [183].

Wenn organische Verbindungen, die in der Lage sind zu phosphoreszieren, im festen Aggregatzustand bestrahlt werden, so sind die zwischenmolekularen strahlungslosen Desaktivierungsprozesse als Konkurrenz zur Phosphoreszenz bzw. der Lichtemission wegen der relativ langen Lebensdauer der Moleküle im angeregten Zustand und der dadurch sich ergebenden kleinen Emissionswahrscheinlichkeit bevorzugt [172]. Die absorbierte Energie wird einfach in Wärmeenergie umgewandelt und die feste Substanz erwärmt sich. Der längere Aufenthalt im angeregten Zustand T_1 begünstigt ebenfalls intermolekulare chemische Reaktionen viel mehr als im S_1 [189, 195]. Mit einer Trennung und Immobilisierung der Farbstoff-Moleküle durch die Einbettung dieser in einem festen Lösemittel bzw. einer erstarrten Mischschmelze⁷⁸, auch Feststoff-Matrix genannt, kann die dadurch entstehende strahlende Desaktivierungsmöglichkeit, Phosphoreszenz, die konkurrierenden Prozesse wie SREN oder chemische Reaktionen, auf diese Weise verhindern.⁷⁹ Gewöhnlich ist deshalb die Phosphoreszenz von festen Materialien und Gegenständen, in welche die Farbstoff-Moleküle integriert wurden, zu beobachten, und nicht das Nachleuchten von Flüssigkeiten [172]. Im Unterschied zur Fluoreszenz ist der quantenmechanische Vorgang bei der Phosphoreszenz temperaturabhängig [172]. Genauer gesagt ist der ISC-Übergang zwischen dem S_1 und dem T_1 -Zustand endotherm, sodass durch niedrigere Temperaturen der mit Lichtemission stattfindende T_1 - S_0 -Übergang begünstigt wird.⁸⁰ Demnach müsste bei niedrigeren

⁷⁸ Dazu können Mittel wie Borsäure, Weinsäure, Aluminiumhydrogensulfid oder auch Gelatine verwendet werden [172, 150, 195].

⁷⁹ Eine weitere Möglichkeit, um die Übergangshäufigkeit von dem $T_1 \rightarrow S_0$ -Übergang zu erhöhen, ist mit dem Schweratom-Effekt möglich. Wird ein normalerweise nicht-fluoreszierender Farbstoff in eine Schweratom-Lösung (äußerer Schweratom-Effekt) gegeben oder halogeniert (innerer Schweratom-Effekt), so kann dessen Phosphoreszenz hervorgerufen werden [8, 210].

⁸⁰ Durch äußere Faktoren, wie in diesem Fall durch die Temperatur, kann die jeweilige Geschwindigkeit der spinverbotenen T_x - S_y -Übergänge ($x, y \in \mathbb{N}$) beeinflusst werden. Dabei verändert sich die Kopplung der Spin- und Bahn-Bewegungen des angeregten Moleküls [159]. Dies ist bekannt unter dem Ausdruck *Spin-Bahn-Kopplung* (spin-orbit coupling SOC) [183].

Temperaturen, d. h. praktisch bei gekühlten Proben die Phosphoreszenz intensiver sein als bei Raumtemperatur [195]. In einer Matrix bei tiefen Temperaturen ist somit ein längeres Nachleuchten festzustellen [189].

3. Die *verzögerte bzw. verlangsamte Fluoreszenz* stellt mit steigender Temperatur der Feststoff-Matrix, in der die Farbstoff-Moleküle fixiert sind, eine Alternative zur Desaktivierungsmöglichkeit durch Phosphoreszenz dar: Wird davon ausgegangen, dass das Molekül nach einer Kaskade von Desaktivierungsschritten sich nun im T_1 -Zustand befindet, kann sie (– unter der Bedingung, dass die Moleküle eben in einer Feststoff-Matrix fixiert sind –) durch eine zusätzliche *thermische Aktivierung* (TA) und dem anschließenden ISC ($T_1 \rightarrow S_1$) wieder den S_1 -Zustand einnehmen (s. Abb. 25) [192]. Je höher die Temperatur, desto häufiger wird die Desaktivierung über die verzögerte Fluoreszenz ($T_1 \rightarrow S_1 \rightarrow S_0$) hervorgerufen. So kommt es zu einer Überlappung dieser mit der Phosphoreszenz. Die jeweiligen Anteile sind dabei temperaturspezifisch. Die abklingende bathochrome Lichtemission nach Beendigung der Bestrahlung ist nur noch die Phosphoreszenz [195].

2.3.3.3.2 Durch aggregationsinduzierte Emission

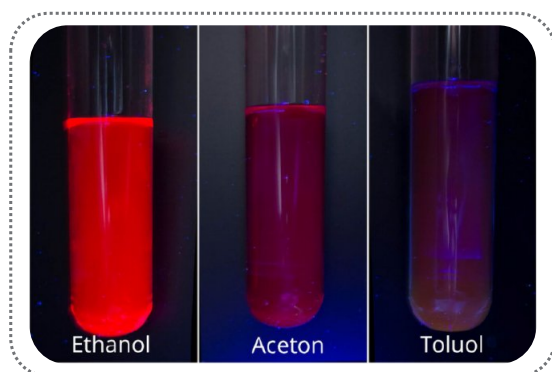


Abb. 29: Unterschiedliche Emissionsintensität von Merocyanin in drei verschiedenen Lösemitteln [215].

Einige Farbstoff-Moleküle zeigen Lichtemission erst durch ihre Anhäufung bzw. enge Zusammenlagerung, d. h. Aggregation. Dies wird als aggregationsinduzierte Emission (AIE) bezeichnet. Die Begründung dafür ist analog zu der von Phosphoreszenz und liegt in der Einschränkung der intermolekularen Bewegungsmöglichkeiten (Restriction of Intermolecular Motion; RIM) wie den Rotations- und Schwingungsbewegungen des Moleküls [211]. Eine Möglichkeit, die zur

AIE führt, soll hier am Beispiel von Merocyanin beschrieben werden. Merocyanin entsteht bei Bestrahlung einer Spiropyran-Lösung mit UV-Licht (s. Kap. 2.3.2.1). Geschieht dies in einem polaren Milieu wie z. B. in einer Ethylenglycol-Lösung, so zeigt Merocyanin rötliche Fluoreszenz. Je polarer die submikroskopische Umgebung der Merocyanin-Zwitterionen, desto intensiver ist die Fluoreszenz (s. Abb. 29). Durch die zwischenmolekularen Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den polaren Ethylenglycol-Molekülen mit den zwei Hydroxyd-Gruppen und den Merocyanin-Zwitterionen werden die Ladungen Letzterer stabilisiert (s. Abb. 30). Zusätzlich sorgt die zwitterionische Struktur dafür, dass beim Annähern der einzelnen Zwitterionen diese beim Bewegungsablauf wie Zahnräder so ineinandergreifen, dass sich eins in das andere fügt.⁸¹

Durch die sich auf diese Weise bildende mehrschichtige Anordnung von Merocyanin-Zwitterionen zu einer Art von Päckchen wird die Beweglichkeit so gehemmt, dass deren Desaktivierung über Lichtemission stattfindet (s. Abb. 30)

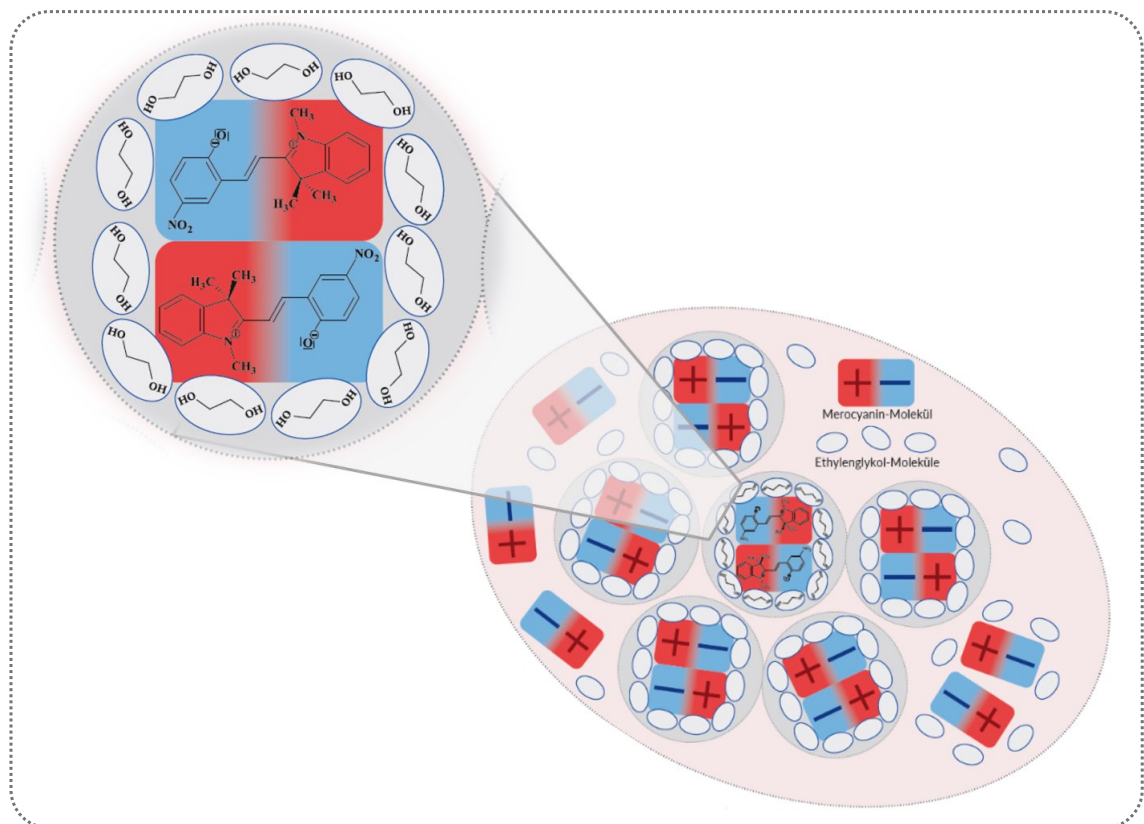


Abb. 30: Darstellung der Aggregation von Merocyanin-Zwitterionen gelöst in Ethylenglycol [215].

2.3.3.3.3 Durch Wärmeemission⁸²

Das durch die Lichtabsorption angeregte Teilchen kann diese aufgenommene Lichtenergie als Bewegungsenergie vollständig in Form von Wärme Δ wieder freisetzen.

Dieser Vorgang ist eine Art von strahlungsloser Desaktivierung [198, 216]. Didaktisch stark reduziert wird dieser Vorgang mit dem Hauptaugenmerk auf

⁸¹ Die parallel, d. h. head-to-head ausgerichtete Anordnung wird als J-Aggregat und die antiparallele (head-to-tail) als H-Aggregat bezeichnet [212, 213].

⁸² Hier wurde auf den Ausdruck „strahlungslose Desaktivierung“ verzichtet, obwohl häufig dieser für den Inhalt des vorliegenden Kapitels verwendet wird. Jedoch fallen sowohl Photoisomerisierung (s. Kap. 2.3.3.4) und lichtinduzierter Elektronentransfer (s. Kap. 2.3.3.5) als auch intermolekulare Desaktivierungsvorgänge wie IC und ISC (s. Kap. 2.3.3.2) laut Definition (s. Kap. 2.3.3.3) auch unter die strahlungslosen Desaktivierungsprozesse [183]. Letztlich unterscheidet sich auf der phänomenologischen Ebene die hier beschriebene strahlungslose Desaktivierung von den anderen Desaktivierungstypen hauptsächlich in der kompletten Umwandlung der absorbierten Lichtenergie in Wärme, bzw. wird der in Kap. 2.3.3.3.1 verwendete Ausdruck *strahlende Desaktivierung* bzw. Lichtemission unter phänomenologischen Gesichtspunkten betrachtet und als Pendant dazu die *Wärmeemission* gesehen. Deshalb wird zur Abgrenzung und zur Fokussierung auf den entscheidenden Unterschied diese Überschrift anstelle des Ausdrucks *strahlungslose Desaktivierung* gewählt.

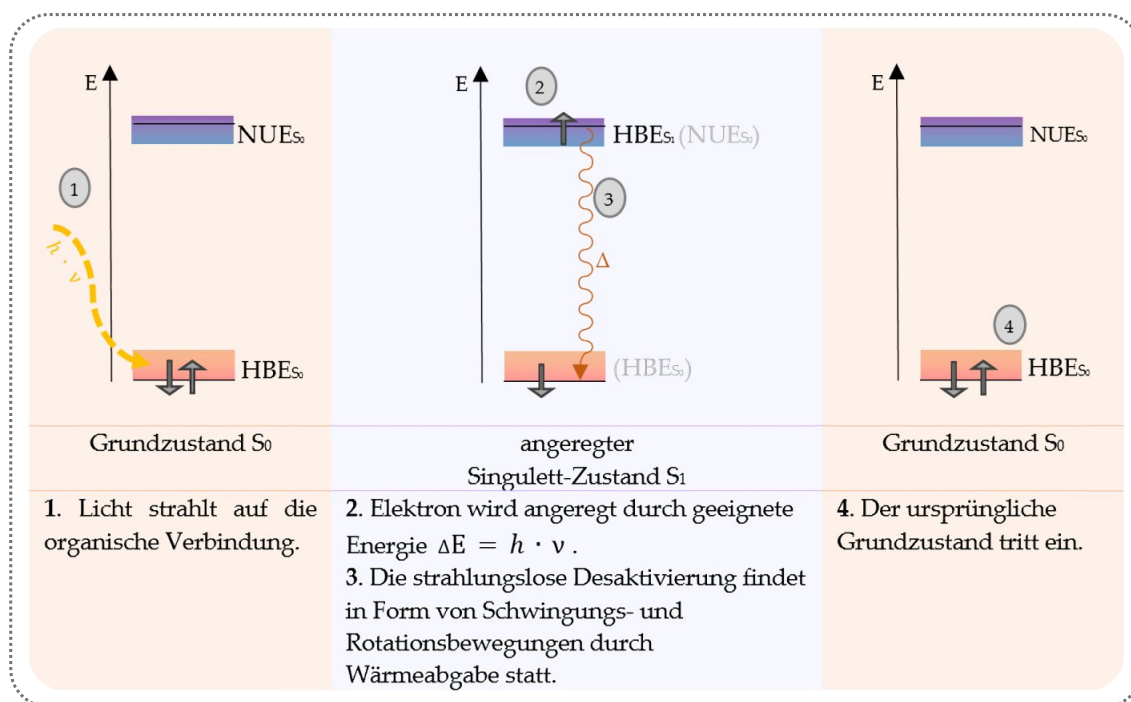


Abb. 31: Eine vereinfachte Darstellung der strahlungslosen Desaktivierung einer organischen Verbindung mithilfe des Energiestufen-Modells.

der Umwandlung der Lichtenergie in Wärmeenergie durch das im Chemieunterricht eingesetzte Energiestufen-Modell in Abb. 31 schematisch dargestellt.

Für den strahlungslosen Übergang von dem S_1 - oder dem T_1 -Zustand unter Wärmeabgabe wieder zurück in den Grundzustand S_0 sind auf submikroskopischer Ebene die (den Fluorophoren fehlenden) Rotations- und Schwingungsfreiheitsgrade der nicht-fluoreszierenden Farbstoff-Moleküle verantwortlich (s. Kap. 2.3.3.1). Je mehr Freiheitsgrade das Molekül besitzt, desto geringer ist bei Lichtabsorption die Wahrscheinlichkeit der Desaktivierung durch Lichtemission. Als ein Beispiel wird hier das stark bewegliche Farbstoffmolekül β -Carotin, welches sich unter anderem in Karotten oder Tomaten befindet, strukturell dargestellt (s. Abb. 32) [175]. Bei Molekülen, die somit keinen ausreichend großen Abstand zwischen der HBE und der NUE⁸³ besitzen, tritt die Möglichkeit der Wärmeemission durch Schwingungsrelaxationen ein (s. Abb. 32).

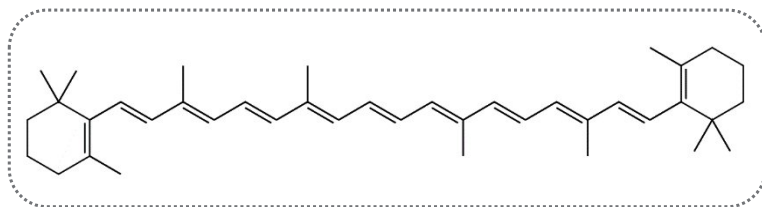


Abb. 32: Strukturformel eines β -Carotin-Moleküls.

Über zwei Wege ist dies quantenmechanisch möglich (s. Kap. 2.3.3.2, Abb. 22): Zum einen kann das Molekül vom T_1 -Zustand durch ein ISC zu einem der schwingungsangeregten S_0 ($v_0 > 0$)-Zustände übergehen, von diesem in den Schwingungsgrundzustand S_0 ($v_0 = 0$) relaxieren (SR) und dabei Wärme an die

⁸³ Die NUE wird während des lichtinduzierten angeregten Zustands zur HBE des Moleküls (s. Abb. 31).

Umgebung übertragen. Zum anderen kann das angeregte Teilchen direkt vom S_1 -Zustand unter Erhalt der Spinmultiplizität in den S_0 -Zustand wechseln, um anschließend durch thermische Schwingungsrelaxation bis zur Erreichung der Nullpunktschwingung den Rest der absorbierten Strahlungsenergie in Form von Wärme abzugeben. Es lässt sich experimentell nachweisen, dass die Geschwindigkeit des S_1 - S_0 -Übergangs via strahlungslose Desaktivierung durchschnittlich in ihrer Größenordnung mit der strahlenden Desaktivierung in etwa übereinstimmt [159].

2.3.3.3.4 Durch Photoisomerisierung

Beim Eingießen des heißen Kaffees kommt auf der Tasse langsam ein buntes Motiv o. ä. zum Vorschein: gemeint ist eine *thermochrome Tasse*, die vielen ein Begriff ist. Dabei wird durch den Einfluss der Wärme eine Farbänderung hervorgerufen. So spielt in diesem Zusammenhang die Wechselwirkung zwischen der Energieform Wärme und Farbe eine Rolle. Als ein lichtinduziertes Pendant dazu sollten auch selbsttönende Brillengläser unter Sonneneinstrahlung bekannt sein. Dahinter verbirgt sich im Gegensatz zu den thermochromen Tassen und im Hinblick auf die oben bereits Aufgeführten (s. Kap. 2.3.3.3.1 – 2.3.3.3.3) eine weitere Möglichkeit der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie. Kurz und knapp lässt sich diese Beobachtung als ein *photochromer*⁸⁴ Effekt beschreiben. Im Falle des Beispiels der photochromen Fenster kommt dieser Effekt durch die *Photoisomerisierung* der auf das Glas aufgetragenen Materialschicht aus organischen Verbindungen zustande [8, 217].

Im Folgenden sollen diese beiden Fachbegriffe geklärt werden. Zuerst wird der Begriff *Photoisomerisierung* kurz definiert, um daraufhin auf die mögliche, unter anderem auch für die photochemische Forschung interessante Folge davon, nämlich die *Photochromie* anhand der für die Arbeit (s. Kap. 4.1.1.1.2) relevanten organischen Verbindung Spiropyran einzugehen:

Die *Photoisomerisierung* beschreibt die lichtinduzierte intramolekulare Umwandlung einer Substanz A in ihr Isomer B, die meistens reversibel ist.⁸⁵ Da dieser Prozess unimolekular abläuft, werden Hindernisse wie Berücksichtigung der Stoßwahrscheinlichkeiten oder Diffusionsprobleme vermieden [101]. Somit sind günstige Voraussetzungen für die Desaktivierung des angeregten Zustands über Stoffumwandlungen gegeben, sodass die Photoisomerisierungen deshalb eine besondere Position in der Photochemie erlangt haben [101]. Moleküle können abhängig von ihrer Stoffklasse nach unterschiedlichen Mechanismen isomerisieren [8, 184]. Eine große Rolle spielen dabei die *E/Z-Isomerisierungen* (z. B. Derivate der Azoverbindungen), die *Tautomerisierung*, sowie *Valenzisomerisierungen* (z. B. der Spiropyrane), unter anderem aufgrund der dadurch erreichbaren photochromen Effekte, die auf unterschiedliche Weise

⁸⁴ phos (griech.) = Licht; chroma (griech.) = Farbe.

⁸⁵ Photoisomerie ist in der Literatur sehr häufig im Zusammenhang mit organischen Verbindungen zu finden, jedoch gibt es auch anorganische Komplexverbindungen, die photoisomerisieren können [218 – 220].

ihre Anwendung finden [8, 62, 212].⁸⁶

Der Fachbegriff Photochromie wurde zum ersten Mal im Jahr 1950 von HIRSHBERG definiert [224]:

„A reversible change of single chemical species between two states having distinguishable different absorption spectra, such change being induced at least in one direction by the action of electromagnetic radiation“ (nach [225]).

Wenn die photochrome Reaktion photoreversibel ist, dann folgt aus dieser Definition, dass die Umwandlung einer Verbindung von Zustand A in Zustand B und andersherum nicht mit Photonen gleicher Energie ($h\nu_1 > h\nu_2$) geschieht [8, 224, 226]. Dass zudem die beiden Spezies A und B unterschiedliches Absorptionsverhalten aufweisen (λ_1, λ_2)⁸⁷, ist ein weiteres Indiz dafür, dass es sich hierbei um zwei Verbindungen mit sowohl chemisch als auch physikalisch unterscheidbaren Eigenschaften handelt [8, 208]. Photochrome Prozesse lassen sich deshalb insgesamt mit der Gleichung (9) darstellen.



Zwar ist die spontane Reversibilität ein Zeichen dafür, dass eine der beiden Verbindungen thermodynamisch stabiler sein muss, jedoch hat ihr Isomer eine ausreichend messbare Stabilität [224]. Insbesondere diese Tatsache der Bistabilität der organischen Moleküle ist die Voraussetzung für eine effiziente Anwendbarkeit photochromer Prozesse in der Praxis (s. weiter unten). Generell lässt sich die Stabilität photochromer Systeme über die Anzahl der Farbumkehrungen ohne einen merklichen Verlust der Wirksamkeit messen [224].

Abgesehen von photochromen Gläsern, Fenstern, der Nutzung dieser Materialien in der Reklametechnik und zu dekorativen Zwecken [101, 213, 225] wird die mit Licht hoher Orts- und Zeitauflösung gezielt gesteuerte Bistabilität in zahlreichen Forschungsgruppen eingesetzt und optimiert, sodass sie in den Lebenswissenschaften ihren festen Platz haben [225]. Diese findet vor allem auch bei der *Miniaturisierung in Zukunftstechnologien*, z. B. in Schaltvorgängen entsprechender Größenordnung, seine Anwendung, da vor allem photoreversible Verbindungen die Basis molekularer Schalter bilden [212, 226]. Für die Schaltalgebra eines Computers mit binärer Logik und in der Informationstechnologie zur optischen Datenspeicherung werden in der Forschung somit die Grundlagen gelegt [227]. Ein gesondertes Interesse wird auch durch die Speicherdichte erweckt, die wegen des in photochromen Prozessen möglichen molekulardispersen Systems eine höhere Speicherdichte als elektrische oder magnetische Speicher aufweist – und tatsächlich ist die Geschwindigkeit des Ein- und Ausschaltens durch Lichtimpulse

⁸⁶ Meistens handelt es sich bei den letzteren Reaktionstypen um pericyclische Ringreaktionen, hauptsächlich electrocyclischer oder sigmatroper Art, bei denen insbesondere Ringöffnungen, -schlüsse, -verengungen oder -erweiterungen stattfinden [221 – 223].

⁸⁷ Die Absorptionsmaxima unterscheiden sich meistens um ca. 40 nm. Besonders zweckdienlich sind in der praktischen Anwendung photochrome Prozesse, bei denen A und B eine Differenz im Absorptionsmaximum von bis zu 150 – 200 nm aufweisen [101].

höher als durch elektrische Impulse [101, 227]. Zudem scheint besonders der Bereich der medizinischen Chemie von der Photochromie bzw. den Photoschaltern zu profitieren. Mit dafür passend synthetisierten molekularen Schaltern findet sie Einsatz in der Photopharmakologie oder auch als intelligentes Kontrastmittel in der Kernspintomographie [228, 229]. Nicht zuletzt ist die Photochromie, insbesondere die durch Photoisomerisierung, schon seit jeher in zahlreichen natürlichen bzw. biologischen Vorgängen wie beispielsweise bei der Photosynthese oder beim Sehvorgang im Auge vertreten [230, 231].

Auf unterschiedlichen Wegen wird der photochrome Effekt chemisch erreicht [213]: Photochromie kann durch die oben erwähnten Reaktionstypen der Isomerisierungen hervorgerufen werden, zumal die meisten der photochromen Reaktionen, wie auch alle Isomerisierungen, unimolekular ablaufen [8]. D. h.: Alle reversiblen Photoisomerisierungen, die einen Farbwechsel bzw. die Änderung des Absorptionsbereichs des Reaktionssystems hervorrufen, sind stets photochrome Prozesse. Da die Definition später von HIRSHBERG und FISCHER erweitert wurde, sind aktuell auch bimolekulare Prozesse inbegriffen [227]. Diese können nach den Mechanismen der lichtinduzierten Dimerisierungen, der Photocycloadditionen oder ebenfalls über homolytische und heterolytische Bindungsspaltungen ablaufen [8, 208, 224].

Zur besseren Vorstellung der Beziehung zwischen den beiden Fachbegriffen sollen die markanten Charakteristika auf phänomenologischer Ebene mit einem Mengendiagramm verdeutlicht werden:

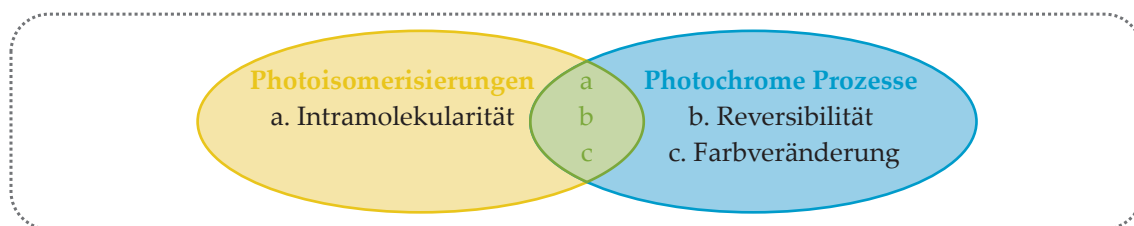


Abb. 33: Venn-Diagramm zu den Charakteristika von Photoisomerisierungen und photochromen Prozessen.

Sobald alle drei Charakteristika a, b und c bei einem chemischen Prozess eintreten, handelt es sich um eine *Photochromie durch Photoisomerisierung*.

Die Photoisomerisierung als Mechanismus bzw. Reaktionstyp gewinnt durch ihre Folgeerscheinung, das Phänomen der Photochromie, an Bedeutung, sodass in der präparativen Chemie beim Synthetisieren neuer photochromer Verbindungen (z. B. mit höherer Bistabilität) insbesondere auch der Mechanismus in Betracht gezogen werden muss [213, 224, 227].

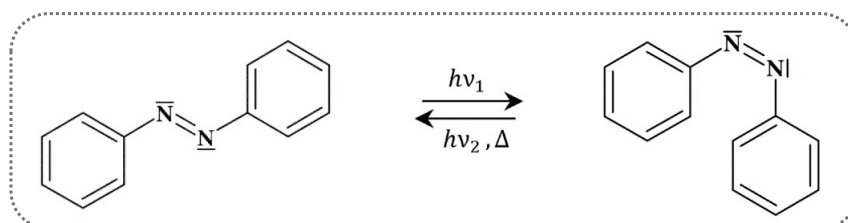


Abb. 34: Photochrome (E)/(Z)-Photoisomerisierung der Azoverbindung (E)-Azobenzol zu (Z)-Azobenzol.

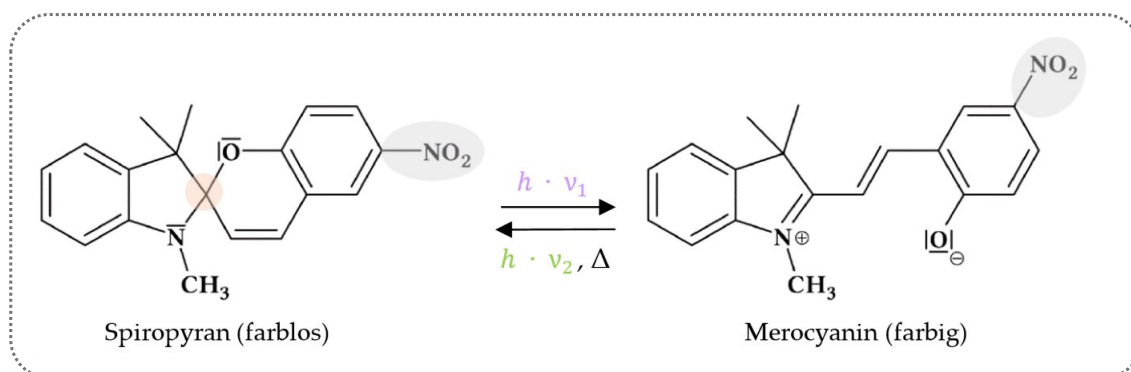


Abb. 35: Photochrome Photoisomerisierung des (mit einer Nitro-Gruppe (grau markiert) substituierten) Derivats von Spiropyran zu Merocyanin.

Zu den meist erforschten und bekanntesten photochromen organischen Stoffklassen⁸⁸ zählt neben den Azoverbindungen (s. Abb. 34) auch die Familie der Spiropyrane, da sie ebenfalls unter anderem ein 6π -System aufweisen und somit für die Photochromie interessant sind (s. Abb. 35) [8, 226, 232]. Mit Letzteren arbeiteten bereits HIRSHBERG, FISCHER und WEIZMANN in den 1950ern bei der Untersuchung photochromer Effekte [213, 227].

Generell besitzen alle Spiropyranverbindungen ein sp^3 -hybridisiertes, tetraedrisches Kohlenstoffatom (Spirozentrum) (s. Abb. 35, orangefarbene Markierung), welches das delokalisierte π -Elektronensystem unterbricht, sodass sie keine elektromagnetische Strahlung im VIS-Bereich absorbieren, sondern UV-Licht bei $\lambda = 300 - 400$ nm (s. Abb. 36) [179, 233, 234]. So ist die ringgeschlossene Form der Spiropyrane generell farblos (bis leicht hellgelb) [231]. Über einen unimolekularen photoelektrocyclischen Reaktionsmechanismus wird das Spiropyran in sein Valenzisomer⁸⁹ Merocyanin umgewandelt [208]. Die Merocyanin-Form ist aufgrund der Ringöffnung via heterolytische Spaltung der C-O-Bindung nicht orthogonal verdreht wie die Spiropyran-Form, sodass der dadurch entstandene und nun über das gesamte System ausgebreitete Chromophor aus mehreren konjugierten Bindungen für den Absorptionsbereich im sichtbaren Strahlungsbereich sorgt, der für die Merocyanin-Form bei ca. $\lambda = 500 - 600$ nm liegt (s. Abb. 36) [212, 231, 235]. Die ringoffene Merocyanin-Form lässt sich sowohl photochemisch als auch thermisch in ihr ringgeschlossenes thermodynamisch stabileres Isomer Spiropyran umwandeln [101, 232]. Da im Falle der Spiropyranverbindungen die thermodynamisch instabilere Spezies B farbig ist und zudem $\lambda_{\max}(A) > \lambda_{\max}(B)$ gilt, handelt es sich hierbei um ein Beispiel für die negative oder inverse Photochromie [226].⁹⁰

⁸⁸ Die Photochromie kann (auch ausgehend von der Photoisomerisierung) sowohl von organischen wie auch anorganischen Verbindungen hervorgerufen werden [224]. Bei den photochromen Gläsern (s.o.) ist die grau-braune Farbentwicklung (neben Spiropyranen, Spirooxazinen und Spirodihydroindolizinen) [226] meistens zurückzuführen auf die bei der Lichtabsorption aus den Silberhalogenid-Mikrokristallen entstehenden Silber-Atome zurückzuführen [231]. Der Fokus liegt hier auf organischen Verbindungen.

⁸⁹ Werden bei einer Isomerisierung die π - bzw. die π - und σ -Bindungen umgeordnet, so ist das Produkt ein Valenzisomer, und der Vorgang kann als Valenzisomerisierung bezeichnet werden [101, 221].

⁹⁰ Ist die thermodynamisch stabilere Form farbig, so wird von positiver Photochromie gesprochen.

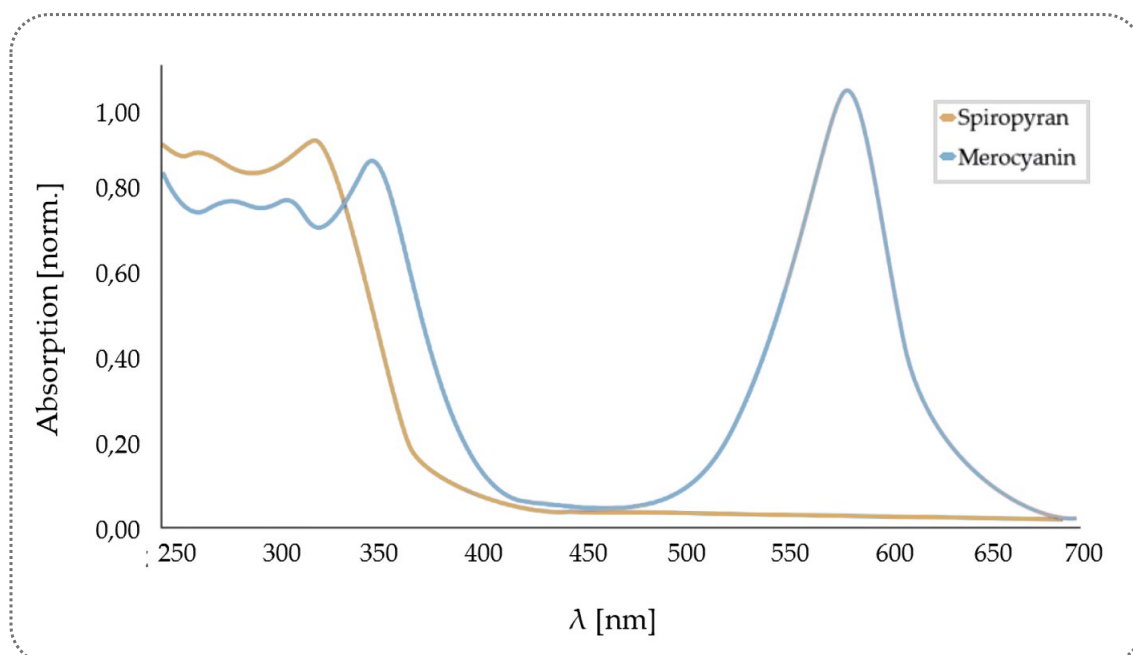
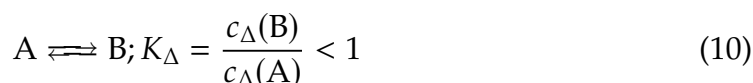


Abb. 36: Absorptionsspektren von Spiropyran und Merocyanin in Toluol (graphische Auswertung aus [179]).

Das eine Nitro-Gruppe besitzende Derivat des Spiropyrans, *1,3,3-Tri-methylindolino-6'-nitrobenzopyrilospiran* (im Weiteren nur noch *Spiropyran*) (s. Abb. 35), ist ein typisches Beispiel für eine Verbindung, die durch Photoisomerisierung photochrome Effekte hervorbringt (s. Abb. 36) [159, 234]. Anhand dieses unimolekularen photochromen Systems des Spiropyran-Derivats soll der Mechanismus der Photoisomerisierung folglich mit Fokus auf seine Energetik näher erläutert werden: Wegen einer relativ hohen Energiebarriere für die Umlagerung von Spiropyran (A) zu seinem Isomer Merocyanin (B) liegt im thermodynamischen Gleichgewicht fast ausschließlich A vor, sodass die Gleichgewichtskonstante K_{Δ} dementsprechend kleiner 1 ist [101].



A ist thermodynamisch stabiler als B. So wird erst über die Bestrahlung von A mit UV-Licht B gebildet. Hierbei verläuft die photoinduzierte Isomerisierung über ein gemeinsames Zwischenprodukt bzw. einen Transienten X, welcher eine offenkettige (Z)-Form darstellt (s. Abb. 37) [8, 226].⁹¹ Sobald das Spiropyran-Molekül ein Photon geeigneter Energie absorbiert, erreicht es den angeregten Singulett-

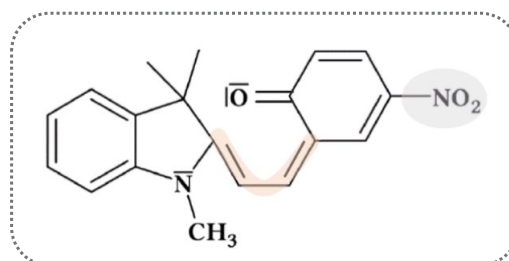


Abb. 37: Molekülstruktur von der offenkettigen (Z)-Form des Merocyanins.

⁹¹ Ein gemeinsamer Übergangszustand ist nicht in allen Fällen der Photoisomerisierung zwingend nötig, denn die Umwandlung kann auch über zwei voneinander unabhängigen Zwischenprodukten verlaufen [101]. Da dieser Übergangszustand X jedoch kurzlebig ist, kann sie nicht isoliert werden [226, 179].

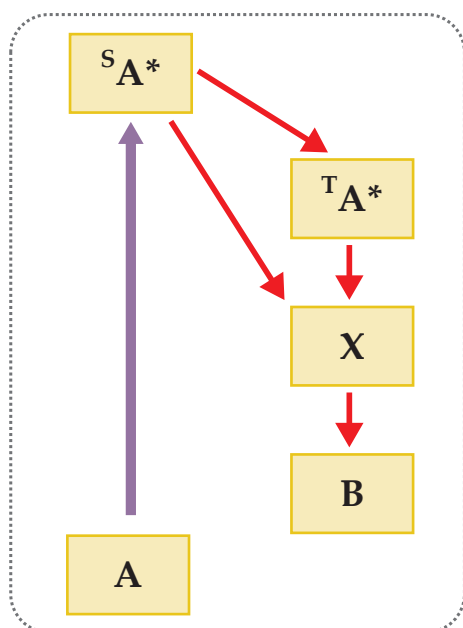


Abb. 38: Schematisch vereinfachte Darstellung der möglichen Wege für $A \rightarrow B$ nach [8] (s. auch [98, 223]).

angeregten A^* -Zustandes in den energetisch ungünstigen Übergangszustand im Grundzustand, sodass das nun ebenfalls via Änderung der Kernpositionen gebildete X instabil und dadurch relativ kurzlebig ist [226]. Anschließend kann X in die offenkettige, langlebigere B -Form übergehen.⁹³ Die geringe thermische Stabilität von B führt dazu, dass es thermisch spontan wieder zu A isomerisiert. Unter kontinuierlicher Bestrahlung mit UV-Licht erreicht die "Hin- und die Rückisomerisierung" einen Zustand konstanter und gleicher Isomerisierungsrate in beide Richtungen. Dieses durch Licht induzierte Gleichgewicht in einem chemischen System wird auch als photostationäres Gleichgewicht (photo-stationary state, ps) bezeichnet [8, 236]. Wie auch beim thermodynamischen Gleichgewicht sind die Konzentrationen der Spezies A und B zeitlich konstant. Da gilt

$$c_{\text{ps}}(A) < c_{\text{ps}}(B) \quad (11)$$

bestimmt der B -Anteil die Farbe der Lösung, in der die Spezies gelöst vorliegen.⁹⁴ Aufgrund dessen steht die "photostationäre Gleichgewichtskonstante" K_{hv} in folgendem Verhältnis:

$$K_{\text{hv}} > K_{\Delta} \quad (12)$$

⁹² Laut Literatur wird dennoch in ca. 90% der Fälle die Merocyanin-Form via X aus dem Singulett-Zustand der Spiropyran-Form $^1A^*$ gebildet [232].

⁹³ Sowohl $X \rightarrow B$ als auch $X \rightarrow A$ sind mögliche Wege für X in einen stabileren Grundzustand [24]. Nur Ersterer wird hier betrachtet.

⁹⁴ In der Arbeit wird das fachliche Wissen zur Photoisomerisierung von Spiropyran in Lösung relevant. Auch in festen Matrices ist dies jedoch möglich [235, 237, 224].

Zustand ($^S A^*$). Der weitere Verlauf ist abhängig vom Substituenten des Spiropyran-Derivaten. In dem Fall des Nitro-Derivats (s. Abb. 35) [231] kann die Isomerisierung relativ häufig über den angeregten Triplett-Zustand des Spiropyran-Moleküls ($^T A^*$) ablaufen [8].⁹² In Abb. 38 sind die beiden möglichen Wege für $A \rightarrow B$ schematisch vereinfacht nach [8] dargestellt (s. auch [101, 232]). Im elektronisch angeregten Zustand desaktiviert die angeregte Spiropyran-Form (A^*) (unabhängig von der Spinmultiplizität) über die Modifikation der Elektronenkonfiguration und die damit einhergehende unmittelbare Anpassung der Bindungsverhältnisse und Kernpositionen im Molekül in das energieärmste Niveau des angeregten Zustands (X^*) (s. Abb. 39). Das A^* relaxiert aus dem Energieminimum des

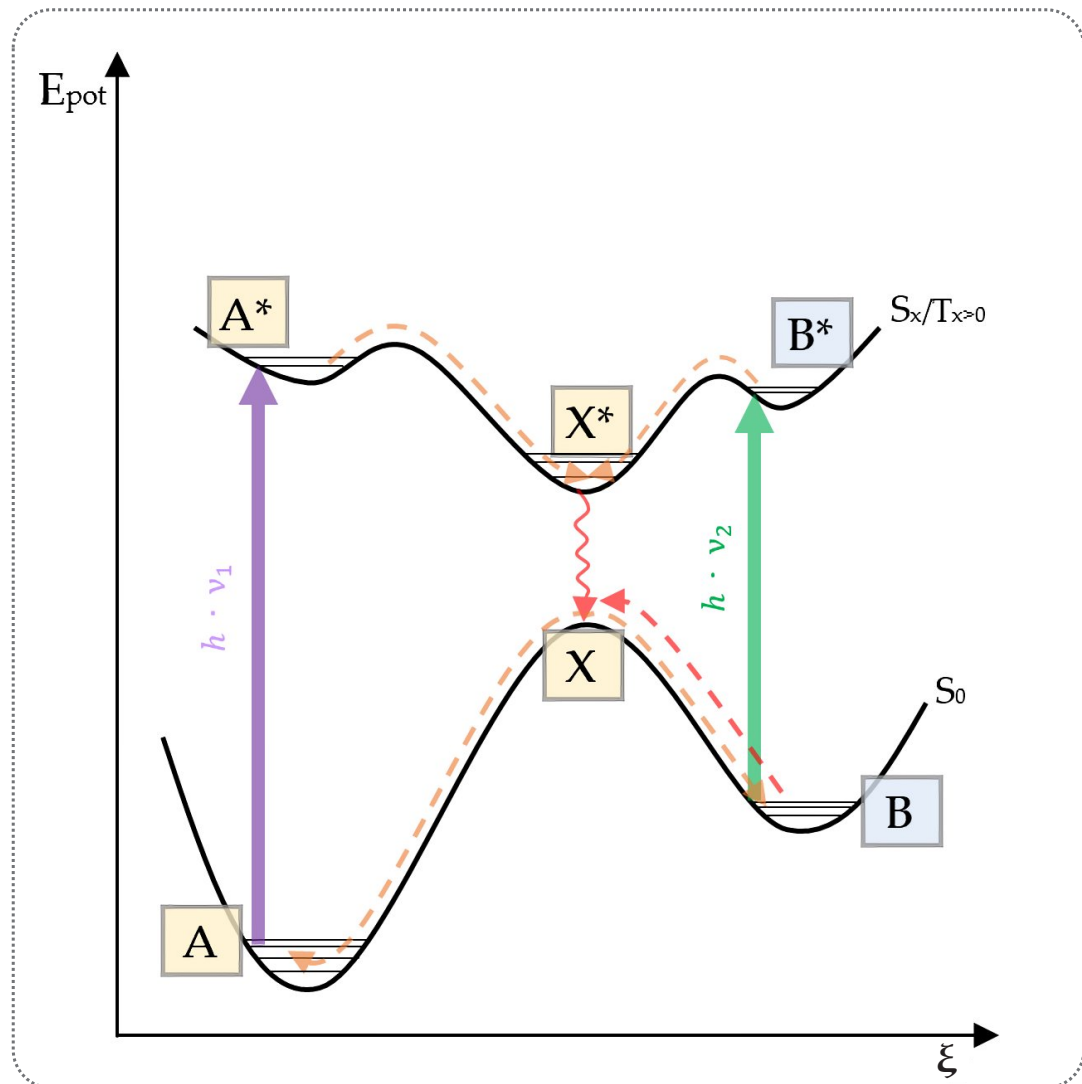


Abb. 39: Potenzialenergiehyperflächen des S_0 und $S_x/T_{x>0}$ für A, X und B [8, 238] (ξ wobei ξ für die $3 \cdot 42 - 6$ Freiheitsgrade bzw. Dimensionen des Hyperraums der $n = 42$ Atome des Spiropyran-Moleküls A steht).

Sobald die Bestrahlung bzw. die Lichtabsorption von A jedoch unterbrochen wird, ist auch der Zyklus $A \rightarrow A^* \rightarrow X^* \rightarrow X \rightarrow B \rightarrow A$ aufgehoben, sodass das thermodynamische Gleichgewicht in Abwesenheit von Lichteinfluss sich im System wieder einstellt und daher die Lösung erneut farblos bis hellgelb erscheint, da nun das thermodynamisch stabilere Isomer maßgeblich vorliegt [238]. Wie auch in Abb. 35 zu sehen ist, kann B neben thermischer Umwandlung zusätzlich durch grünes Licht ($h \cdot \nu_2$) photochemisch via $B \rightarrow B^* \rightarrow X^* \rightarrow X$ zu A umgewandelt werden.⁹⁵

Der Grund dafür, dass einige photochrome Systeme ohne Optimierungen keine direkte Anwendung in der Praxis finden, ist, dass die farbige Spezies für den Einsatz in Materialien eine zu kurze Lebensdauer hat und thermisch relativ instabil ist [224]. Dabei ist ein Maß für Stabilität des photochromen Systems die *Zyklenzahl* [224, 226]. Durch den Einfluss von Licht

⁹⁵ Da diese Art von Photoisomerisierung auch thermisch beeinflussbar ist, wird bei Untersuchungen die thermische Reaktion durch Tieftemperaturtechniken eingefroren, um beispielsweise die photochemische Komponente näher zu erforschen [101].

und Wärme können die Molekül-Formen Spiropyran und Merocyanin nach und nach zerstört werden, was sich folglich auf die Zyklenzahl auswirkt [101]. Deshalb werden in der Forschung die Wege zur Stabilitätssteigerung untersucht und erprobt. Da bei Verbindungen wie Spiropyran, die negativ photochrom sind, die Konzentration der farbigen Spezies stark von der Temperatur abhängt,

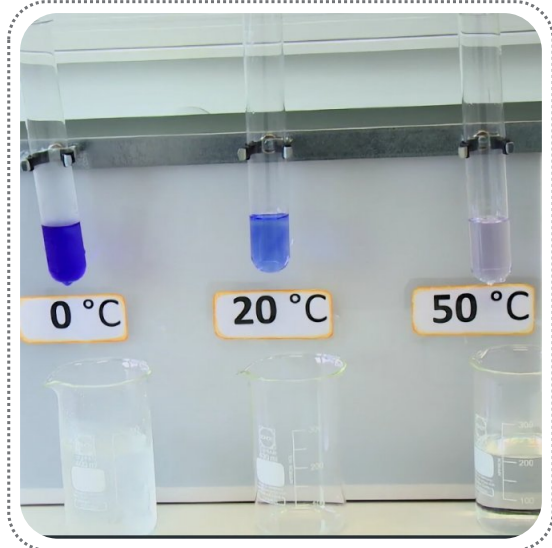


Abb. 40: Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts in der Toluollösung nach Abbruch der Bestrahlung bei drei unterschiedlichen Temperaturen.

kann in solchen Fällen dieser Faktor näher betrachtet werden [213, 239]. Die Auswirkung der Temperaturerniedrigung zeigt sich auf phänomenologischer Ebene so, dass nach Abbruch der Bestrahlung (bis wieder K_{Δ} gilt) die Farbe des Merocyanins in der Lösung länger zu beobachten ist (s. Abb. 40) [240].

Ein weiterer Faktor, der die Stabilität des photochromen Systems $^1A^*$ erhöhen und damit die Wahrscheinlichkeit der evtl. gewünschten intermolekularen Reaktionen mit weiteren Verbindungen ermöglichen würde, stellen die Seitengruppen bzw. Substituenten der Spiropyrane, die hier als Triplett-Sensibilisatoren dienen können, dar [232] (s.o., s. auch Kap.

2.3.3.3.1, Phosphoreszenz). Deren Art und Stellung kann entscheidend für die Dauer der Rückisomerisierung $B \rightarrow A$ sein [8]. Durch die Einführung einer Nitro-Gruppe wie im Fall A (s. Abb. 35) wird die Basisstruktur des Spiropyrans so modifiziert, dass unter bestimmten Bedingungen die Lebensdauer von Minuten bis zu Stunden verlängert werden kann [213]. Die Nitro-Gruppe hat durch den $-I$ - und M -Effekt eine elektronenziehende Wirkung, sodass die negative Partiaalladung im Phenolring delokalisiert und dadurch die zwitterionische Merocyanin-Form stabilisiert wird.

Auch die Polarität des verwendeten Lösemittels beeinflusst maßgeblich das photochrome Verhalten [212, 224, 241]. So ist die zwitterionische Merocyanin-Form in einer Umgebung aus polaren Lösemittel-Molekülen thermisch stabiler, da aufgrund der para-Stellung des Phenolat-Sauerstoff-Atoms und der NO_2 -Gruppe zueinander ein push-pull-System vorhanden ist und somit bevorzugt die zwitterionische Grenzstruktur von Merocyanin entsteht (s. Kap. 2.3.2.1, Abb. 19). Dieser Aspekt ist auch ein Auslöser für die aggregationsinduzierte Emission von Lichtenergie (s. Kap. 2.3.3.3.2). Zudem ist die Photochromie von Spiropyran solvatochrom (s. Kap. 2.3.2.1) [242].

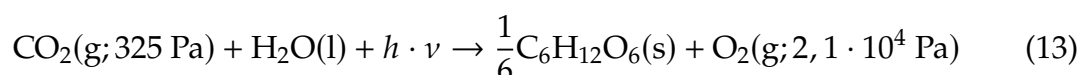
2.3.3.3.5 Durch Elektronentransfer

„Nachahmung ist die aufrichtigste Form der Schmeichelei.“ [243]

— C. C. COLTON

In den Kapiteln zuvor wurden bisher nur unimolekulare Desaktivierungsprozesse vorgestellt. Bei dem *photoinduzierten Elektronentransfer* (PET) handelt es sich um einen *bimolekularen Desaktivierungsmechanismus* [198], welcher in der Literatur auch als *Anregungslöschung* oder *Quenching* bezeichnet wird [8, 194, 198]. Aus üblichen chemischen Redoxreaktionen ist der Begriff Elektronenübertragung bzw. Elektronentransfer bekannt. Jedoch gibt es zudem noch Redoxreaktionen, die nur unter Lichteinfluss ablaufen [194]. Anhand des sogenannten PET, somit einer weiteren Desaktivierungsmöglichkeit, ist zu erkennen, dass der angeregte Zustand eines Moleküls zu sehr viel mehr fähig ist, als bisher ausführlich dargestellt (Photolumineszenz, Photoisomerisierung etc., vgl. Kap. 2.3.3.3.1 – 2.3.3.3.4). Für das Zustandekommen eines Elektronentransfers sind stets die jeweiligen Redoxpotenziale der an dem Vorgang teilnehmenden Substanzen entscheidend. Einige Redoxreaktionen, die aufgrund der entsprechenden Redoxpotenziale im Grundzustand nicht ablaufen, viel mehr verboten sind, werden durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung passender Energie möglich [172, 208] (Abb. 43; Abb. 45). D.h.: Die Folge des sich durch Lichtabsorption verändernden Redoxpotenzials im angeregten Zustand im Vergleich zum Grundzustand einer bestimmten organischen Verbindung⁹⁶ kann (im Unterschied zum *Energietransfer* in anderen Desaktivierungsprozessen) sogar eine *Elektronentransferreaktion* bzw. Redoxreaktionen auslösen [8, 194, 198]. Beispiele zum Prinzip der PET finden sich in den Bereichen der Photoelektrochemie bzw. der Photovoltaik und der photoinduzierten Galvanochemie oder ebenfalls in photokatalytischen Vorgängen [169, 246, 248, 249].

In der Natur findet PET seit jeher statt. Das wichtigste und bekannteste Beispiel hierfür ist die lichtinduzierte Übertragung von Elektronen in dem Prozess der *Photosynthese*. Sie stellt ein unfassbar komplexes lichtgetriebenes System dar, in dem die Lichtenergie eine essentielle Quelle der im System gespeicherten Energie (z. B. in Form von Glucose) ist, welche durch die darin stattfindende Energieumwandlung und durch *Elektronentransportketten* permanent entsteht [183, 250]. Die endergonische Gesamtreaktionsgleichung lautet dabei [8, 183, 246]:



$$\Delta G^0 = 496 \text{ kJ pro Mol CO}_2 \text{ (298 K)} \quad (14)$$

⁹⁶ Beispielsweise werden in der Photovoltaik bei heterogenen Systemen auch Feststoffpartikel aus Halbleiter-Materialien wie z. B. Titandioxid (TiO₂), Silizium (Si) oder Cadmiumsulfid (CdS) als Photokatalysatoren verwendet [244 – 247]. Da für die vorliegende Arbeit organische Verbindungen von Relevanz sind, liegt der Fokus auf diesen.

Drei aneinandergeschaltete photochemische Teilprozesse finden grundsätzlich direkt in dem photosynthetischen Reaktionszentrum, d. h. dem Photosyntheseapparat statt [8, 246, 247]: Zum einen werden zur Sammlung von Energie bzw. Photonen geeigneter Wellenlänge über Farbstoffmoleküle als *Lichtantennenpigmente* bzw. die Chromophore dieser Moleküle *Singulett-Singulett-Energietransfers* durchgeführt. Zum anderen ergeben sich zur Verhinderung von nicht relevanten Nebenreaktionen *Triplet-Triplett-Energieübertragungen*. Neben diesen beiden Vorgängen ist das wohl ausschlaggebende "Zahnrad" im System die dort stattfindende Ladungstrennung bzw. der Elektronentransfer in den Photosystemen I und II, sodass das somit vorhandene Reduktionspotenzial im Endeffekt zur Stoffumwandlung führt. Dabei ist die Quantenausbeute im Photosyntheseapparat von näherungsweise 100 % beeindruckend [183, 250]. Abgesehen von der Tatsache, dass auf dem synthetischen Weg bis dato nicht erreicht wurde, die gesamte außerordentlich komplexe Prozesskette der Photosynthese nachzubilden, gibt es dennoch viele Versuche in der Forschung, die *Primärprozesse* der Photosynthese, nämlich ihre Energieumwandlung und -speicherung, chemisch nachzubilden [183, 247, 250]. DAU et al. stellen *vier Schlüsselprozesse* vor, die, um eine künstliche Photosynthese als *Modellsystem* zu entwickeln, als Bedingungen von diesem analog erfüllt werden müssten [247]:

1. Lichtabsorption im VIS-Bereich
2. Ladungstrennung durch Elektronentransfer
3. Wasserphotolyse bzw. Wasserspaltung
4. CO₂-Reduktion

Mittlerweile gibt es eine – angesichts der Komplexität der natürlichen Photosynthese sehr triviale – künstliche *Nachahmung* der Photosynthese, die aus drei Komponenten bzw. Substanzen jeweils folgender Funktionen besteht [183, 246, 250]: Chromophor bzw. *Photokatalysator* (PK), *Elektronendonator* (D) und *Elektronenakzeptor* (A). Um wie bei der natürlichen Photosynthese, als biologisches Vorbild, Lichtenergie in chemische umzuwandeln und diese anschließend in Form von chemischer Energie speichern zu können, sind auch in dem Modell geeignete Photokatalysatoren als Brücke zwischen der Lichtenergie und dem System aus den drei Komponenten nötig [251]. D. h.: Erst durch die Photokatalysatormoleküle, die als Lichtantennen für das System dienen und somit für die nötige Energie bzw. Energieform sorgen, kann der Elektronentransfer überhaupt stattfinden [97, 252]. Definiert wird der Fachbegriff *Photokatalysator* von der IUPAC wie folgt [182]:

„Catalyst able to produce, upon absorption of light, chemical transformations of the reaction partners. The excited state of the photocatalyst repeatedly interacts with the reaction partners forming reaction intermediates and regenerates itself after each cycle of such interactions.“

D. h.: Der Photokatalysator muss für jeden folgenden Zyklus im System regeneriert werden.⁹⁷ Für bimolekulare Reaktionen sind Verbindungen nötig, die den angeregten T_x -Zustand erreichen können, da dieser aufgrund der längeren Lebensdauer als in den angeregten S_x -Zuständen zur chemischen Reaktion befähigt ist (s. Kap. 2.3.3.3.1) [172, 216]. Dazu gehören Farbstoffmoleküle wie Carotinoide, Chlorophyll-Derivate, Porphyrine oder auch Flavine [8, 246, 247]. In den sogenannten *Drei-Komponenten-Systemen* [183] werden beispielsweise Viologene als Elektronenakzeptoren eingesetzt. Im Vergleich zu den unimolekularen Reaktionstypen im Zusammenhang mit der Photochromie (s. Kap. 2.3.3.3.4) wird das photochrome Verhalten dieser Farbstoffe erst durch den intermolekularen Elektronentransfer zum Vorschein gebracht [8, 226]. Beispielsweise wurde im Zusammenhang mit photokatalytischen Redoxreaktionen besonders oft zu 1,1'-Dimethyl-4,4'-bipyridinium dichlorid (Methylviologen, MV^{2+}) publiziert [8, 208, 254, 255]. Als Elektronendonatoren werden in mehrmals untersuchten Systemen Substanzen wie das Etylendiamintetraessigsäure Dinatriumsalz (EDTA), Triethylamin oder Triethanolamin verwendet [8, 254, 256, 257], welche in der Regel irreversibel weiterreagieren können [8, 253].

Zwar ist die Anregungsreaktion bei allen photokatalytischen Elektronentransferreaktionen stets gleich (s. Abb. 41), jedoch wird zwischen zwei Arten von Quenching-Mechanismen unterschieden [172]: Die Redoxpotenziale können bereits thermodynamisch bestimmen, ob das Quenching *oxidativ* oder *reduktiv* verläuft (s. Abb. 41) [8, 172, 258 – 260]. Demnach ist der Quencher (Q) entweder ein Elektronenakzeptor oder Elektronendonator. Dementsprechend findet stets folgende Redoxreaktion statt:

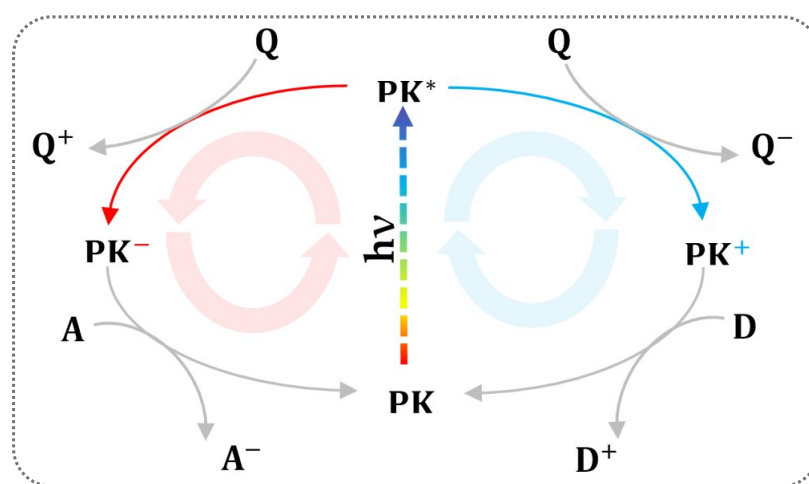
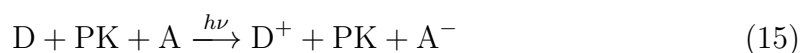


Abb. 41: Photokatalytischer Elektronentransfer via reduktivem (rot) und oxidativem (blau) Quenchingzyklus (nach [260]).

⁹⁷ Ein Photokatalysator ist funktionell zu unterscheiden von einem Photosensibilisator: „The process by which a photochemical or photophysical alteration occurs in one molecular entity as a result of initial absorption of radiation by another molecular entity [is] called a photosensitizer. In mechanistic photochemistry the term is limited to cases in which the photosensitizer is not consumed in the reaction“ [182]. Photosensibilisierte Reaktionen sowie auch Kettenreaktionen, wie z. B. radikalische Substitutionen gehören definitionsgemäß somit nicht zu photokatalytischen Prozessen [245, 253].

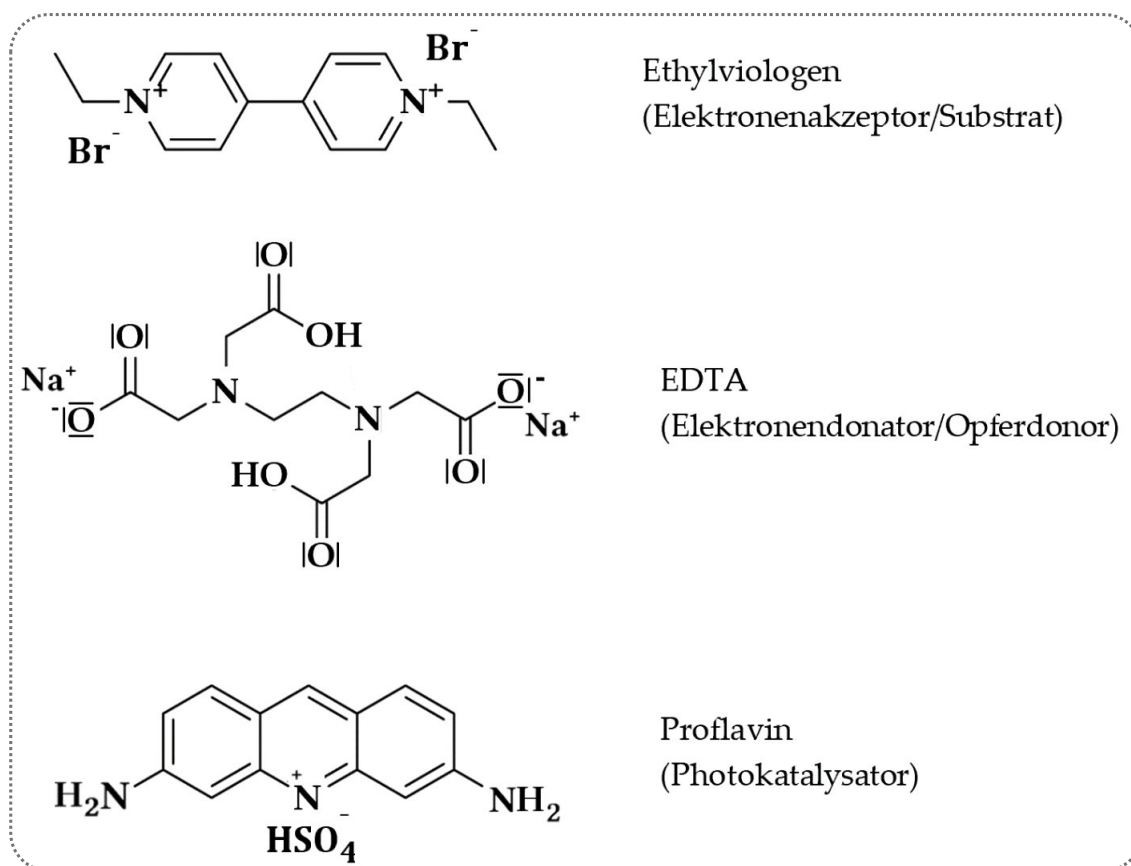


Abb. 42: Die drei Chemikalien Ethylviologen, EDTA und Proflavin werden zur Herstellung der PBB-Lösung in Wasser gelöst.

Daneben ist auch die Konzentration des zu oxidierenden oder reduzierenden Substrats via Photokatalysator entscheidend [261, 262].

Anhand eines für die vorliegende Arbeit relevanten einfachen Systems aus den drei Komponenten 3,6-Diaminoacridin hemisulfat (Proflavin-Monokation, PF^+), EDTA (bzw. D) und 1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridinium dibromid (Ethylviologen-Dikation, EV^{2+}) (s. Abb. 42) werden im Folgenden die Vorgänge im Hinblick auf die Elektronentransfer-Photoredoxreaktion [8] via oxidativem Quenching fokussiert (s. Abb. 41) [251, 253, 262]. Da alle beteiligten Substanzen in der gleichen Phase vorliegen, hier in einer Lösung, handelt es sich um ein *homogenes photokatalytisches System* [251].⁹⁸ Aufgrund der blauen Farbe dieser Lösung nach der Bestrahlung gab TAUSCH dieser den Namen Photo-Blue-Bottle (PBB)⁹⁹. 1994 wurde zu der PBB-Lösung erstmalig von TAUSCH im schulischen Kontext publiziert [263]. Seitdem werden Experimente für den Schulunterricht und entsprechende Arbeitsmaterialien dazu entwickelt, erprobt und evaluiert. Das Basisexperiment¹⁰⁰ gilt als ein Modellexperiment zum natürlichen Kreislauf *Photosynthese / Zellatmung* (s. Kap. 4.1.3.2.1).

⁹⁸ Vgl. Fußnote Nr. 96.

⁹⁹ In Anlehnung an den aus den Schulbüchern bekannten Blue-Bottle-Versuch, bei dem sich die Methylblau-Glucose-Lösung durch Schütteln reversibel blau färbt, ist dieser Name entstanden [263]. Bis zur Substitution im Jahr 2015 wurde anstatt des Ethylviologens Methylviologen als Elektronenakzeptor verwendet [251]. Auch in anderen Arbeitskreisen wurde zuvor schon mit dieser Lösung gearbeitet [264].

¹⁰⁰ Mit dem Basisexperiment ist das die durch die Beleuchtung mit blauem Licht Blaufärbung der PBB-Lösung in einem 4 mL Schraubdeckelglas und das Entfärben durch das Schütteln der Lösung gemeint (Abb. 47).

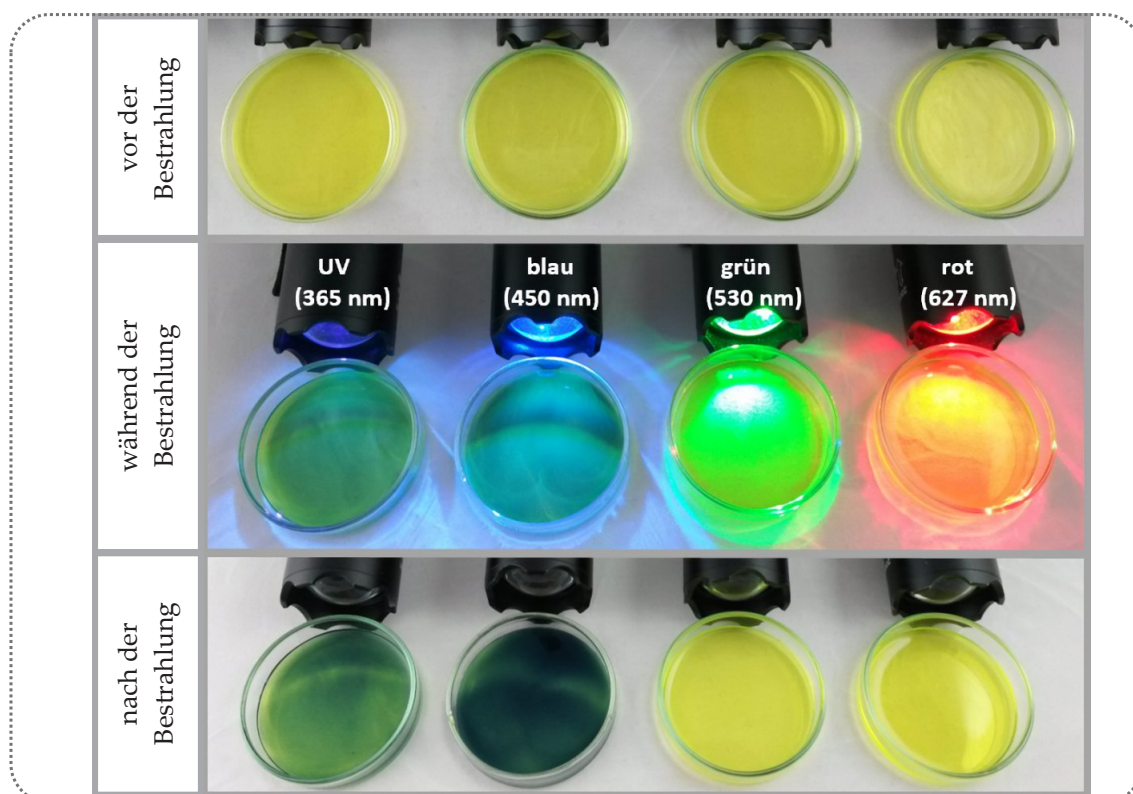


Abb. 43: Bestrahlung der gelben PBB-Lösung mit Licht vier unterschiedlicher Wellenlängen.

Wie auch weitere Flavine dient Proflavin in der PBB-Lösung als Photokatalysator und gleichzeitig übernimmt es somit die Funktion einer Modellsubstanz für Farbstoffe wie Chlorophyll und β -Carotin in der Natur. Allein durch dessen katalytische Menge verleiht es der Lösung ihre gelbe Farbe [263, 265]. Das Absorptionsmaximum liegt demnach im blauen VIS-Bereich und beträgt $\lambda_{\max}(\text{PF}^+) = 445 \text{ nm}$ [253, 261, 262]. Das bedeutet: Die Anregung des Photokatalysators der PBB-Lösung ist am besten mit blauem Licht möglich. Mit dem energiereicheren UV-Licht verläuft sie langsamer, da das Absorptionsmaximum nur eine Schulter im UV-Bereich des VIS-Bereichs hat. Auf grünes bzw. rotes Licht reagiert der Katalysator überhaupt nicht (s. Abb. 43). [7] Es wurde an anderer Stelle (s.o.) bereits darauf hingewiesen, dass, so wie für das Gelingen einer thermodynamischen Redoxreaktion, auch für die photokatalytische das Redoxpotenzial der daran teilnehmenden Substanzen entscheidend ist. Somit ist im Vergleich zum Energietransfer, bei dem hauptsächlich die Energiedifferenz der Zustände eine Rolle spielt, beim Elektronentransfer zusätzlich die Energie im Grundzustand bzw. das Redoxpotenzial von Bedeutung. Da der Elektronentransfer von PF^+ mit einem Standardelektronenpotenzial von $E^0(\text{PF}^+/\text{PF}^{2+}) = +1,1 \text{ V (vs. NHE)}^{101}$ [266] zum EV^{2+} mit $E^0(\text{EV}^+/\text{EV}^{2+}) = -0,45 \text{ V}$ nur unter relativ großem Energieaufwand möglich wäre, ist dieser Übergang thermodynamisch erschwert (s. Abb. 44a u. 45) [263]. Das PF^+ erreicht durch die Absorption von blauem Licht den angeregten Singulett-Zustand, wobei sich durch ISC normaler-

¹⁰¹ Alle in der Arbeit aufgeführten Standardelektronenpotenziale orientieren sich an der Normal-Wasserstoffelektrode NHE mit $E^0(\text{H}_2/2 \text{ H}^+) = 0 \text{ V}$ und $c(\text{H}^+) = 1 \text{ mol/L}$.

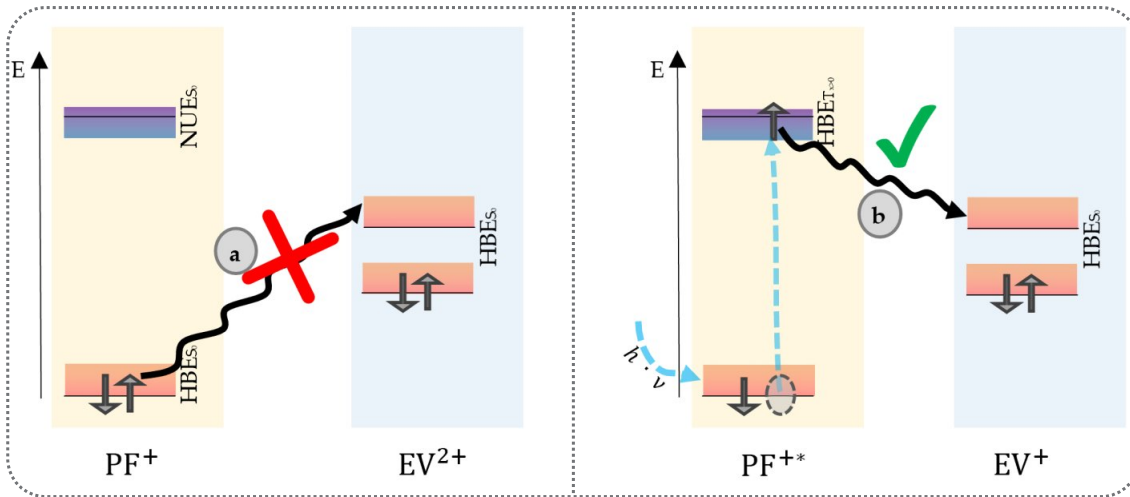


Abb. 44: Verbotener Elektronentransfer (a) bzw. erlaubter Elektronentransfer (b) zwischen dem Proflavin-Monokation und dem Ethylviologen-Dikation (nach [7, 263]).

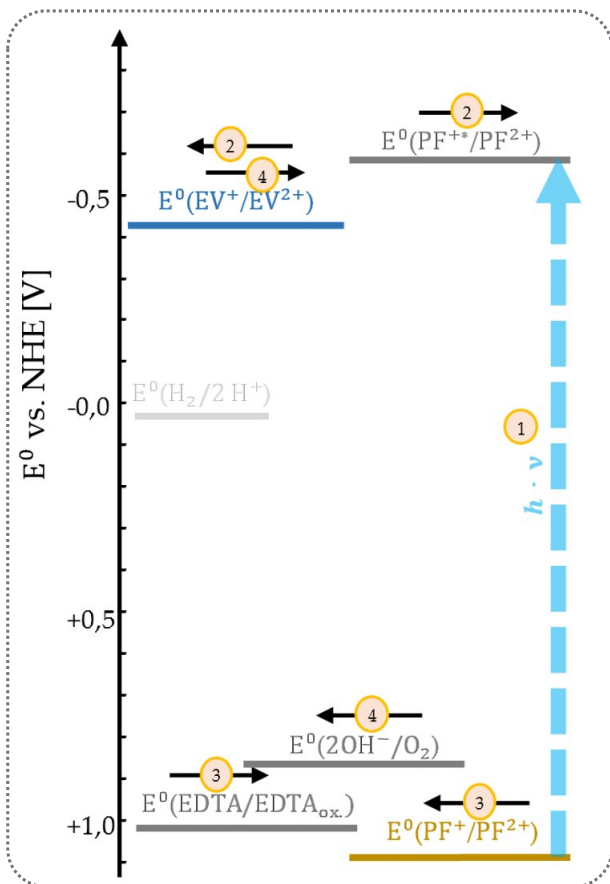
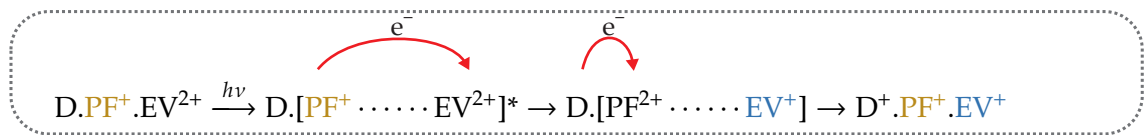


Abb. 45: Die Redoxpotenziale der Substanzen in der PBB-Lösung in Relation zueinander. Für die Nummerierung vgl. Abb. 47b. (nach [7, 262, 267]).

weise ein $T_{x>0}$ -Zustand bildet [8, 264]. Durch die lichtinduzierte Anregung verändert sich das Redoxpotenzial des Proflavin-Monokations, in dem es erhöht wird (s. Abb. 45) [194, 263, 267].

Die Lage der Redoxpotenziale nach der Bestrahlung führt dazu, dass das EV^{2+} mit $E^0(EV^+/EV^{2+}) = -0,45 \text{ V}$ [253] das angeregte Proflavin-Monokation PF^{+*} mit $E^0(PF^{+*}/PF^{2+}) = -0,6 \text{ V}$ [266] durch oxidatives Quenching wieder in den Grundzustand bringt. Die vorher nicht mögliche Oxidation bzw. das oxidative Quenching von PF^+ durch EV^{2+} wird nach der Anregung mit blauem Licht erreicht (s. Abb. 44b; Abb. 45). Dies ist damit zu begründen, dass das vom HBE in das NUE (vgl. Kap. 2.3.3.2, Abb. 31) überführte Elektron von PF^+ wegen der dadurch aufgenommenen Energie für den weiteren Transfer weniger Energie benötigt.

Die Fähigkeit des Proflavin-Monokations, Elektronen abzugeben, ist also gestiegen [194]. Somit wird das Elektron von einem energiereichen, instabileren Zustand ($T_{x>0}$) in einen stabileren Zustand (S_0) überführt (s. Abb. 44b). Der somit in der PBB-Lösung stattfindende PET zwischen dem PF^{+*} und dem EV^{2+} verläuft

Abb. 46: Ablauf der PET im Drei-Komponenten-System EDTA bzw. D – PF⁺ – EV²⁺ [83].

über einen Charge-Transfer-Komplex (oder auch Donator-Akzeptor-Komplex genannt). Da die Stabilisierung dieses Komplexes im angeregten Zustand vorliegt, wird von der Bildung eines *Exciplex* (excited complex), in diesem Fall $[PF^+ \cdots EV^{2+}]^*$, gesprochen [194, 198, 263]. Es bilden sich PF^{2+} und EV^+ . Das entstandene Ethylviologen-Monokation EV^+ , das hauptsächlich im gelben Bereich des VIS absorbiert, färbt die Lösung von anfänglich gelb nach blau [263]. Zur Regenerierung des Photokatalysator-Teilchens für einen weiteren Reaktionszyklus (s. Abb. 46) wird das PF^{2+} durch die irreversible Oxidation des Opferdonors EDTA reduziert [194, 251, 262, 263].

Im Hinblick auf die Bedingungen an die künstliche Photosynthese nach DAU (s.o.) hat der in der PBB-Lösung ablaufende Vorgang viele Analogien zu dem natürlichen Kohlenstoff-Kreislauf bei der Photosynthese und der Atmung (s. Abb. 47). Zu den schon erwähnten Analogien wie der Nutzung der Lichtenergie als Energieform, dem Einsatz eines Photokatalysators oder der Ladungstrennung durch Elektronentransfer muss noch hinzugefügt werden, dass das Substrat hier die Funktion der Modellsubstanz zum Kohlenstoff-Atom im natürlichen Prozess einnimmt. Das Kohlenstoff-Atom, welches im Kohlenstoffdioxid (CO_2) kovalent gebunden und partiell positiv geladen ist, wird bei der Photosynthese über mehrere Schritte und Zyklen reduziert (s. o. Gl. 13). Analog dazu wird das EV^{2+}

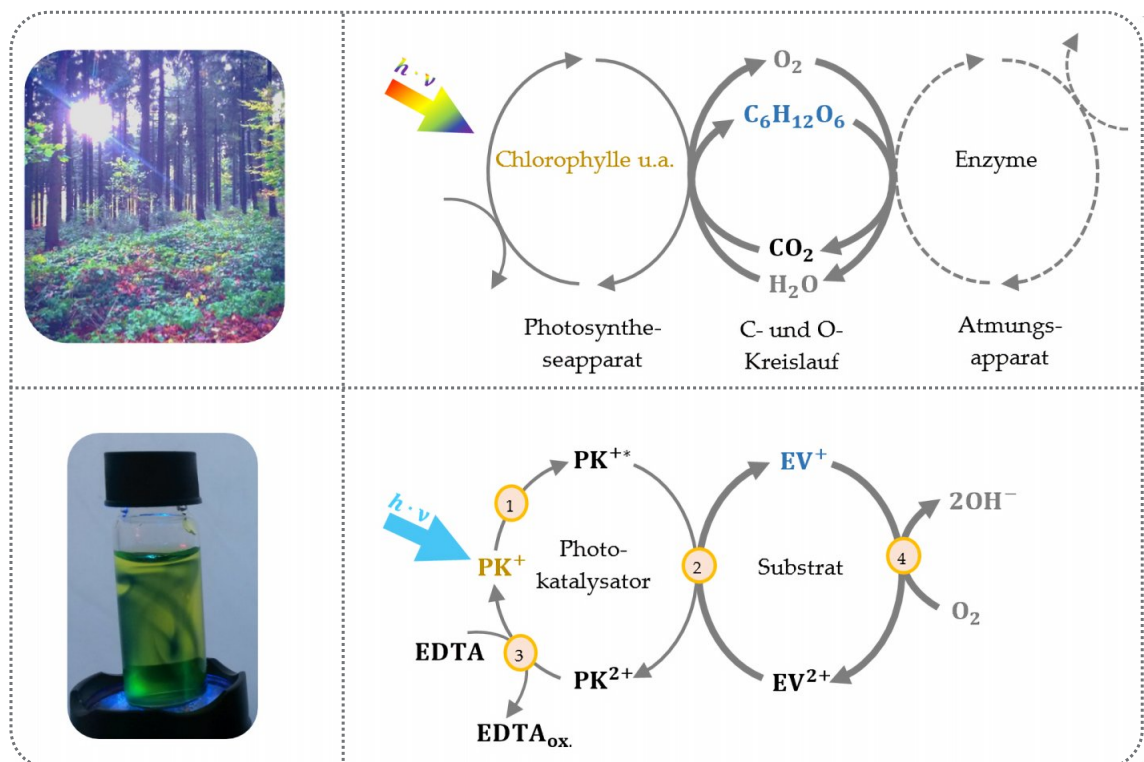


Abb. 47: Gekoppelte Reaktionszyklen a) des Kreislaufs Photosynthese-Zellatmung und b) der PBB-Lösung (nach [251, 262, 268]).

durch die Aufnahme eines Elektrons zu EV^+ reduziert. D. h.: So wie bei der Photosynthese Energie umgewandelt und in Form von z. B. Glucose gespeichert wird, geschieht dies auch in der PBB-Lösung. Da die für die Reduktion von EV^{2+} nötige Energie größer ist als die für die Oxidation des EDTA, resultiert ein endothermer Vorgang mit $\Delta G > 0$, sodass die absorbierte elektromagnetische Energie über PET im System $EDTA_{OX}.PF^+.EV^+$ chemisch gespeichert werden kann (s. Abb. 46) [251, 263].¹⁰²

Um die Speicherung von Energie zu demonstrieren, werden zwei Halbzellen mit der PBB-Lösung über eine Elektrolytbrücke verbunden und die eine Halbzelle mit blauem Licht bestrahlt. So entsteht eine Potenzialdifferenz, sodass eine Zellspannung zwischen der bestrahlten und der unbestrahlten Halbzelle zu messen ist (s. Kap. 4.1.1.1.2, k; vgl. Kap. 6.4) [262, 269, 270].

Während bei der Bestrahlung die Konzentration des Substrats EV^{2+} abnimmt, steigt gleichzeitig die des EV^+ . So müsste sich das Redoxpotenzial des Redoxpaares EV^+/EV^{2+} in der bestrahlten Halbzelle zu negativeren Werten verschieben (s. Gl. 16) [268].

$$E = -0,45V + \frac{0,059V}{1} \cdot \lg \frac{c(EV^{2+})}{c(EV^+)} \quad (16)$$

Bei der Zellatmung werden durch Oxidation mit Sauerstoff Kohlenhydrate exergonisch wieder zu Kohlenstoffdioxid abgebaut. So kann auch bei der PBB-Lösung EV^{2+} durch Sauerstoff ($E^0(OH^-/O_2)$) (s. Abb. 45) zum ursprünglichen Substrat reoxidiert werden [247, 263, 264]. In Abwesenheit von Sauerstoff bleibt die Energie ansonsten für längere Zeit im PBB-System gespeichert [271]. Dadurch erhält die Lösung wieder ihre gelbe Farbe. Jedoch kann der Zyklus der Reduktion-Oxidation bzw. phänomenologisch gesehen der reversible Farbwechsel nur solange durchgeführt werden, bis die Kapazität des Opferdonors EDTA ($E^0(EDTA/EDTA_{OX})$) (s. Abb. 45) zur Reduktion des PF^{2+} bzw. Regenerierung des Photokatalysators PF^+ ausgeschöpft ist. Den Zusammenhang zwischen dem natürlichen Kohlenstoff-Kreislauf der Photosynthese und Zellatmung und der PBB-Lösung stellt TAUSCH wie folgt dar:

„Auf der Klaviatur der Redoxpotenziale in [Abb. 45] [...] spielt sich beim PBB-Versuch die von 1 bis 7 gekennzeichnete Folge ab; sie entspricht den in [Abb. 45] [...] dargestellten Prozessen (man achte darauf, dass einige davon Kreisprozesse sind, andere nicht). Dieses Spiel mag das Konzert der Elementarreaktionen auf der submikroskopischen Teilchenebene nur sehr vereinfacht wiedergeben, es nützt dem Verständnis und baut Brücken zu biochemischen Vorgängen, die sich durch die Aneinanderkopplung sehr vieler Kreisprozesse vom Typ derer aus [Abb. 45] [...] auszeichnen. Die PBB-Interpreten stellen lediglich ein Quartett dar (EDTA-Proflavin-Methylviologen-Sauerstoff),

¹⁰² BALZANI unterscheidet zwischen den Vorgängen der Photokatalyse und Energiespeicherung. Er betrachtet lichtinduzierte endergonische Reaktionen ($\Delta G > 0$) als einen Vorgang der Energieumwandlung und -speicherung. Dazu zählt beispielsweise die Photosynthese [245, 268, 269].

der natürliche Photosynthese-Atmungs-Zyklus wird von einem Riesenorchester gespielt. Es werden aber in beiden Fällen Stücke von sehr ähnlichem Aufbau gespielt.“ [263]

Das größte Problem des künstlichen PET ist der spontane, leicht mögliche, thermische Elektronenrücktransfer [8], der in der natürlichen Photosynthese nicht der Fall ist, da das Elektron und das durch die Übertragung des Elektrons entstandene Loch in dem komplexen Mechanismus durch weitere Moleküle stabilisiert werden. Die Ladungstrennung ist dort irreversibel [194]. In der Forschung wird bei künstlichen Systemen versucht, die Geschwindigkeit des Rücktransfers zu senken und dadurch somit auch die Ausbeute des PET zu erhöhen [8, 194].¹⁰³ Häufig wird im Hinblick auf den weltweit steigenden Energiebedarf (s. Kap. 1) dahingehend geforscht, dass durch photoinduzierte Ladungstrennung bzw. den Elektronentransfer versucht wird, Wasser zu zersetzen, um daraus Wasserstoff für den Einsatz als Treibstoff zu gewinnen [183, 196]. Da pro absorbiertes Photon nur ein Elektron innerhalb des Systems übertragen wird (s. Abb. 48) und zudem nur ein Teil der Lichtenergie gespeichert werden kann, gibt es viele Desiderata, an denen in der Forschung angesetzt und getüftelt wird. Deshalb ist es umso erstaunlicher, dass das natürliche System, die Photosynthese, ohne dass der Mensch sich dafür anstrengen muss, einwandfrei und ganz von alleine verläuft, und dazu noch für den Menschen nötige Energie generiert.



Abb. 48: Generierung von Wasserstoff via PET eines Drei-Komponenten-Systems (nach [183]).

2.4 Schlussfolgerungen

Die Bildung des Forschungskonzepts (s. Kap. 2.1) und sowohl die historische (s. Kap. 2.2) als auch die fachwissenschaftliche Betrachtung (s. Kap. 2.3) der Photochemie sind das Fundament der explorativen nutzenorientierten Untersuchung dieser Arbeit (s. Abb. 49). Zudem wurde durch die exemplarisch gegebenen Einsatzmöglichkeiten der Forschungsergebnisse die Reichweite der Photochemie nicht nur in der naturwissenschaftlichen Forschung, sondern ebenfalls im alltäglichen Leben eines jeden von uns deutlich.

Der Inhalt des Kapitels 2.3 wurde prospektiv gewählt, sodass er sich bereits zum größten Teil an den in die Arbeitsmaterialien (s. Kap. 4) für den Schulunterricht integrierten bzw. für den Einsatz in der Hauptstudie (s. Kap. 5.4) gewählten Schülerexperimenten orientierte. Da vor allem durch die Vielfalt der

¹⁰³ Eine Möglichkeit zur Stabilisierung der ionischen Zwischenprodukte wäre die Wahl von Lösemitteln mit hoher Molekül-Polarität [8, 208, 194].

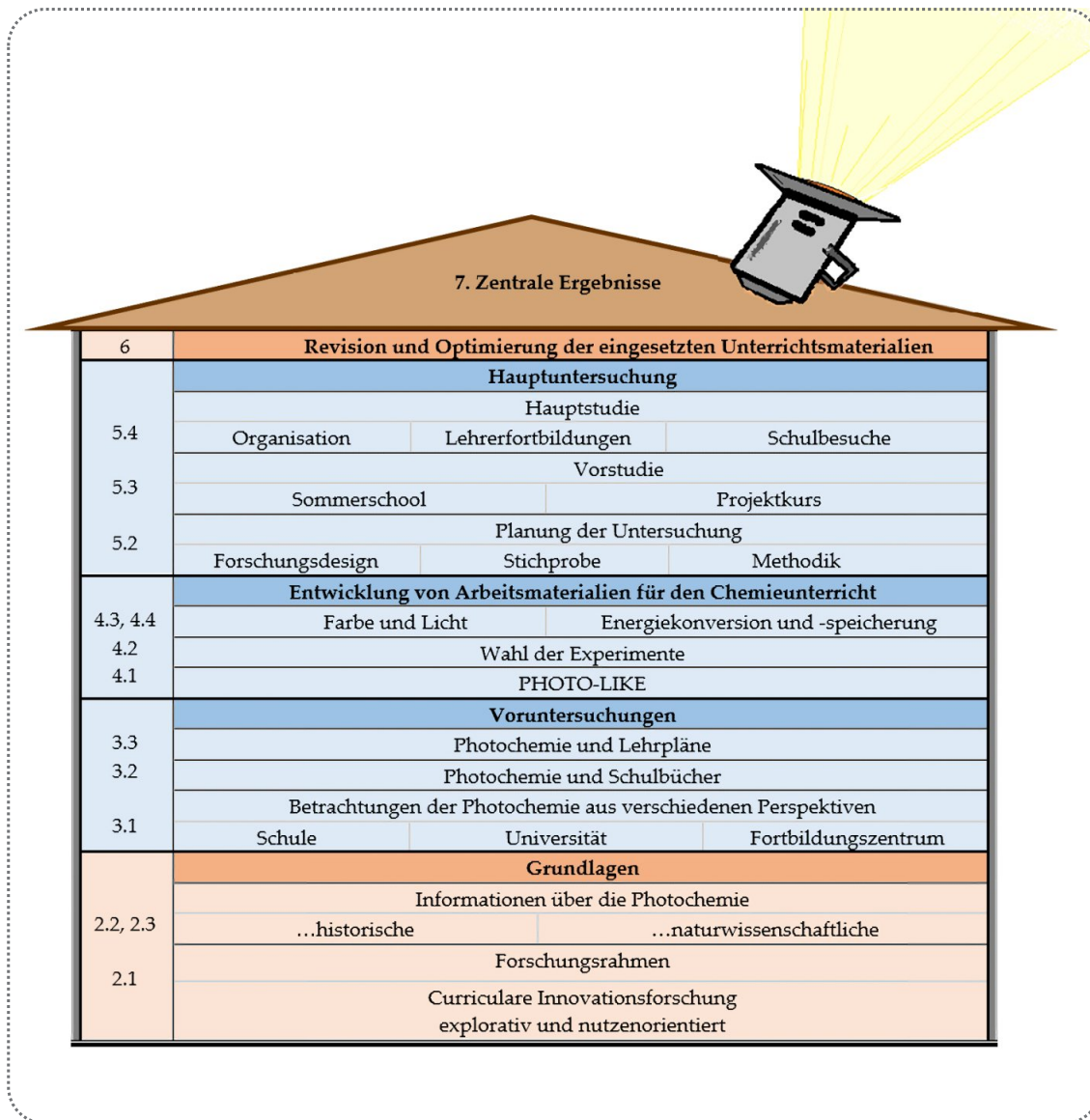


Abb. 49: Aufbau der explorativen nutzenorientierten Untersuchung mit den Grundlagen als deren Fundament.

Desaktivierungsmöglichkeiten des durch Lichtenergie erreichten angeregten Zustands eine große Auswahl an möglichen Schulexperimenten gegeben ist (s. Kap. 3.3), jedoch die Untersuchungen zeitlich begrenzt sind, musste zwangsläufig eine Auswahl getroffen werden (s. Kap. 4). So konnten bei den nachfolgenden praktischen Arbeiten, welche in den folgenden drei Hauptkapitel (s. Kap. 3, 4 und 5) festgehalten sind, die hier in Kapitel 2 geleisteten Vorarbeiten zur Orientierung und Generierung genutzt werden.

3 Voruntersuchungen

Orientiert an BLUMERS Definition [71] des explorativen Forschungsansatzes wird zur Gewinnung erster Erkenntnisse eine Vielzahl an Forschungsmethoden genutzt und im Sinne des Mixed-Methods-Designs effektiv miteinander kombiniert [73]. Zu diesen gehören die Analyse der Bildungsstandards (s. Kap. 3.2.1) und Kernlehrpläne (s. Kap. 3.2), Schulbuchanalysen (s. Kap. 3.3), Interviews mit Lehrenden (s. Kap. 3.4.2.2), eine schriftliche Befragung mit Studierenden (s. Kap. 2.4.2.3) und Unterrichtshospitation (3.4.2.1). Der Grund für diese Vielfalt an Forschungsmethoden bzw. für die multiperspektivische Betrachtung der Photochemie ist schlichtweg der Bedarf, der danach besteht. Nicht umsonst wird von KRÜGER et al. [272] die Perspektive der Schulpraktiker auf die naturwissenschaftsdidaktische Forschung wie folgt geschildert:

„Aus Sicht vieler Schulpraktiker liefern wissenschaftliche Studien banale Selbstverständlichkeiten oder nichtpraktikable Vorschläge, wie z. B. [...] unrealistische lange Unterrichtseinheiten mit nicht curriculumvaliden Inhaltsgebieten. So ist es nicht verwunderlich, dass die naturwissenschaftsdidaktische Forschung häufig nur recht eingeschränkte Auswirkungen auf die Unterrichtspraxis hat. Selbst Erfolg versprechende Forschungsergebnisse kommen kaum in die Praxis.“

Um dieser Gefahr auch im Hinblick auf die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit vorzubeugen, sind die Voruntersuchungen unerlässlich. Deshalb ist es geradezu verpflichtend und selbstverständlich, in einem ersten Schritt die Perspektiven aus der Bildungslandschaft zu inventarisieren bzw. aufzunehmen, sodass in der Hauptuntersuchung (s. Kap. 5) auf dieser Basis gearbeitet werden kann. Schließlich werden die Arbeitsmaterialien für den Schulunterricht entwickelt (s. Kap. 4) und dann im Sinne der nutzenorientierten Grundlagenforschung nach STOKES [76, 79] (s. Abb. 50) im Rahmen der Feldstudie vor Ort an Schulen eingesetzt (s. Kap. 5). Die Ergebnisse der Teilschritte der Voruntersuchungen können im Anschluss metaanalytisch zusammengeführt werden, um daraus weiterführende Erkenntnisse für die Hauptuntersuchung zu schöpfen (s. Kap. 1.2, Abb. 1). Letztendlich soll durch diese Arbeit im Sinne von HALL und HORD [54] die Schule bzw. der naturwissenschaftliche Unterricht akzeleriert werden.

Mit den Voruntersuchungen findet also ein Wechsel des Schwerpunkts von der theoretischen in die praktische Arbeit statt. Hier befinden sich bereits die ersten Schritte der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis, zwischen Universität und Schule bzw. Forscher und Praktiker [77]. D. h.: Hier werden die ersten Begegnungen des Forschers mit den realen Gegebenheiten in der

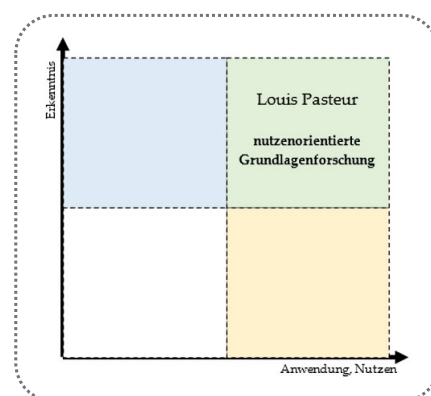


Abb. 50: Das Quadrantenmodell von STOKES (vgl. Kap. 2.1.4.1).

Bildungslandschaft zum Thema *Photochemie* dargestellt. Insgesamt betrachtet tragen die unterschiedlichen Forschungsmethoden – wie Dokumentanalysen, Interviews und Befragungen – sowohl qualitative als auch quantitative Merkmale, d. h.: Sie werden „im Rahmen [des] [...] Mixed-Methods-Designs produktiv miteinander kombiniert“ [73]. Im Sinne der explorativen Forschung bildet sich die Gesamtheit der Voruntersuchungen sukzessive. Dieser ist abhängig von dem Bedarf an weiteren Informationen und Methoden, der während der Untersuchung selbst entsteht [71] (s. Kap. 2.1.4.3).

3.1 Historische Betrachtung der curricularen Entwicklung des Chemieunterrichts

Zuvor wurde in Kapitel 2.1.2 der Begriff *Curriculum* definiert. Hier wird nun eine Zeitreise von den Anfängen der Chemiedidaktik bis hin zur gegenwärtigen Zeit der *Bildungsstandards* in für die vorliegenden Untersuchungen ausreichendem Umfang gemacht.

Bereits W. RATICHUS (1571–1635), einer der ersten Didaktiker in der Geschichte, kritisierte den traditionellen, naturwissenschaftlichen Unterricht. Seine Kritikpunkte waren „fehlende Anschaulichkeit, kein Experimentalunterricht, kein Bezug zu realen Gegenständen, keine Anwendung von Bildern“ [273].

Im 18. Jahrhundert spielten dann im Unterricht der Naturlehre Experimente und Alltagsbezug eine größere Rolle. Erst in der Zeit der Aufklärung wurde durch die reformpädagogische Bewegung der Philanthropen aufgezeigt, dass auch der naturwissenschaftliche Unterricht Erziehungs- und Bildungsaufgaben erfüllt. Mit der wachsenden Bedeutung der Chemie an den Universitäten gewann auch die Praxis in der Ausbildung der Chemiestudierenden eine größere Rolle. Dies wirkte sich auf den naturwissenschaftlichen Schulunterricht aus. In Preußen entwickelte Süvern unter der Leitung von W. v. HUMBOLDT (1767–1835) einen sogenannten „Normallehrplan“. Im Naturlehreunterricht, dem in der Woche zwei Stunden zugesprochen wurden, sollte demnach mehr Wert auf das Kriterium der Anschaulichkeit der Inhalte gelegt werden. Aus diesem entstanden schon 1820, vier Jahre später, die Fächer Physik und Chemie. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts entwickelten bedeutende Chemiedidaktiker Lehrgänge für den Chemieunterricht, die einen bedeutend höheren Anteil an Experimenten hatten als zuvor. R. ARENDTS (1828–1902) methodischer Lehrgang legte den Schwerpunkt auf den Anschauungsunterricht und für F. WILBRAND (1840–1914) spielte in seinem Lehrgang die induktive Herangehensweise eine große Rolle. Induktiv sollten Hypothesen gebildet und deduktiv sollten sie durch Experimente überprüft werden. Neue Studentafeln und Lehrpläne, die nun einen deutlicheren Fokus auf Schülerversuche setzten, entstanden durch die DAMNU, Deutscher Ausschuss für den mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht, Anfang des 20. Jahrhunderts. Folglich wurden von G. KERSCHENSTEINER (1854–1932) Erziehungs-

und Bildungsziele so konkret wie noch nie zuvor formuliert, welche 1953 in Form des Buches *Wesen und Wert des naturwissenschaftlichen Unterrichts* veröffentlicht wurden. Langsam wurden auch Fragen nach altersgerechtem Unterricht und den Möglichkeiten der Differenzierung oder Zusammenführung von naturwissenschaftlichen Bereichen in Naturkunde aufgeworfen und intensiver diskutiert. [273]

Diese positive Entwicklung wurde von den Saarbrückener Rahmenvereinbarungen von 1960 für eine kurze Zeit gestoppt. Diese waren aus der Perspektive des Chemieunterrichts ein Schritt zurück. Zwar konnten von nun an die Schülerinnen und Schüler Fächer teilweise selber wählen, jedoch resultierte daraus auch die Verringerung der Pflichtfächer, wonach nur noch Physik als mathematisch-naturwissenschaftliches Fach verblieb. Sie lösten nicht nur eine heftige Diskussion aus, sondern auch Taten, die dieser folgten: Der *Deutsche Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts* (MNU) gab durch die *Nürnberger Lehrpläne* (1965) „einen Minimalkatalog an Unterrichtsgegenständen“ heraus [274]. In diesen befand sich ein Stoffplan mit Fachbegriffen, -themen und Gesetzen. Eine methodische Herangehensweise wurde den Lehrpersonen nicht vorgeschrieben. Nachdem 1972 mit der Oberstufenreform die Lernenden im Kurssystem das Fach Chemie auch als Leistungskurs, also im Hauptfach, wählen konnten, mussten Chemielehrpersonen ab jetzt sowohl ein Curriculum für diejenigen konzipieren, die Chemie nach der Sekundarstufe I abwählten, als auch ein Curriculum für Chemie als Abiturfach. „Große Offenheit in den Lehrplänen einerseits und die Neuheit von zwei gestuften Bildungsabschlüssen für Chemie andererseits führten zum individuellen Profilieren und zur unverantwortlichen Vielfalt.“ [274]

Da inzwischen durch die hohe Präsenz des *Eigenschaft-Struktur-Denkens* und des *Modelldenkens* Chemie zu theorielastig wurde, kamen in den 1980ern Aspekte wie *Chemie im Alltag*, Experimentalchemie und auch Schülerorientierung zur Anwendung. Letztere war nicht zuletzt deshalb interessant, weil der Chemieunterricht in vielen Bundesländern bis in die 7. und in einigen sogar in die 6. Klasse vorverlegt wurde. Die alters- und lernpsychologischen Entwicklungsstadien von den jungen Lernenden wurden berücksichtigt, sodass Ausdrücke wie *entdeckendes Lernen*, *handlungsorientierter* oder *problemorientierter Unterricht* zur Ausgestaltung von Lehrplanempfehlungen herangezogen wurden. Diese wurden von der MNU in Expertenkommissionen entworfen, woran auch Lehrkräfte aus mehreren Bundesländern und Verlagen beteiligt waren, und wurden auch von den Landeslehrplankommissionen befürwortet. So waren die Lehrplanempfehlungen des MNU von 1984 mit den folgenden ausgearbeiteten sechs Problemfeldern maßgeblich auch für die Lehrbücher und Lehrpläne der Bundesländer:

1. Stoffe und Reaktionen aus Kontinuumssicht,
2. erste Deutung der chemischen Reaktion aus der Sicht des Diskontinuums,
3. Chemische Symbole zur Beschreibung von Stoffen und Reaktionen aus Diskontinuumssicht,

4. systematisieren von Stoffen und Reaktionen,
5. elektrische Erscheinungen bei chemischen Reaktionen und
6. differenzierte Deutung von Reaktionsabläufen und Teilchenstrukturen.

Es wurde jedoch nach einer Befragung von 1992 die zu kleine Schnittmenge der Schülerinteressen an Alltags- bzw. Umweltbezügen und der in den Lehrplänen stark vertretenen Wissenschaft bemängelt. Daraufhin wurden in den neuen MNU-Empfehlungen Sachbezüge zu Alltag, Umwelt und Technik hergestellt, sodass teilweise die Erfahrungswelt der Lernenden sich darin widerspiegelte. [274]

Die Kultusministerkonferenz (KMK) beschloss 1997 den Vergleich des Schulsystems auf internationaler Ebene [275, 276]. Die Ergebnisse zeigten enorme Unterschiede im Leistungsstand der einzelnen Länder, sodass als eine natürliche Konsequenz die Idee des Gleichheitsangebots daraus hervorging. Die von der KMK entwickelten und eingeführten Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss, welche allgemeine, fachspezifische Bildungsziele und Grundlagen umfassen, stellen seitdem für alle Bundesländer ein verbindliches Gerüst zur Orientierung bei der Erstellung der länderinternen Lehrpläne dar [277]. Diese sind gleichzeitig ein klarer Maßstab zur „Entwicklung und Sicherung von Qualität [und für die] externe und interne Evaluation“ [278].

Der neue Kernlehrplan für die Sekundarstufe I des Faches Chemie in NRW, der nach den KMK-Bildungsstandards von 2004 erneuert wurde, gilt seit dem Schuljahr 2008/09. „Anders als in den Jahrzehnten zuvor stehen nun die Erträge von Bildung im Vordergrund, weniger hingegen die Rahmenvorgaben unterrichtlichen Handelns“ [277]. So fand durch die Bildungsstandards ein deutlicher Paradigmenwechsel in der Bildungspolitik statt [279]. Dass nicht mehr der Input, sondern der Output zählt, zeigt sich auch in den Kernlehrplänen insbesondere anhand des Prozesscharakters der Unterrichtsziele und der Kompetenzorientierung.

3.2 Analyse von Bildungsstandards und Lehrplänen

„Wo immer es darum geht, Erwartungen an das Schulsystem zu formulieren und schulisches Lehren und Lernen neuen Erfordernissen anzupassen, wird der Ruf nach neuen Lehrplänen laut. Wo immer Zweifel an der Wirksamkeit von Schule und an ihrer Zukunftstauglichkeit bestehen, werden ihre Lehrpläne überprüft.“ [280]

3.2.1 Forschungsfragen und Vorgehensweise

Das Ziel dieses Kapitels (Kap. 3.2 - 3.2.4) ist es, bevor im weiteren Vorgehen die praktische Perspektive eingenommen wird, zuerst die theoretischen Vorgaben für den fachlichen Inhalt des Schulunterrichts im Hinblick auf photochemische Inhalte zu analysieren. Erst dadurch können in Kapitel 4.1.3 auf der Basis dieser Rechtsdokumente, die als politisch-rechtliche Rahmenbedingungen für den Schulunterricht zu dessen Legitimation dienen, photochemische Inhalte bzw. Experimente begründet verortet werden. Somit soll hier herausgestellt werden, welches Potenzial zur Integration photochemischer Inhalte theoretisch vorhanden ist. Zudem werden mithilfe der erworbenen Erkenntnisse aus den folgenden Analysen die Ergebnisse aus den weiteren Bausteinen, Kap. 3.3 und Kap. 3.4, der Voruntersuchungen für die Hauptuntersuchung (Kap. 5), nutzenbringend bewertet. Zur Klärung des Anteils und der Möglichkeiten der Einbindung photochemischer Inhalte hinsichtlich der *Bildungsstandards* (BS) und Lehrpläne dient die Konstellation folgender Forschungsfragen (F.) zur Orientierung:

F. 1: Welche Rolle soll *die Energie* für den Chemieunterricht laut der BS und KLPe einnehmen?

F. 2: In welchen Zusammenhängen wird *Licht* bzw. *elektromagnetische Strahlung* in den BS und KLPen angeführt? / Welche Rolle spielt Licht bzw. elektromagnetische Strahlung darin?

F. 3: Inwieweit könnten photochemische Inhalte mit Blick auf die BS und KLPe in den Chemieunterricht integriert werden?

Hierfür werden in einem ersten Schritt die *Bildungsstandards* analysiert, in denen sich die allgemein gehaltenen Vorgaben für den Unterrichtsinhalt befinden, da diese bundesweit den Rahmen für die Bildungsziele und die fachlichen Inhalte zentral vorgeben [278]. In den jeweiligen *Lehrplänen*¹⁰⁴ der Bundesländer wurden diese von dem entsprechenden Institut des Ministeriums für Schule und Weiterbildung konkretisiert, kontextualisiert und erweitert. So werden sie unmittelbar als Leitfaden zur Entwicklung der *schulinternen* fachspezifischen Curricula herangezogen. Deshalb werden im nächsten Schritt die Lehrpläne auf photochemische Inhalte hin untersucht.

Praktisch gesehen werden in Anlehnung an das Bielefelder Raster zur Schulbuchanalyse hauptsächlich *Frequenzanalysen* zur Angabe der „Häufigkeit des Auftretens spezifischer Textelemente“ durchgeführt sowie *Kontingenzanalysen*, welche zur Feststellung der „Häufigkeiten von einzelnen Textelementen gepaart mit Abhängigkeit von anderen Begriffen“ [281] dienen (vgl. Kap. 3.3.1). [73, 281, 282]

Da der praktische Teil der vorliegenden Arbeit im Bundesland NRW durchgeführt wurde, liegt der Fokus auf den Kernlehrplänen (KLPen) des

¹⁰⁴ *Lehrplan* wird in der vorliegenden Arbeit als Oberbegriff genutzt für die bundesland-abhängigen Bezeichnungen *Bildungsplan* (Baden-Württemberg, Bremen, Hamburg), *Rahmenlehrplan* (Berlin, Brandenburg), *Fachlehrplan* (Sachsen-Anhalt), *Lehrplan* (Bayern, Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Schleswig-Holstein, Thüringen), *Rahmenplan* (Mecklenburg-Vorpommern), *Kerncurriculum* (Niedersachsen), *Kernlehrplan* (NRW).

Faches Chemie in NRW. Zusätzlich werden die BS und KLPe der benachbarten naturwissenschaftlichen Fächer Biologie und Physik gesichtet, um herauszubekommen, ob mögliche Rollen der Lichtenergie auf die naturwissenschaftlichen Fächer disjunkt verteilt sind oder Schnittmengen aufgezeigt werden können. Letzteres wäre im Kontext des *fächerübergreifenden*¹⁰⁵ [283, 285] naturwissenschaftlichen Unterrichts nutzenbringend, da sich beispielsweise neue Chancen für die Photochemie ergeben würden sowie Synergieeffekte zwischen den drei Schulfächern dabei genutzt werden könnten (s. Kap. 3.2.3.1).

3.2.2 Bildungsstandards

In den BS der Fächer *Biologie*, *Chemie* und *Physik* wird unmittelbar zu Beginn der Beitrag der naturwissenschaftlichen Fächer zur Bildung wie folgt erklärt:

„Naturwissenschaft und Technik prägen unsere Gesellschaft in allen Bereichen und bilden heute einen bedeutenden Teil unserer kulturellen Identität. Das Wechselspiel zwischen naturwissenschaftlicher Erkenntnis und technischer Anwendung bewirkt Fortschritte auf vielen Gebieten, beispielsweise [...] Umwelt- und *Energietechnologie* [...]. Hierzu ist Wissen aus den naturwissenschaftlichen Fächern nötig.“ [14, 286, 287]

Demzufolge zählt auch explizit die *Energietechnologie* zu den Bereichen, die durch Nachwuchswissenschaftler weiter erforscht und entwickelt werden soll. Allein dadurch ist bereits theoretisch die Relevanz insbesondere der erneuerbaren Energien für den naturwissenschaftlichen Unterricht selbstverständlich und unumstritten.

Ein weiterer Hinweis darauf befindet sich in den Basiskonzepten:

„Mittels [...] [dieser] beschreiben und strukturieren die Schülerinnen und Schüler fachwissenschaftliche Inhalte [...]. [Sie] dienen damit der vertikalen Vernetzung des im Unterricht situiert erworbenen Wissens. Gleichzeitig sind sie eine Basis für die horizontale Vernetzung von Wissen, in dem sie für die Lernenden in anderen naturwissenschaftlichen Fächern Erklärungsgrundlagen bereitstellen.“ [14]

Durch diese soll den Lernenden das vertikale Vernetzen, d.h. das innerfachliche, zeitlich aufeinanderfolgende Vernetzen von exemplarisch und kumulativ¹⁰⁶ erworbenem Wissen erleichtert und zudem das interdisziplinäre, d.h. horizontale Vernetzen ermöglicht werden (b) [288]. In Tab. 11 werden die Basiskonzepte der drei Fächer angegeben.

¹⁰⁵ Dieser Ausdruck wird hier als Oberbegriff für die Bezeichnungen *fächerüberschreitend* (intradisziplinär), *fächerverbindend* (multi-/pluridisziplinär) und *fächerkoordinierend* (interdisziplinär) verwendet [283, 284].

¹⁰⁶ Wenn für „den Aufbau von Wissensstrukturen [...] Inhalte fachlich sinnvoll und für das Individuum schlüssig kognitiv verarbeitet werden und dabei effizient in das bestehende Wissensnetz integriert werden“, dann ist die Rede von einem *kumulativen* Lernprozess [288].

Fach	Biologie	Chemie	Physik
Basiskonzepte	1	System	Stoff-Teilchen-Beziehungen
	2	Struktur und Funktion	Struktur-Eigenschaft-Beziehungen
	3	Entwicklung	Chemische Reaktion
	4		Energetische Betrachtung

Tab. 11: Basiskonzepte der Fächer Biologie, Chemie und Physik in den Bildungsstandards.

Mit Blick auf die oben bereits aufgezeigten Funktionen der Basiskonzepte ist es nicht verwunderlich, dass alle drei Fächer insofern etwas gemeinsam haben, als dass ihre Bildungsstandards ein vergleichbares Basiskonzept umfassen [286], dem energetische Aspekte zugeschrieben werden: Für das Fach Chemie heißt es *energetische Betrachtung* bei Stoffumwandlungen, für das Fach Physik *Energie*, und *System* für das Fach Biologie, wobei in dem letztgenannten Basiskonzept die Energieumwandlung als eine von fünf Systemeigenschaften aufgeführt wird [14, 286, 287]. Diese Gemeinsamkeit wird sehr deutlich besonders in den BS des Faches Chemie betont. Darin heißt es:

„Basiskonzepte, wie z. B. das Konzept zur *energetischen Betrachtung*, finden sich inhaltlich in den Unterrichtsfächern Biologie und Physik in unterschiedlichen Zusammenhängen und Ausprägungen wieder, können zwischen den naturwissenschaftlichen Disziplinen vermitteln und so Zusammenhänge hervorheben.“ [14]

Dadurch lässt sich die Sinnhaftigkeit der Kooperation von Lehrenden der unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Disziplinen zeigen, wobei in den BS der Fächer Chemie und Physik sogar auf die Möglichkeit des *fachübergreifenden und fächerverbindenden Arbeitens* hingewiesen wird, dessen Umsetzung eben durch die vergleichbaren Basiskonzepte, wie beim Thema *Energie*, somit erleichtert wäre [287].

In allen BS ist eine Auflistung von naturwissenschaftlichen und fachspezifischen Kompetenzen vorzufinden, über welche die Schüler mit dem Erwerb des mittleren Schulabschlusses verfügen sollen [14, 286, 287]. Zur Erläuterung des Begriffs wird WEINERTS Definition dafür verwendet. Demnach bezeichnen Kompetenzen

„die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften, damit die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll genutzt werden können.“ [289]

Dabei wird zwischen der *handlungs-* und der *inhaltsbezogenen Dimension* unterschieden: „Die Inhaltsdimension wird überwiegend im Kompetenzbereich *Fachwissen* dargestellt, die Handlungsdimension in den Kompetenzbereichen *Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung*“ [286]. Für das Fach Chemie werden die vier Kompetenzbereiche in den BS wie folgt beschrieben:

Kompetenzbereich	Beschreibung
Fachwissen (F)	Chemische Phänomene, Begriffe, Gesetzmäßigkeiten kennen und Basiskonzepten zuordnen
Erkenntnisgewinnung (E)	Experimentelle und andere Untersuchungsmethoden sowie Modelle nutzen
Kommunikation (K)	Informationen sach- und fachbezogen erschließen und austauschen
Bewertung (B)	Chemische Sachverhalte in verschiedenen Kontexten erkennen und bewerten

Tab. 12: Beschreibung der Kompetenzbereiche in den Bildungsstandards des Faches Chemie.

Die Kompetenzen im Bereich Fachwissen werden durch die übergeordneten Basiskonzepte vertikal vernetzt [287]. Innerhalb der Kompetenzen werden ebenfalls keine Energieformen explizit benannt. Es erfolgt somit keine Differenzierung unter diesen. Deshalb werden im Folgenden alle Kompetenzen bzw. Standards aus dem Kompetenzbereich *Fachwissen* (F) aufgelistet, in denen der Ausdruck *Energie* zumindest vorkommt:

Fach Biologie
Kompetenzen
Die Schülerinnen und Schüler ...
... stellen einen Stoffkreislauf sowie den Energiefluss in einem Ökosystem dar. (F 1.6)
... beschreiben und erklären Struktur und Funktion von Organen und Organsystemen, z. B. bei der Stoff- und Energieumwandlung [...]. (F 2.4)
Fach Chemie
Kompetenzen
Die Schülerinnen und Schüler ...
... beschreiben Phänomene der Stoff- und Energieumwandlung bei chemischen Reaktionen. (F 3.1)
... deuten Stoff- und Energieumwandlungen hinsichtlich der Veränderung von Teilchen und des Umbaus chemischer Bindungen. (F 3.2)
... geben an, dass sich bei chemischen Reaktionen auch der Energieinhalt des Reaktionssystems durch Austausch mit der Umgebung verändert. (F 4.1)
... führen energetische Erscheinungen bei chemischen Reaktionen auf die Umwandlung eines Teils der in Stoffen gespeicherten Energie in andere Energieformen zurück. (F 4.2)
Fach Physik
Kompetenzen
–

Tab. 13: Kompetenzen aus den Bildungsstandards der naturwissenschaftlichen Fächer, in denen der Ausdruck *Energie* vorkommt.

Zwar können keine Kompetenzen aus den BS des Faches Physik hier angegeben werden (Tab. 13), doch das Basiskonzept *Energie* wird dafür näher erläutert:

„Nutzbare **Energie** kann aus erschöpfbaren und regenerativen Quellen gewonnen werden. Für den Transport und bei der Nutzung von **Energie** kann ein Wechsel der **Energieform** bzw. des **Energieträgers** stattfinden. Dabei kann nur ein Teil der eingesetzten **Energie** genutzt werden. Die Gesamtheit der **Energien** bleibt konstant. Bei Körpern unterschiedlicher Temperatur findet ein **Energiefluss** von alleine nur von höherer zu niedrigerer Temperatur statt.“ [287]

Es ist auffällig, dass der Ausdruck *Energie* hauptsächlich im Zusammenhang mit der in einem System gespeicherten Energie oder der Energieumwandlung vorkommt. Um Letztere im Unterricht thematisieren zu können, bedarf es zwangsläufig der Einführung von mindestens zwei Energieformen, welche in den BS nicht näher ausgeführt werden. Auch in Anlehnung an oben bereits Erwähntes wird in keinem der drei BS eine bestimmte Energieform explizit thematisiert, mit der Ausnahme, dass in den BS für das Fach Physik Energieformen wie *Wind- und Sonnenenergie, Kernenergie, elektrischer Stromkreis* und *thermische Ströme* lediglich als „Beispiele für mögliche Konkretisierungen [der Basiskonzepte] angegeben“ werden [287].

Da die Bildungsstandards für die Lehrpläne der Bundesländer und schulinternen Curricula neben der Orientierungs- und Steuerungsfunktion auch „die Funktion der Schaffung von Freiräumen mit Entscheidungs- und Gestaltungsmöglichkeiten“ übernehmen, erfolgt die Konkretisierung der Bildungsstandards hauptsächlich erst durch die Lehrpläne des jeweiligen Faches im entsprechenden Bundesland [290, 291] bzw. durch die schulinternen Curricula.

3.2.3 Lehrpläne des Faches Chemie

Alle Bundesländer sind dazu verpflichtet, die Bildungsstandards anzuwenden. Diese dienen den Bundesländern nicht zuletzt als *Referenzsystem* zur Standardüberprüfung bzw. um Ergebnisse von Lehr- und Lernleistungen messbar und vergleichbar zu machen, die zur Qualitätssicherung und -steigerung führen sollen. Dabei sind die BS jedoch aufgrund der fehlenden konkreten unterrichtlichen Voraussetzungen nur hinreichend für die Entwicklung von schulinternen Curricula, sodass das Vorhandensein von Lehrplänen als eine notwendige Bedingung dafür gesehen werden muss [291–293]. Die Lehrpläne des Faches Chemie – wie auch aller anderen Fächer – greifen deshalb die relativ allgemein formulierten Inhalte und Vorgaben in den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz auf und konkretisieren diese. Auf die folgenden fünf Funktionen der staatlichen Lehrpläne einigen sich RAUIN et al. [292]: Legitimationsfunktion, Orientierungsfunktion, Innovationsfunktion, Anregungsfunktion und Entlastungsfunktion. Zudem wird in den Lehrplänen auf die Steuerungsfunktion aufmerksam gemacht [20, 292]. Lehrpläne sind demnach sowohl länder- als auch schulformbezogen [290].

Vor der Betrachtung der Kernlehrpläne des Landes NRW im Speziellen wurde zuerst eine Analyse der aktuellen¹⁰⁷ Lehrpläne für das Gymnasium¹⁰⁸ der Sekundarstufe 1 und 2 (Sek. 1 und 2) aller Bundesländer durchgeführt. Damit sollte der Vergleich zwischen den Bundesländern und durch die Erstellung einer Übersicht der inhaltlichen Recherche (s. Tab. 14) die Erschließung einer Gesamtbilanz für ganz Deutschland ermöglicht werden. Anhand des explorativen Designs dieser Untersuchung wird je nach Erkenntnis aus dem vorherigen Schritt der Untersuchung ein nächster Schritt generiert. Auch hierdurch werden nach und nach die oben gestellten Forschungsfragen F. 1 bis F. 3 beantwortet. Zu diesem Zweck wurde ein Analyseraster (s. Tab. 14) erstellt, das eine Übersicht über die in den Lehrplänen vorkommenden Begriffe geben soll. Gesichtet wurden die Lehrpläne des Faches Chemie und die fächerübergreifenden Pflichtfächer in der Sekundarstufe 1 wie *Naturwissenschaften* (Niedersachsen, Bremen, Rheinland-Pfalz), *Natur und Technik* (Bayern) und *Naturwissenschaft / Technik* (Hamburg). Realisiert wurde die Analyse zu photochemischen Inhalten in den Lehrplänen in Abhängigkeit vom Bundesland (1. Spalte) und der Sekundarstufe (2. Spalte).

Dafür wurde im **1. Schritt** innerhalb aller Lehrpläne mit der Suchfunktion zuerst nach Wortgruppen zu folgenden Suchbegriffen gesucht¹⁰⁹: **photo**, **licht**, **strahl**, **foto**, **sonne**, **solar**. Folgende Feststellungen ergaben sich aufgrund dieser quantitativen Vorgehensweise:

1. Abhängig von der Sekundarstufe ist in ca. 30 Prozent (8 von 30) der Lehrpläne keiner der Suchbegriffe zu finden (s. Tab. 14, rot hinterlegte Felder in der 3. Spalte). Unabhängig von der Sekundarstufe kommt, mit Ausnahme von Sachsen-Anhalt, in den Lehrplänen der Pflichtfächer (Chemie, Naturwissenschaften, Natur und Technik etc.) aller anderen Bundesländer (14 von 15)¹¹⁰ einer der Suchbegriffe zur Photochemie vor.
2. Da bei der Untersuchung zwischen der Sekundarstufe 1 und 2 differenziert wurde, ist zu erkennen, dass photochemische Inhalte nicht in allen Bundesländern sekundarstufenübergreifend obligatorisch sind. Beispielsweise wird in den Bildungsplänen von Baden-Württemberg *Lichtenergie* als eine mögliche Energieform aufgegriffen, in welche ein Teil „der in Stoffen gespeicherten Energie“ umgewandelt werden kann. Darauf wird jedoch offensichtlich in der Sekundarstufe 2 nicht weiter eingegangen, sodass diese spezielle Möglichkeit der Energieumwandlung dort nicht thematisiert wird [295]. Dies betrifft 6¹¹¹ der 14 Bundesländer. In 5 von 6 Fällen werden erst in den Lehrplänen der Oberstufe

¹⁰⁷ Diese Analyse wurde zuletzt Juni 2019 aktualisiert.

¹⁰⁸ Es sind lediglich die allgemeinbildenden Schulen gemeint. Die Lehrpläne für das Fach Chemie von speziellen Gymnasien wie beispielsweise technischen Gymnasien, Wirtschaftsgymnasien oder Berufsschulen etc. sind ausgeschlossen mit Ausnahme der Lehrpläne für Bayern. Da es dort keine Gymnasien ohne eine Ausbildungsrichtung gibt, werden hier die Lehrpläne der naturwissenschaftlich-technologischen Gymnasien herangezogen [294].

¹⁰⁹ Die Suche wurde ohne den Wildcard-Operator, das Sternchen (*), durchgeführt.

¹¹⁰ Die Bundesländer Berlin und Brandenburg führen dieselben Lehrpläne.

¹¹¹ Da hier bei so einer geringen, nicht veränderbaren Stichprobe von 15 (Bundesländern) keine prozentualen Angaben gemacht werden, wurde die Entscheidung getroffen, die Daten zur schnelleren Realisierung bzw. zum besseren Vergleich in absoluten Zahlen anzugeben.

Stichwörter aus dem Bereich der Photochemie genutzt wie *Solarzelle*, *Lichtabsorption*, *Fotografie*, *Photosynthese*.

Im **2. Schritt** folgt nun eine qualitative Herangehensweise. Diese soll hauptsächlich eine Hilfestellung zur Beantwortung der F. 2 sein. Hierbei wird untersucht, in welchen Fällen elektromagnetische Strahlung als Energieform explizit vorkommt.

3. In 8 der 15 Bundesländer wird Licht bzw. Strahlung¹¹² direkt als eine Energieform deklariert. Diese werden in dem Analyseraster (s. Tab. 14, 3. Spalte) durch eine grüne Hinterlegung kenntlich gemacht. In allen anderen Lehrplänen, in denen die ausgewählten Suchbegriffe zu finden sind, wird sich nicht auf die elektromagnetische Strahlung selbst fokussiert, sodass die Betonung nicht auf der Thematisierung von Licht als eine Energieform liegt. Vielmehr geht es in den meisten Fällen um die Wechselwirkung zwischen Licht und Farbe (Berlin, Brandenburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, NRW, Sachsen). D. h.: Elektromagnetische Strahlung wird demzufolge in jenen Bundesländern im Themengebiet Farbstoffchemie bzw. organische Chemie in den Lehrplänen (vielmehr nebensächlich) aufgegriffen.

Bislang wurden die photochemischen Inhalte bzw. das Thema *Lichtenergie* bei der Analyse der Lehrpläne (und auch BS) nur absolut betrachtet. Daher wird im **3. Schritt** die Lichtenergie, um einen relativen Gesamteindruck über deren Anteil in den Lehrplänen zu erhalten, ins Verhältnis zur elektrischen und thermischen Energie gesetzt. Diese sind nämlich die im Chemieunterricht erfahrungsgemäß am häufigsten behandelten Energieformen. Dazu wurde in allen Lehrplänen (s. Tab. 14) nach folgenden Schlagwortteilen gesucht: *elektr*¹¹³, *wärme*, *therm*, *temperatur*, *hitze*.

4. Auffällig ist, wie bereits erwartet, dass der Umfang des Suchergebnisses bzw. die Anzahl der gefundenen Suchergebnisse, die im Zusammenhang mit elektrischer und thermischer Energie stehen, die Menge derjenigen Suchbegriffe übertreffen, die sich auf die Lichtenergie beziehen (s. Tab. 14, 3. – 5. Spalte). Deutlich wird dadurch, dass insgesamt betrachtet die Themengebiete *Thermodynamik* bzw. Wärmechemie und *Elektrochemie* auf dem entsprechenden Stufenniveau viel häufiger angerissen werden als der Bereich der Photochemie.
5. In 12 von 15 Bundesländern ist unter den gefundenen Suchbegriffen die elektrische Energie als eine Energieform explizit aufgeführt worden. Dahingegen ist in 7 von 15 Fällen unmittelbar die Rede von thermischer Energie bzw. Wärme als einer weiteren Energieform. Die Anzahl der

¹¹² In dem KLP der Sek. 1 wird der Ausdruck *Strahlung* als einer von den „typische[n] Mechanismen des Energietransports bzw. der Übertragung“ deklariert [317].

¹¹³ Suchbegriffe wie *Redoxreaktion*, *Elektron*, *Elektronenübertragung*, die in den Lehrplänen aller Bundesländer grundsätzlich zu finden sind, jedoch nicht direkt im Zusammenhang mit der Energieform aufgeführt werden, sind in Tab. 14 nicht angegeben.

Bundesländer (8), in deren Lehrplänen elektromagnetische Strahlung unmittelbar als eine Energieform auftritt, ist vergleichsweise hoch.

Aufgrund der Tatsache, dass durch die BS den Ländern vorgeschrieben wird, die Energieumwandlung zu thematisieren, müssten demzufolge mindestens zwei Energieformen konkret im Unterricht genannt werden. Entscheidend für die Arbeit ist die Berücksichtigung der Lichtenergie in diesem Kontext. Deshalb wurde im **4. Schritt** in allen Lehrplänen nach dem Ausdruck *Energieumwandlung* gesucht. Die Suchergebnisse dazu wurden in der letzten Spalte des Analyserasters festgehalten.

6. In 6 von 28 Lehrplänen wird der gesuchte Ausdruck überhaupt nicht verwendet (s. Tab. 14, 6. Spalte, rot hinterlegte Felder). In den restlichen 22 Lehrplänen wird zwar der Fachbegriff *Energieumwandlung* eingesetzt (orange, gelb und grün hinterlegte Felder), jedoch ist nicht in allen, sondern lediglich in 15 Fällen (gelb und grün hinterlegte Felder) eine Konkretisierung, d.h. die Benennung der Energieformen, aufzufinden. In 5 dieser Lehrpläne wird als Beispiel die Lichtenergie (grün hinterlegte Felder), in 4 Fällen die thermische Energie und in 8 Fällen die elektrische Energie als "Ausgangs-" oder "Endenergieform" aufgezeigt.

Im nächsten **Schritt 5** wurden zur übersichtlicheren und kompakteren Darstellung die Farbmarkierungen aus der 3. und der 6. Spalte des Analyserasters auf jeweils eine Landkarte der deutschen Bundesländer (BL) übertragen (s. Abb. 51). Die linke Hälfte der Fläche jedes Bundeslandes steht jeweils für die Sekundarstufe 1 und die rechte Hälfte für die Sekundarstufe 2. Durch die zusätzliche Betrachtung der Suchergebnisse unabhängig von der

BL	Sek.	Lichtenergie	Elektrische Energie	Wärme / thermische Energie	Energieumwandlung
Baden-Württemberg [295]	1	Lichtenergie.	Elektrische Leitfähigkeit, Elektrolyse, elektrochemischer Energiespeicher.	Thermische Energie, thermische Eigenschaften, Schmelz- und Siedetemperatur.	Die in Stoffen gespeicherte Energie in andere Energieformen (Lichtenergie, thermische Energie, Schallenergie).
	2		Elektrische Energie, Elektrochemie, Elektrolyse, elektrochemische Energiespeicher, elektrochemische Redoxreaktionen, Elektrolysezelle, elektrochemische Doppelschicht, elektrochemische Reaktion, elektrochemische Stromquelle.	Temperaturänderung	Chemische Energie in elektrische Energie.

BL	Sek.	Lichtenergie	Elektrische Energie	Wärme / thermische Energie	Energieumwandlung
Bayern [296 – 302]	1	Kaltes Licht, Solarwasserstofftechnik, Photometrie; Lichtzerlegung, Sonne, Lichtwirkung, Sonnenuhr, Solarkollektor, Solarzelle, Photographie, Sonnenbrand, Temperaturregulation, Temperatur (im Fach <i>Natur und Technik</i>).	Elektrische Leitfähigkeit, Elektrolyse, elektrochemische Energiequelle, elektrische Energie, Elektrophorese.	Endotherm, exotherm, Wärmeleitfähigkeit, Thermitschweißen, Siedetemperatur.	Chemische Energie in elektrische Energie.
	2	Lichtenergie, Lichtabsorption, elektromagnetische Strahlung.	Elektrische Energie, Elektrophorese, Elektrolyse, elektrochemische Energiequelle.	Temperatur.	Lichtenergie in chemische Energie, elektrische in chemische Energie.
Berlin / Brandenburg [303, 304]	1	Lichterscheinung (Energie-Konzept).	Elektrolytische Zerlegung von Wasser, elektrische Leitfähigkeit.	Temperatur, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeerscheinung, endotherm, exotherm, Thermit-Verfahren.	Die in Stoffen gespeicherte Energie in andere Energieformen.
	2	Licht und Farbe.	Elektrochemische Korrosion, elektrochemische Spannungsreihe, elektrische Energie, Elektrolyse.	Thermodynamik, Reaktionswärme, Temperaturänderung, exotherm, endotherm.	Die in Stoffen gespeicherte Energie in andere Energieformen.
Bremen [305, 306]	1	Sonnenlicht, Sonne, Lichtenergie, Sonnenenergie, Sonnenstrahlen (im Fach <i>Naturwissenschaften</i>).	Elektrische Energie, Elektrolyse.	Wärmeenergie, Wärmetransportarten, Wärmeverlust (im Fach <i>Naturwissenschaften</i>).	Lichtenergie in andere Energieformen (Wärme, Bewegungs- und elektrische Energie).
	2	Energieeinstrahlung und -ausstrahlung, Strahlung und Materie, Photometrie.	Elektrochemie, Elektrolysezelle, elektrochemisches Potenzial.	Thermodynamik.	
Hamburg [307 – 309]	1	Lichtquelle, Lichtempfänger, Strahlenmodell, Sonnensystem, Sonne-Mond-Erde, Sonnenfinsternis (im Fach <i>Naturwissenschaft / Technik</i>).	Elektronenübertragung.	Taschenwärmer; Wärme, Wärmedämmmaßnahmen (im Fach <i>Naturwissenschaft / Technik</i>).	<i>Keine Konkretisierung.</i>
	2				Energiewechsel; <i>keine Konkretisierung.</i>

BL	Sek.	Lichtenergie	Elektrische Energie	Wärme / thermische Energie	Energieumwandlung
Hessen [310 – 312]	1		Elektrolyseprozesse, elektrische Leitfähigkeit, Schmelzfluss-Elektrolyse.	Wärmeleitfähigkeit, exotherm, endotherm, Schmelz- und Siedetemperatur, Erhitzen, Temperaturabhängigkeit, Temperatur-Zeit-Diagramm.	
	2	Licht und Farbe, Lichtabsorption, Energiestoffwechsel (Fotosynthese ¹¹⁴ /Zellatmung), Fotometrie, Fotovoltaik.	Elektrolyse, Elektrochemie, elektrische Energie, Chlor-Alkali-Elektrolyse, elektrische Leitfähigkeit, elektrochemische Spannungsquelle, elektrochemische Energiegewinnung, elektrochemische Nutzenenergiegewinnung, Kolbe-Elektrolyse, elektrochemische Verfahren.	Reaktionswärme.	
Mecklenburg-V. [313, 314]	1	Wärme- und Lichterscheinung.	Elektrische Leitfähigkeit, elektrischer Strom, elektrische Leiter.	Wärmeabgabe, Schmelz- und Siedetemperatur, Wärmeerscheinung, Erhitzen.	Die in Stoffen gespeicherte Energie in andere Energieformen.
	2	Licht und Farbe.	Elektrochemische Spannungsreihe, Korrosion, Elektrolyse, elektrische Energie.	Reaktionswärme, Thermodynamik, Temperaturänderung.	Chemische Energie in andere Energieformen, chemische Energie in elektrische Energie.
Niedersachsen [315, 316]	1	Lichtbündel, Ausbreitung des Lichtes (kommen im Fach <i>naturwissenschaftlicher Unterricht</i> vor), Fotosynthese.	elektrische Leitfähigkeit, Elektronenübertragungsreaktion.	Wärme, Wärmekapazität, Entropie, Schmelz- und Siedetemperatur.	<i>Keine Konkretisierung.</i>
	2	Strahlungsbilanz beim Treibhauseffekt (unter <i>Erweiterungsmöglichkeiten</i>).	Elektrochemische Zusammenhänge, Elektronenübertragungsreaktionen, Elektrolyse, elektrochemische Energiequelle.	Thermodynamik, thermische Energie, Wärme, Wärmeenergie, Temperaturabhängigkeit, Siedetemperatur, Temperaturänderung, Wärme.	

¹¹⁴ Fortlaufend wird der stimmlose f-Laut in den Wortteilen *photo*, *phon* etc. der Quelle nach buchstabengetreu geschrieben. In allen anderen Fällen mit „ph“.

BL	Sek.	Lichtenergie	Elektrische Energie	Wärme / thermische Energie	Energieumwandlung
NRW [20, 317]	1	Energie durch Strahlung.	Elektrische Energie, elektrische Spannung, elektrischer Strom, elektrochemische Reaktion, elektrochemische Spannungsreihe, Elektrolyse, elektrische Leitfähigkeit, elektrochemische Vorgänge / Phänomene.	Wärmeenergie, Wärmeleitung, Wärme, thermische Bewegung, thermische Einwirkung, exotherm, endotherm, thermische Energie, Thermodynamik.	Chemische Energie in elektrische, elektrische in chemische Energie, in Stoffen gespeicherte Energie in Wärmeenergie.
	2	Lichtabsorption (Basiskonzept <i>Energie</i>), elektromagnetische Strahlung, Solarzelle, elektromagnetisches Spektrum, Photosynthese.	Elektrochemie, elektrische Energie, elektrische Leitfähigkeit, Wasserelektrolyse, elektrochemische Korrosion, elektrochemische Energieumwandlung, elektrochemische Spannungsquelle, elektrochemische Redoxreaktion, Elektrolysezelle, elektrochemische Prozesse.	Energieübertragung von thermischer Energie, Neutralisationswärme, Reaktionswärme, thermisches Verhalten, Temperaturänderung.	Chemische Energie in elektrische.
Rheinland-Pfalz [318 – 320]	1	Licht (<i>s. 6. Spalte</i>); IR-UV-Licht, Lichtschutz, Lichtschutzfaktor, Lichtmikroskopisches Bild, Lichtjahre, Licht, Lichtenergie, Aktivierungsenergie (Licht), Lichterscheinung, Lichtverlauf (im Fach <i>Naturwissenschaften</i>).	Elektrische Leitfähigkeit, elektrische Energie, Elektrolyse, elektrochemische Energiegewinnung.	Erwärmen, Fernwärme, Vorwärme, Wärmetauscher.	Der Energieträgerwechsel (Energieabgabe) wird erkennbar an der Erwärmung, Bewegung bzw. Licht.
	2	Licht, Sonnenlicht, Sonnenenergie, photochemische Reaktionen, Solarzellen, Wechselwirkung Licht-Materie, Lichtechtheit.	Elektrische Energie.	Thermische Behandlung, thermisches Verhalten, Thermodynamik, Thermik, Wärmeenergie, Reaktionswärme.	Sonnenenergie in chemische Energie.

BL	Sek.	Lichtenergie	Elektrische Energie	Wärme / thermische Energie	Energieumwandlung
Saarland [321 – 323]	1		Elektrischer Lichtbogen, elektrische Leitfähigkeit, Elektrolyse, elektrische Ladung.	Endotherm, exotherm, Thermit-Reaktion, Thermolyse, Wärmeleitfähigkeit, Wärmeentwicklung.	<i>Keine Konkretisierung.</i>
	2	Siedehitze-Sonnenlicht-Seitenkette, Licht als Energieform, elektrischer Lichtbogen, Fotografie.	Elektrische Leitfähigkeit, elektrische Energie, Elektronenübertragungsreaktion, Elektrolyse, elektrochemische Stromquelle, elektrochemische Korrosion, elektrochemische Reaktion, elektrische Ladung.	Siedehitze, endotherm, exotherm, Thermolyse, Thermit-Reaktion, Wärme, Wärmemenge, Temperaturabhängigkeit, Temperaturänderung, Schmelz- und Siedetemperatur, Hitzedenaturierung.	
Sachsen [324]	1		Elektrische Leitfähigkeit.	exotherm, endotherm.	<i>Keine Konkretisierung.</i>
	2	Belichtung und Entwicklung eines Films, Fotografie, Lichtabsorption und Farbigkeit, Solar-Wasserstoff-Konzept.	Elektrochemische Reaktion, Elektrolyse, elektrolytische Wasserzersetzung, elektrochemische Erscheinungen zur Spannungsreihe der Metalle.	Aluminothermisches Schweißen, Thermodynamik, Wärmeentwicklung, Reaktionswärme.	<i>Keine Konkretisierung.</i>
Sachsen-Anhalt [325]	1			Reaktionswärme, exotherm, Erhitzen, endotherm, thermische Zersetzung.	<i>Keine Konkretisierung.</i>
	2		Elektrochemische Spannungsquelle, Elektrolyse.		
Schleswig-Holstein [326]	1		Elektrolyse, elektrochemische Reaktion, elektrische Energie.	Exotherm, endotherm, Schmelz- und Siedetemperatur.	Umwandlung von chemischer Energie in andere Energieformen.
	2	Licht (<i>vertiefend für das Profulfach Chemie</i>).	Elektrische Energie, Elektrolyse, Elektronenübertragungsreaktion, Elektrochemie, elektrochemische Reaktion, Elektrolysezelle, elektrochemische Stromquelle,	Thermische Verfahren, exotherm, endotherm, Temperaturänderung, Siede- und Schmelztemperatur, Wärme, Wärmeleitfähigkeit.	Umwandlung von chemischer in elektrische Energie.

BL	Sek.	Lichtenergie	Elektrische Energie	Wärme / thermische Energie	Energieumwandlung
			elektrochemische Doppelschicht, elektrochemische Vorgänge / Prozesse, elektrochemische Speicher- und Umwandlungsprozesse, elektrochemisches Produktionsverfahren, elektrochemische Korrosion.		
Thüringen [327]	1		Elektrische Leitfähigkeit.	Exotherm, endotherm, Schmelztemperatur.	<i>Keine Konkretisierung.</i>
	2	Fotografischer Prozess, Fotografie.	Elektrochemie, elektrochemische Indikation, elektrochemische Doppelschicht, Elektrolyse, elektrochemische Reaktion, Schmelzflusselektrolyse, Elektrolysezelle, Chlor-Alkali-Elektrolyse, elektrische Leitfähigkeit, elektrochemische Spannungsreihe.	Thermische Behandlung, thermische Verhalten, Thermodynamik, Thermik, Wärmeenergie, Reaktionswärme.	<i>Keine Konkretisierung.</i>

Tab. 14: Analyseraster für die Analyse der Lehrpläne der Sekundarstufe 1 und 2 des Gymnasiums in allen Bundesländern.

Sekundarstufe (s. Abb. 52) wurde zudem aufgezeigt, in welchen Bundesländern mindestens einmal in der Schullaufbahn eines Schülers im Chemieunterricht elektromagnetische Strahlung als eine Energieform laut Lehrplan theoretisch deklariert und thematisiert wird.

7. Durch Abb. 52 wird auffällig, dass diejenigen Bundesländer, welche die elektromagnetische Strahlung als eine Energieform einführen (s. Abb. 52a) und diejenigen, die die Lichtenergie im Zusammenhang mit dem Thema *Energieumwandlung* aufführen, mit einigen Ausnahmen hauptsächlich im Süden Deutschlands liegen. Die Verankerung jener photochemischen Aspekte in den Lehrplänen der südlichen Bundesländer kann von vielen Faktoren abhängen. Mögliche Gründe hierfür könnten aufgrund der geographisch gesehen günstigen Lage energiewirtschaftliche Faktoren sein, die sich in der Bildungspolitik somit widerspiegeln.

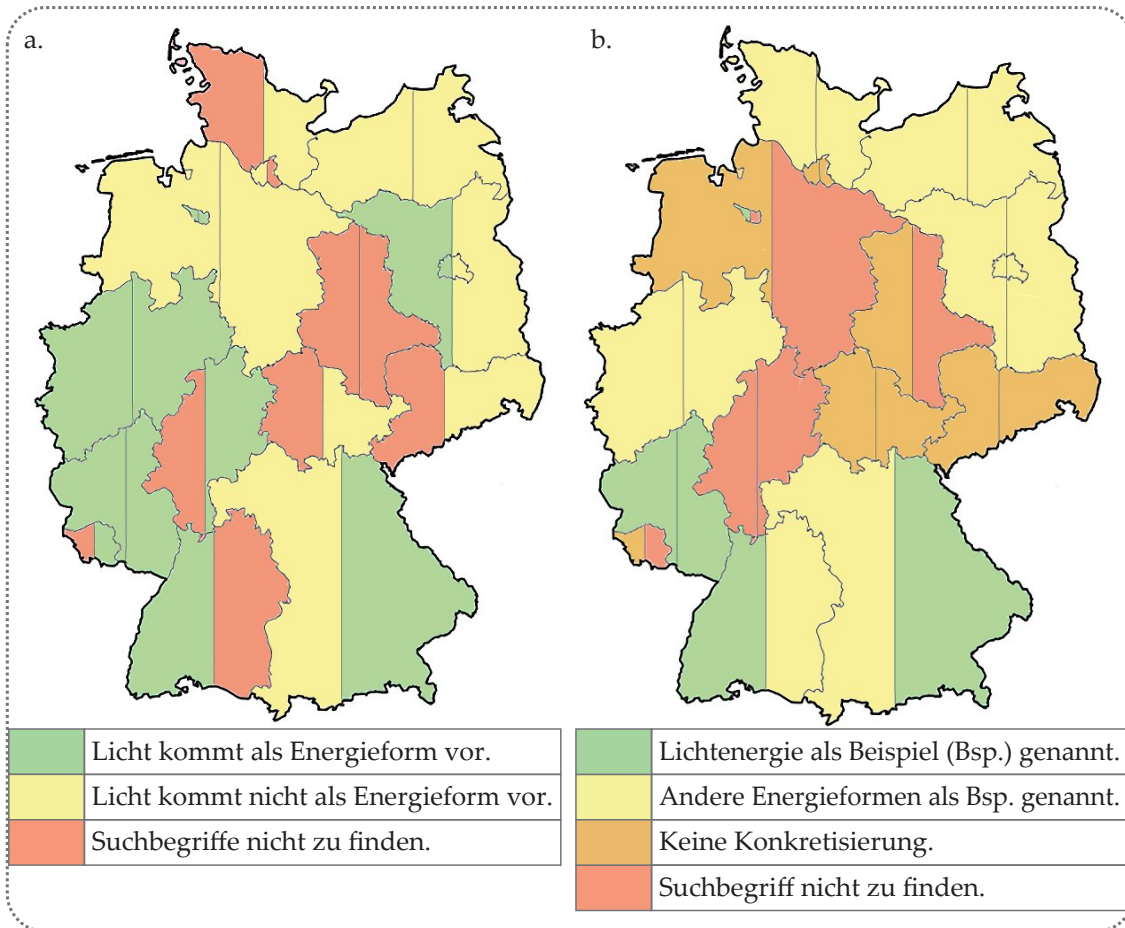


Abb. 51: Darstellung der Markierung a. in der 3. Spalte und b. in der 6. Spalte der Tab. 14 mithilfe einer Landkarte (Quelle der Landkarte: [328]). Die linke Hälfte der Bundesländer stellt die Inhalte der Sek. 1 und die rechte Hälfte die Inhalte der Sek. 2 farbige dar.

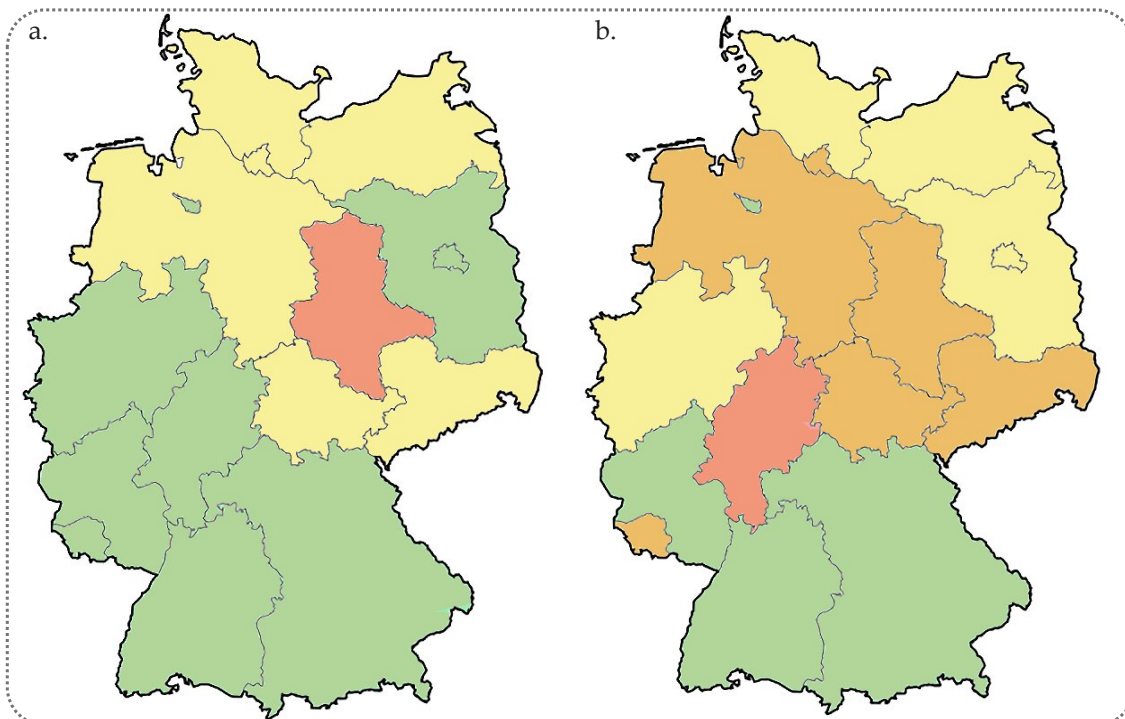


Abb. 52: Darstellung der Markierung a. in der 3. Spalte und b. in der 6. Spalte der Tab. 14 mithilfe einer Landkarte unabhängig von der Sekundarstufe.

Im nächsten **Schritt 6** wurden zur Aufklärung dieser Vermutung in Punkt 7 weitere Daten hinzugenommen.

8. Anhand der Grafik zur Globalstrahlung auf Deutschland (s. Abb. 53) ist ein Zusammenhang zwischen der Aussage dieser Grafik und der Feststellung aus Punkt 7 zu erkennen. In den südlichen Bundesländern ist die durchschnittliche jährliche Summe der Globalstrahlung deutlich höher als in den nördlichen.

9. Weiterhin wird zudem die Leistung der neu installierten Photovoltaik-Anlagen in Deutschland herangezogen (s. Abb. 54). Auch hierdurch findet die Vermutung aus Punkt 7 eine Bestätigung: Viele der Bundesländer, in denen in den entsprechenden Jahren die Photovoltaikanlagen eine hohe Leistung zeigten, welche selbstverständlich stark von der Globalstrahlung abhängt, (wie Bayern, Baden-Württemberg, Berlin, NRW) haben in ihren Lehrplänen die elektromagnetische Strahlung als eine Energieform ausgewiesen. Eine scheinbare, mögliche Korrelation ist bereits durch den Vergleich der Abb. 52a mit Abb. 54 (2009) feststellbar.

10. In den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen hat in den letzten 9 Jahren die Leistung der neu installierten Photovoltaikanlagen zugenommen (s. Abb. 54). Jedoch ist in den Lehrplänen dieser Länder weder die unmittelbare Deklarierung der Lichtenergie noch die Konkretisierung der Energieumwandlung am Beispiel der Lichtenergie zu finden (vgl. Tab. 14; Abb. 52).

11. Tatsächlich wurden in den meisten in Abb. 52 grün hinterlegten Bundesländern im Jahr 2018 laut dem deutschen Online-Portal für Statistik *Statista* zugleich die meisten Photovoltaikanlagen gebaut (s. Abb. 55, grüne Ziffern). Da jedoch diese Daten hier unabhängig von der Flächengröße der Bundesländer dargestellt sind, wurde deshalb die Anzahl der Photovoltaikanlagen durch die Flächengröße (in km²) des jeweiligen Bundeslandes geteilt bzw. die Dichte der Photovoltaikanlagen im jeweiligen Bundesland berechnet. Die Werte wurden mit einem

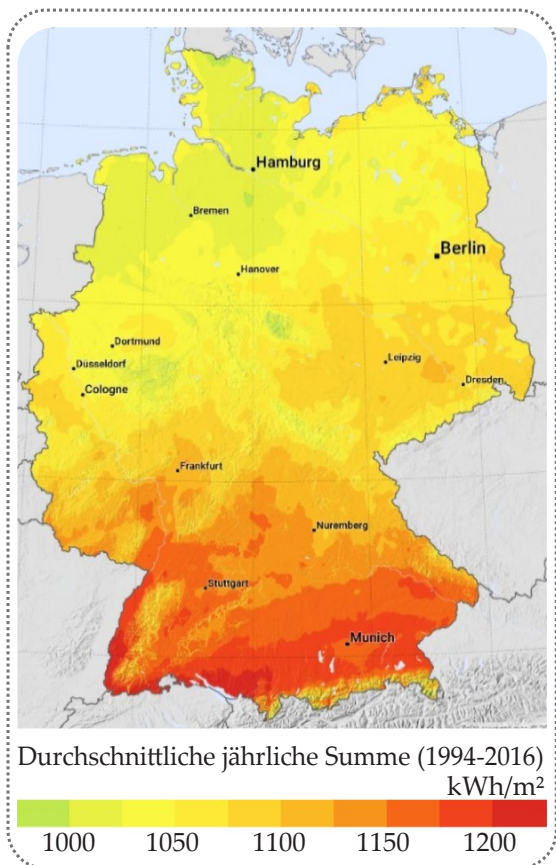


Abb. 53: Globalstrahlung auf Deutschland [329].

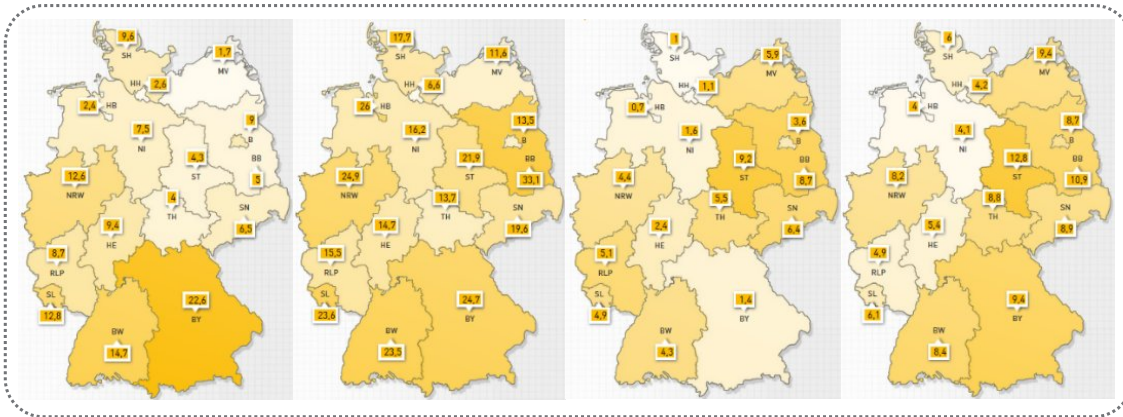


Abb. 54: Leistung neu installierter Photovoltaikanlagen in Deutschland in kWp (in den Jahren 2009, 2011, 2016, 2018; von links nach rechts) [330].

weiteren Säulendiagramm aufgetragen (s. Abb. 56). Dennoch lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Thematisierung der Lichtenergie in den Lehrplänen und der Dichte von Photovoltaikanlagen erkennen (s. Abb. 56, grüne Ziffern).

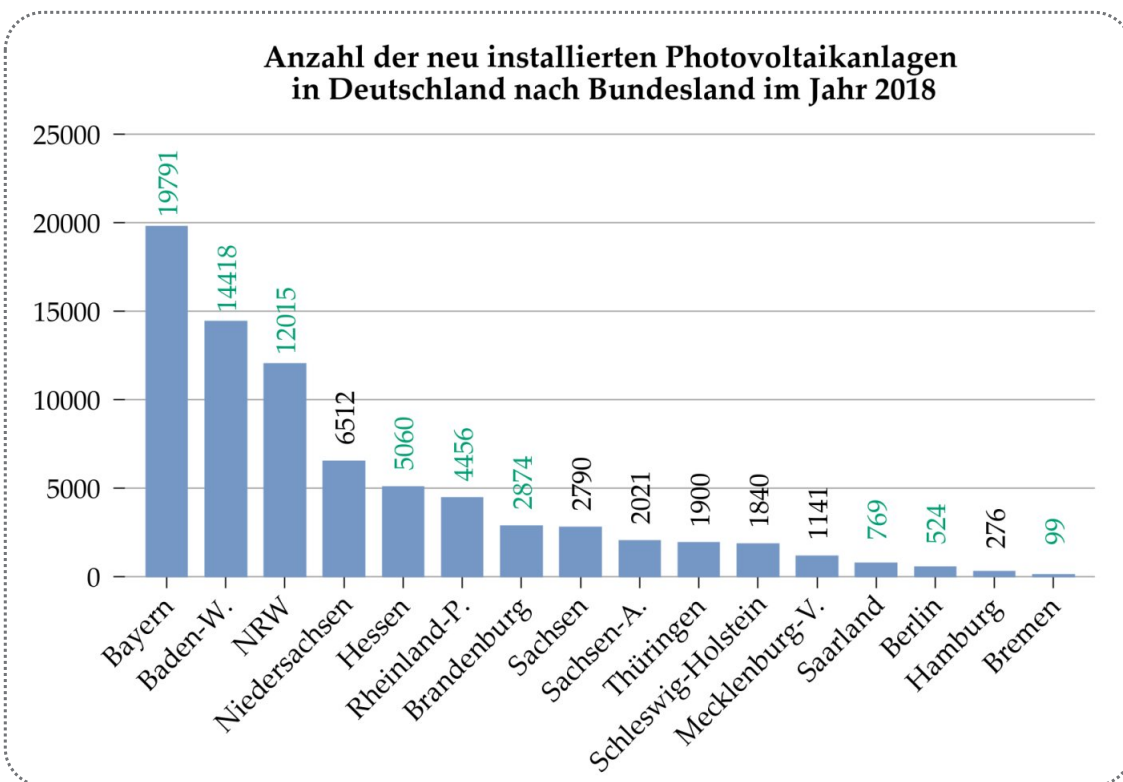


Abb. 55: Anzahl der neu installierten Photovoltaikanlagen in Deutschland nach Bundesland im Jahr 2018 [331].

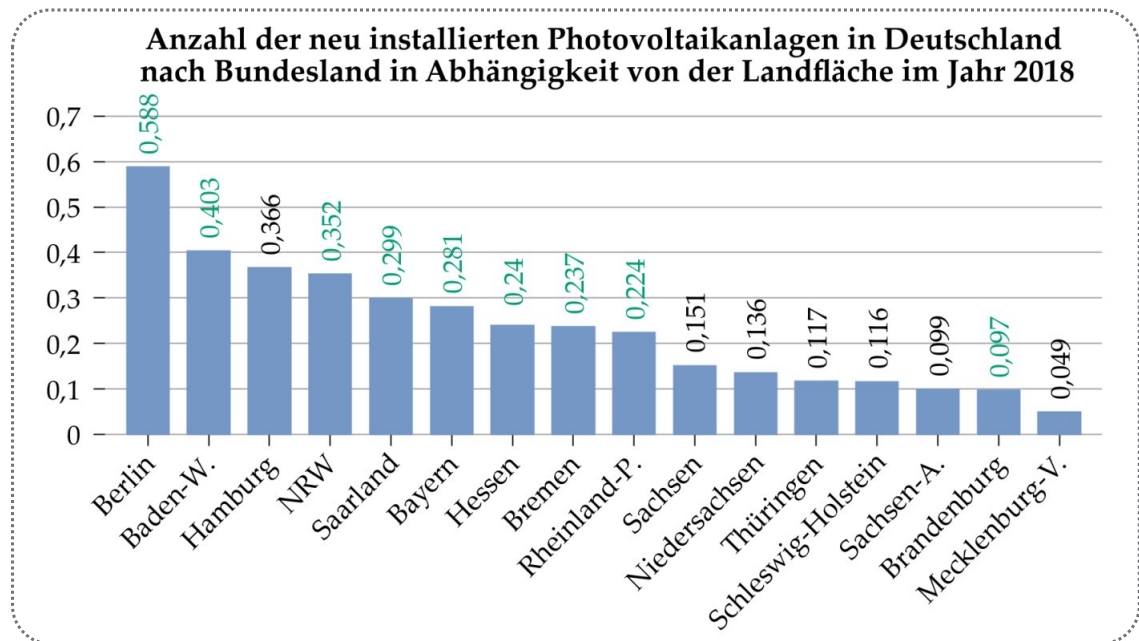


Abb. 56: Anzahl der neu installierten Photovoltaikanlagen in Deutschland nach Bundesland in Abhängigkeit von der Landfläche im Jahr 2018. (Die Flächengrößen der Bundesländer wurden folgender Quelle entnommen: [332].)

3.2.3.1 Kernlehrpläne des Faches Chemie in NRW

Im Folgenden werden die Kernlehrpläne für die Sekundarstufe 1 und 2 der Gymnasien und Gesamtschulen für das Fach Chemie näher untersucht. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Beantwortung der Forschungsfrage F. 3 (s. Kap. 3.2).

Um in erster Linie theoretisch denkbare Andockstellen und Einsatzmöglichkeiten für photochemische Inhalte im Chemieunterricht festzustellen und die thematische Integration der elektromagnetischen Strahlung als eine Energieform über Schülerexperimente praktisch zu erreichen, wird im **ersten Schritt** die Beschreibung des Basiskonzepts *Energie* analysiert. Die Funktion von Basiskonzepten wird im Kernlehrplan allgemein wie folgt erläutert (vgl. Kap. 3.2.2):

„Der kumulative Aufbau komplexen Fachwissens erfolgt – den KMK-Bildungsstandards folgend – in strukturierten Basiskonzepten. [...] Die besondere Bedeutung der Basiskonzepte für das Lernen besteht darin, dass mit ihrer Hilfe schulische Inhalte der einzelnen naturwissenschaftlichen Fächer sinnvoll strukturiert werden und die fachlichen Beziehungen durch den Konzeptgedanken über die gesamte Lernzeit miteinander verbunden werden können. Basiskonzepte bilden als strukturierte Wissensbestände den Rahmen, in dem neue Erfahrungen mit schon erworbenen Kenntnissen verbunden werden. Sie erleichtern so den kontinuierlichen Aufbau von fachlichen Kompetenzen im Sinne kumulativen Lernens und den Erwerb eines grundlegenden, vernetzten Wissens.“ [317]

Demzufolge kann das Basiskonzept *Energie* in allen Inhaltsfeldern bzw. verschiedenen Kontexten eine unterschiedlich starke Rolle spielen. Außerdem wird hier indirekt auf die Kumulativität des Chemieunterrichts hingewiesen. D. h.: Durch kumulativ verlaufende Lernprozesse wird die Erweiterung und Vertiefung der fachlichen Kompetenzen des Schülers erreicht [288, 333]. Die Schüler werden mit dem Basiskonzept *Energie* innerhalb unterschiedlicher Themenfelder und mit stufenweise ansteigendem Leistungsniveau iterativ konfrontiert. In solch einem Fall spricht BRUNER von dem Konzept eines *spiral curriculum* [334]. Orientiert an BRUNERS Konzept beschreiben HARDEN und STAMPER dieses wie folgt:

„A spiral curriculum is one in which there is an iterative revisiting of topics, subjects or themes throughout the course. A spiral curriculum is not simply the repetition of a topic taught. It requires also the deepening of it, with each successive encounter building on the previous one.“ [335]

Folglich bedeutet dies, dass die Angaben zum Basiskonzept *Energie* aus dem KLP der Sekundarstufe 1 fortwährend auch für den Chemieunterricht in der Oberstufe gelten.

In dem KLP der Sekundarstufe 1 heißt es zum Basiskonzept *Energie*, dass es ausreichend sei, im Unterricht die „Energien von Anfangs- und Endzuständen zu bilanzieren“ [317]. Zwar wird an dieser Stelle noch nicht zwischen den Energieformen unterschieden, jedoch an einer anderen. Weiter unten heißt es:

„Zum ersten Verständnis reicht es völlig aus, wenn Schülerinnen und Schüler an Beispielen beschreiben, dass z. B. Energie durch Strahlung transportiert oder durch Kraftwirkung übertragen wird, dass thermische Energie durch Kontakt, elektrische Energie durch elektrischen Strom übertragen wird.“ [317]

Somit wird unter anderem auch die elektromagnetische Strahlung bzw. die Lichtenergie als Energieform angeführt, sodass vermutet wird, dass in den im KLP ausformulierten Kompetenzen diese Angabe ihre Berücksichtigung findet (s. u.). Zudem wird das Basiskonzept *Energie* mit den Erfahrungen der Schüler aus ihrem Alltag legitimiert:

„Schülerinnen und Schüler erkennen schon im Anfangsunterricht an Beispielen wie der **Nahrungsaufnahme** und **-umsetzung**, der **Nutzung von Geräten im Alltag** und bei chemischen Reaktionen, dass gespeicherte oder bereitgestellte Energie transportiert und in ihren **Erscheinungsformen** umgewandelt werden kann. [...] Sie erkennen z. B., dass der Ablauf chemischer Reaktionen mit Energieumsätzen verbunden ist. Sie beobachten und beschreiben Energieumwandlungen in der **Natur**, z. B. bei der **Fotosynthese** oder bei der **Zellatmung**, und in der **Technik** [...], bei denen Energie mit der Umgebung ausgetauscht wird, unter systemischen Aspekten.“ [317]

Ein weiterer Aspekt, der seinen Platz in der Beschreibung des Basiskonzepts *Energie* findet, ist die Thematisierung der zukünftigen Energieversorgung aufgrund der bevorstehenden *Ressourcenverknappung* fossiler Brennstoffe [317]. Auch für diese Herangehensweise an das Thema *Energie* bzw. „für eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen“ sollen Schüler im Chemieunterricht sensibilisiert werden [317]:

„Ein so weit entwickeltes konzeptuelles Verständnis versetzt Schülerinnen und Schüler auch in die Lage, Bedeutung und Nutzen ebenso wie **Gefahren der extensiven Energienutzung** durch den Menschen einzuschätzen und verschiedene **Möglichkeiten der Energiegewinnung, -aufbereitung und -nutzung** unter **naturwissenschaftlich-technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Aspekten** zu vergleichen und zu bewerten sowie deren gesellschaftliche Relevanz und Akzeptanz zu diskutieren.“ [317]

Dass das Fach Chemie als eines der naturwissenschaftlichen Fächer einen bedeutenden Beitrag zur *Scientific Literacy*¹¹⁵ der Lernenden leistet, wird auch an anderer Stelle in dem KLP sehr deutlich. Im Lehrplan der Sekundarstufe 1 befindet sich folgender Hinweis:

„Im Biologie- und Physikunterricht haben die Schülerinnen und Schüler bis zum Ende der Jahrgangsstufe 6 das Konzept zur Energie soweit entwickelt, dass sie

- an Vorgängen aus ihrem Erfahrungsbereich Speicherung, Transport und Umwandlung von Energie aufzeigen
- in Transportketten Energie halbquantitativ bilanzieren und dabei die Idee der Energieerhaltung zugrunde legen
- an Beispielen (Heizen, Bremsen, Abkühlen) zeigen, dass Energie als Wärme in die Umgebung abgegeben wird, nicht weiter genutzt werden kann und damit vollständig entwertet ist.

Wird mit dem Chemieunterricht in der Jahrgangsstufe 7 begonnen, können diese genannten Kompetenzen vorausgesetzt werden.“ [317]

Dieser Hinweis deutet darauf hin, dass unter anderem im Hinblick auf das Basiskonzept *Energie* Schnittstellen zu anderen naturwissenschaftlichen Fächern bestehen, sodass Synergieeffekte über Kooperationen von Lehrenden ausgenutzt werden könnten (s. Kap. 3.2.1). Vorgesehen ist laut dem KLP der Sekundarstufe 1 sogar ein Inhaltsfeld, das explizit das Thema *Energie* betrifft:

¹¹⁵ Die *Organisation for Economic Cooperation and Development* (OECD) definiert *Scientific Literacy*, zu deutsch die naturwissenschaftliche Grundbildung, wie folgt: „Scientific literacy is the capacity to use scientific knowledge, to identify questions and to draw evidence-based conclusions in order to understand and help make decisions about the natural world and the changes made to it through human activity“ [336].

Inhaltsfeld	Fachlicher Kontext
Energie aus chemischen Reaktionen	Zukunftssichere Energieversorgung
<ul style="list-style-type: none"> • Beispiel einer einfachen Batterie • Brennstoffzelle • Alkane als Erdölprodukte • Bioethanol oder Biodiesel • Energiebilanzen 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilität – die Zukunft des Autos • Nachwachsende Rohstoffe • Strom ohne Steckdose

Tab. 15: Inhaltsfeld *Energie aus chemischen Reaktionen* und der fachliche Kontext dazu aus dem KLP der Sekundarstufe 1 [317].

Dort wird der Ausdruck *Strom ohne Steckdose* verwendet. Demzufolge sollen Schüler mobile Energiequellen kennenlernen, die einen Beitrag zur zukunftsicheren Energieversorgung leisten könnten. Die Konkretisierung, die Wahl und Ausführung des Kontexts liegen dabei in der Verantwortung des Lehrenden. Natürlich bleibt dadurch die Option offen, die Solar- bzw. Lichtenergie als eine Ausgangsenergieform im Prozess von mobilen Energiequellen einzubeziehen.

In **Schritt 2** werden nun die konkreten Ziele des Chemieunterrichts im Hinblick auf die Fähigkeiten und Fertigkeiten der Schüler genauer beleuchtet. In den Bildungsstandards werden als Ziele des Unterrichts *Kompetenzen* formuliert, „über die Schüler nach erfolgreichem Durchlaufen von Unterricht verfügen sollen“ [290] (vgl. Definition in Kap. 3.2.1). Anhand der Bildungsstandards werden also Maßstäbe definiert, „nach denen der *Output* erfasst und bewertet werden kann“ [291]. Das bedeutet, dass sich nicht mehr an dem Input der Lehrenden, sondern „an den Leistungen der Schule, vor allem an den Lernergebnissen der Schülerinnen und Schüler“ [291] orientiert wird, wobei „als Outputfaktoren keineswegs nur die erzielten fachlichen Leistungen der Schüler gelten [müssen], vielmehr sind auch fachübergreifende Kompetenzen sowie erworbene Einstellungen und Haltungen dazu zu zählen“ [337]. Auch in den Kernlehrplänen des Landes NRW wird die Output-Orientierung fortgesetzt und es werden sowohl *konzeptbezogene* als auch *prozessbezogene Kompetenzen* angeführt [20]. Letztere beschreiben laut dem KLP für die Sek. 1 die *Handlungsdimension*, indem sie sich auf die naturwissenschaftlichen Handlungs- und Denkweisen beziehen, und die konzeptbezogenen Kompetenzen dahingegen beschreiben die *Inhaltsdimension*. Sie legen das Fachwissen fest, indem sie sich auf die naturwissenschaftlichen Basiskonzepte aus den BS und die mit ihnen verbundenen Vorstellungen und Begriffe beziehen [317]. Es wurden alle Kompetenzen aus den beiden Lehrplänen (Sek. 1 und 2) herausgesucht, die unmittelbar dem Basiskonzept *Energie* zuzuordnen sind (s. Tab. 16).

Kompetenzen aus dem Kernlehrplan der Sekundarstufe 1
Die Schülerinnen und Schüler haben das Konzept der Stoffumwandlung zum Konzept der chemischen Reaktion so weit entwickelt, dass sie ...
... Stoffumwandlungen in Verbindung mit Energieumsätzen als (photochemische/) chemische Reaktion deuten.
... Verbrennungen als Reaktionen mit Sauerstoff (Oxidation) deuten, bei denen Energie freigesetzt wird.
Die Schülerinnen und Schüler haben das Konzept der chemischen Reaktion so weit differenziert, dass sie ...
... Stoff- und Energieumwandlungen als Veränderung in der Anordnung von Teilchen und als Umbau chemischer Bindungen erklären.
... elektrochemische Reaktionen (Elektrolyse und elektrochemische Spannungsquellen) nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip als Aufnahme und Abgabe von Elektronen deuten, bei denen Energie (wie z. B. Lichtenergie) umgesetzt wird.
... Prozesse zur Bereitstellung von Energie erläutern.
Die Schülerinnen und Schüler haben das Konzept der Energie so weit entwickelt, dass sie ...
... (photochemische/) chemische Reaktionen energetisch differenziert beschreiben , z. B. mit Hilfe eines Energiediagramms.
... Energie (/Lichtenergie) gezielt einsetzen , um den Übergang von Aggregatzuständen herbeizuführen (z. B. im Zusammenhang mit der Trennung von Stoffgemischen).
... Siede- und Schmelzvorgänge energetisch beschreiben .
... erläutern, dass bei einer chemischen Reaktion immer Energie aufgenommen oder abgegeben wird.
... energetische Erscheinungen bei exothermen chemischen Reaktionen auf die Umwandlung eines Teils der in Stoffen gespeicherten Energie in Wärmeenergie zurückführen, bei endothermen Reaktionen den umgekehrten Vorgang erkennen.
... konkrete Beispiele von Oxidationen (Reaktionen mit Sauerstoff) und Reduktionen als wichtige chemische Reaktionen benennen sowie deren Energiebilanz qualitativ darstellen.
... erläutern, dass zur Auslösung (/zum Antrieb) einiger chemischer Reaktionen Aktivierungsenergie (/Antriebsenergie wie z. B. Lichtenergie) nötig ist, und die Funktion eines Katalysators deuten.
... das Prinzip der Gewinnung nutzbarer Energie durch Verbrennung (/Bestrahlung) erläutern.
... vergleichende Betrachtungen zum Energieumsatz durchführen.
... beschreiben, dass die Nutzung fossiler Brennstoffe zur Energiegewinnung einhergeht mit der Entstehung von Luftschadstoffen und damit verbundenen negativen Umwelteinflüssen (z. B. Treibhauseffekt, Wintersmog) (und diskutieren alternative Energiequellen wie z. B. Solarenergie als Lösungsansatz .)
Die Schülerinnen und Schüler haben das Konzept der Energie so weit differenziert, dass sie ...
... die bei (photochemischen/) chemischen Reaktionen umgesetzte Energie quantitativ einordnen.
... erläutern, dass Veränderungen von Elektronenzuständen mit Energieumsätzen verbunden sind.
... die Umwandlung von (photochemischer/) chemischer in elektrische Energie und umgekehrt von elektrischer in chemische Energie bei elektrochemischen Phänomenen beschreiben und erklären.
... das Funktionsprinzip verschiedener (photochemischer/) chemischer Energiequellen mit angemessenen Modellen beschreiben und erklären (z. B. einfache Batterie, Brennstoffzelle).
... die Nutzung verschiedener Energieträger (Atomenergie, Oxidation fossiler Brennstoffe, elektrochemische Vorgänge, erneuerbare Energien) aufgrund ihrer jeweiligen Vor- und Nachteile kritisch beurteilen.

Kompetenzen aus dem Kernlehrplan der Sekundarstufe 2
Aus dem Inhaltsfeld 1, Kohlenstoffverbindungen und Gleichgewichtsreaktionen
Die Schülerinnen und Schüler ...
... interpretieren ein einfaches Energie-Reaktionsweg-Diagramm.
Aus dem Inhaltsfeld 3, Elektrochemie
Die Schülerinnen und Schüler ...
... erläutern und berechnen mit den Faraday-Gesetzen Stoff- und Energieumsätze bei elektrochemischen Prozessen.
... erläutern die Umwandlung von chemischer Energie (Lichtenergie) in elektrische Energie (Lichtenergie) und deren Umkehrung.
... recherchieren Informationen zum Aufbau (lichtgetriebener mobiler Energiequellen) und präsentieren mithilfe adressatengerechter Skizzen die Funktion wesentlicher Teile sowie Lade- und Entladevorgänge (von beispielsweise lichtgetriebenen Energiequellen).
... argumentieren fachlich korrekt und folgerichtig über Vorzüge und Nachteile unterschiedlicher mobiler Energiequellen (Energiequellen wie die Sonne, Lampe etc.) und wählen dazu gezielt Informationen aus.
... vergleichen und bewerten innovative (beispielsweise lichtgetriebene) und herkömmliche elektrochemische Energiequellen .
... diskutieren die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung der Gewinnung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie (von Solarenergie) in der Chemie.
... diskutieren Möglichkeiten der elektrochemischen Energiespeicherung (beispielsweise von Sonnenenergie) als Voraussetzung für die zukünftige Energieversorgung .

Tab. 16: Kompetenzen aus den KLPen der Sek. 1 und 2, die im direkten Zusammenhang zum Basiskonzept *Energie* stehen [20, 317].

Zwar wird in keiner der Kompetenzbeschreibungen Lichtenergie erwähnt, dafür aber die Wärme oder elektrische Energie. Werden jedoch die Kompetenzen unabhängig von der angeführten Energieform betrachtet, so ist deutlich zu erkennen, dass sie genauso gut auf die Lichtenergie übertragbar sind und der Lehrende sich bei der Nutzung von photochemischen Inhalten auf diese berufen kann. Dahingehend wurden mögliche alternative Formulierungen bzw. Ergänzungen in grauer Schrift zu den Kompetenzen (s. Tab. 16) hinzugefügt. Fraglich ist, obwohl es ein übergeordnetes Basiskonzept namens Energie gibt, warum an keiner Stelle in den Kompetenzen, neben der Wärme und der elektrischen Energie, die elektromagnetische Strahlung vorkommt. Außerdem ist diese anfänglich in den Erläuterungen des Basiskonzepts als eine mögliche Energieform mit angegeben. Nichtsdestotrotz spielen folgende Ausdrücke in den KLPen eine Rolle [20, 317]: *Möglichkeiten der Energiegewinnung; Gewinnung nutzbarer Energie; Gewinnung, Speicherung und Nutzung von Energie; erneuerbare Energien; zukünftige Energieversorgung; Energieversorgung der Zukunft; zukunftssichere Energieversorgung; nachhaltige Nutzung von Ressourcen; Ressourcenschonung; Fragen der Ressourcenverknappung; nachhaltiger Umgang mit Ressourcen.* (Letzterer ist sogar ein fachlicher Kontext zum Inhaltsfeld *Wasser und Luft*.) Diese Feststellung spricht nicht nur für die Zukunftsorientierung und die Förderung der Problemlösekompetenzen der Schüler, sondern damit

einhergehend auch für die Sinnhaftigkeit der Einbeziehung erneuerbarer Energien wie Lichtenergie in den Chemieunterricht. Außerdem könnten photochemische Experimente zur exemplarischen und praktischen Integration jener fachwissenschaftlichen Ausdrücke verhelfen.

Insgesamt betrachtet öffnet sich eine Tür in eine weitere Welt chemischer Prozesse, nämlich die der Photochemie, die im Vergleich mit Wärmechemie und Elektrochemie nicht von geringerer Bedeutung für die Forschung und somit auch für die Zukunft ist. Nicht zuletzt heißt es im KLP für die Sek. 2 zu den *Aufgaben und Zielen des Faches*, dass naturwissenschaftliche Fächer „zur Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen, auch für kommende Generationen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung“ beitragen [20].

3.2.3.2 Kernlehrpläne weiterer naturwissenschaftlicher Fächer

Neben der vertikalen Vernetzung ist auch eine horizontale Vernetzung von Wissen durch die von den BS vorgegebenen Basiskonzepten für die naturwissenschaftlichen Fächer realisierbar, vielmehr unumgänglich. Aufgrund dessen wird es notwendig, zusätzlich die KLPe der Nachbarfächer der Chemie zu prüfen, um auch aus diesen potenzielle Legitimationen für photochemische Experimente herauszukristallisieren. Zum Analysegegenstand gehören deshalb die Lehrpläne der zwei weiteren in allen Bundesländern obligatorischen naturwissenschaftlichen Fächer: Biologie und Physik. Exemplarisch werden hier die KLPe des Landes NRW untersucht.

In dem KLP des Faches Biologie für die Sekundarstufe 1 wird auf die Bedeutung der *Lichtenergie* unter der Differenzierung *Stoff- und Energieumwandlung* des Basiskonzepts *Struktur und Funktion* im Kontext der Photosynthese einmal explizit hingewiesen. Die dazu kausalen zwei Kompetenzen in dem KLP sind folgende:

Kompetenzen aus dem Kernlehrplan der Sekundarstufe 1
Schülerinnen und Schüler ...
... beschreiben die Fotosynthese als Prozess zum Aufbau von Glucose aus Kohlenstoffdioxid und Wasser mit Hilfe von Lichtenergie unter Freisetzung von Sauerstoff.
... erklären das Prinzip der Fotosynthese als Prozess der Energieumwandlung von Lichtenergie in chemisch gebundene Energie.

Tab. 17: Kompetenzen aus dem KLP des Faches Biologie für die Sek.1, in die explizit der Begriff *Lichtenergie* integriert ist [146].

In dem KLP der Sek. 2 kommen zwar Begriffe wie *Energieumwandlung*, *Energiefluss*, *Energieumsatz* und *Energiestoffwechsel* vor, jedoch wird de facto die Lichtenergie an keiner Stelle als eine Konkretisierung der Energieform angeführt. Im Gegensatz zum KLP des Faches Chemie ist das Thema *Fotosynthese* sowohl in der Unter- als auch in der Oberstufe obligatorisch, sodass anhand dessen exemplarisch *natürliche Stoffkreisläufe* und *Energieumwandlungen* aufgezeigt werden (s. Tab. 18).

Kompetenzen aus dem Kernlehrplan der Sekundarstufe 2
Schülerinnen und Schüler ...
... erläutern mithilfe einfacher Schemata das Grundprinzip der Energieumwandlung in den Fotosystemen und den Mechanismus der ATP-Synthese.
... präsentieren unter Einbezug geeigneter Medien und unter Verwendung einer korrekten Fachsprache die aerobe und anaerobe Energieumwandlung in Abhängigkeit von körperlichen Aktivitäten.
... leiten aus Forschungsexperimenten zur Aufklärung der Fotosynthese zu Grunde liegende Fragestellungen und Hypothesen ab.

Tab. 18: Kompetenzen aus dem KLP des Faches *Biologie* für die Sek. 2 im Zusammenhang mit dem Thema *Fotosynthese* [147].

Die thematische Einbeziehung von Licht in den Physikunterricht scheint nach den Angaben in den KLPen des Faches *Physik* im Vergleich zur Biologie und Chemie sehr markant und viel häufiger der Fall zu sein. Dafür sprechen vier Anzeichen:

1. Wie auch in dem KLP des Faches *Chemie* heißt für das Fach *Physik* eines der Basiskonzepte *Energie*. Außerdem findet sich in dessen KLP die gleiche Beschreibung. D. h.: Auch hier wird die Strahlung als ein Mechanismus zur Energieübertragung beschrieben [144]. Daneben wird im Basiskonzept *System* die *Wirkung der Sonneneinstrahlung* erwähnt und, wie folgt, schließlich auch in dem Basiskonzept *Wechselwirkung*:

„Wechselwirkungen spielen schließlich auch bei Strahlung eine Rolle. Schülerinnen und Schüler erfahren körperlich die Wirkung von Wärmestrahlung und Licht, etwas indirekter auch von UV-Strahlung. Im Physikunterricht untersuchen sie weitere Wechselwirkungen mit besonderen Körpern. Licht etwa kann unter bestimmten Bedingungen reflektiert, absorbiert, gebrochen oder auch in Farbbestandteile zerlegt werden. Strahlung kann aber auch den Körper verändern, mit dem sie wechselwirkt. Dies gilt in besonderem Maße für hochenergetische ionisierende elektromagnetische Strahlung und für Strahlung von Teilchen aus radioaktiven Zerfällen.“ [144]

2. Sowohl in dem KLP der Sek. 1 als auch der Sek. 2 kommen die Ausdrücke *elektromagnetische Strahlung* bzw. *Licht* explizit entweder als Inhaltsfelder oder als inhaltliche Schwerpunkte von diesen vor. In der Unterstufe sind es die folgenden zwei Inhaltsfelder, die sich thematisch mit dem Licht befassen:

Inhaltsfeld	Fachlicher Kontext
Das Licht und der Schall	Sehen und Hören
Licht und Sehen, Lichtquellen und Lichtempfänger, geradlinige Ausbreitung des Lichts; Schatten, Mondphasen; Schallquellen und Schallempfänger, Reflexion, Spiegel; Schallausbreitung, Tonhöhe und Lautstärke	<ul style="list-style-type: none"> • Sicher im Straßenverkehr – Augen und Ohren auf! • Sonnen- und Mondfinsternis • Physik und Musik

Inhaltsfeld	Fachlicher Kontext
Optische Instrumente, Farbzerlegung des Lichts	Optik hilft dem Auge auf die Sprünge
Aufbau und Bildentstehung beim Auge – Funktion der Augenlinse; Lupe als Sehhilfe, Fernrohr; Brechung, Reflexion, Totalreflexion und Lichtleiter; Zusammensetzung des weißen Lichts	<ul style="list-style-type: none"> • Mit optischen Instrumenten „Unsichtbares“ sichtbar gemacht • Lichtleiter in Medizin und Technik • Die Welt der Farben • Die ganz großen Sehhilfen: Teleskope und Spektroskope

Tab. 19: Inhaltsfelder, die das Licht thematisieren, aus dem KLP des Faches Physik für die Sek. 1 [144].

In der Oberstufe wird in dreien der fünf Inhaltsfelder elektromagnetische Strahlung thematisiert (Tab. 20). In Tab. 20 wurden zum Inhaltsfeld 4 *Quantenphysik* zusätzlich noch die inhaltlichen Angaben zu den Basiskonzepten festgehalten, um auf die Dimensionen der Einbeziehung elektromagnetischer Strahlung in der Physik im Vergleich zum Fach Chemie aufmerksam zu machen.

Inhaltsfeld 2: Relativitätstheorie	
Inhaltliche Schwerpunkte	Mögliche Kontexte
<ul style="list-style-type: none"> • Konstanz der Lichtgeschwindigkeit • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhenstrahlung • ...
Inhaltsfeld 4: Quantenphysik	
Inhaltliche Schwerpunkte	Mögliche Kontexte
<ul style="list-style-type: none"> • Licht und Elektron als Quantenobjekte • Welle-Teilchen-Dualismus 	<ul style="list-style-type: none"> • ...
Inhaltliche Angaben zu Basiskonzepten	
<ul style="list-style-type: none"> • Lichtelektrischer Effekt, Lichtquantenhypothese • Röntgenstrahlung • Streuung und Beugung von Elektronen • Lichtquanten • Planck'sches Wirkungsquantum • Energiewerte im linearen Potentialtopf • Teilcheneigenschaften von Photonen • Wellencharakter von Elektronen • De-Broglie-Hypothese • Wellenfunktion und Aufenthaltswahrscheinlichkeit • Linearer Potentialtopf • Heisenberg'sche Unschärferelation 	
Inhaltsfeld 5: Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik	
Inhaltliche Schwerpunkte	Mögliche Kontexte
<ul style="list-style-type: none"> • Ionisierende Strahlung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichtquellen und ihr Licht • ...

Tab. 20: Inhaltsfelder, die elektromagnetische Strahlung thematisieren, aus dem KLP des Faches Physik für die Sek. 2 [145].

3. Aus den ersten beiden Feststellungen resultiert unmittelbar die dritte, dass die KLPe des Faches Physik die meisten Kompetenzen aufweisen, die einen Bezug zum Thema *elektromagnetische Strahlung haben*. Angefangen mit dem KLP der Unterstufe finden sich insgesamt folgende Kompetenzen:

Kompetenzen aus dem Kernlehrplan der Sekundarstufe 1
Schülerinnen und Schüler [...] [können] ...
... Bildentstehung und Schattenbildung sowie Reflexion mit der geradlinigen Ausbreitung des Lichts erklären.
... Absorption und Brechung von Licht beschreiben.
... Infrarot-, Licht- und Ultraviolettstrahlung unterscheiden und mit Beispielen ihre Wirkung beschreiben.
Kompetenzen aus dem Kernlehrplan der Sekundarstufe 2
Schülerinnen und Schüler ...
... bestimmen Wellenlängen und Frequenzen von Licht mit <i>Doppelspalt</i> und <i>Gitter</i> .
... demonstrieren anhand eines <i>Experiments zum Photoeffekt</i> den Quantencharakter von Licht und bestimmen den Zusammenhang von Energie, Wellenlänge und Frequenz von Photonen sowie die Austrittsarbeit der Elektronen.
... zeigen an Beispielen die Grenzen und Gültigkeitsbereiche von Wellen- und Teilchenmodellen für Licht und Elektronen auf.
... begründen mit dem Ausgang des <i>Michelson-Morley-Experiments</i> die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.
... erläutern die Bedeutung der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit als Ausgangspunkt für die Entwicklung der speziellen Relativitätstheorie.
... begründen mit der Lichtgeschwindigkeit als Obergrenze für Geschwindigkeiten von Objekten Auswirkungen auf die additive Überlagerung von Geschwindigkeiten.
... leiten mithilfe der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und des Modells <i>Lichtuhr</i> quantitativ die Formel für die Zeitdilatation her.
... reflektieren die Nützlichkeit des Modells <i>Lichtuhr</i> hinsichtlich der Herleitung des relativistischen Faktors.
... ermitteln auf der Grundlage von Brechungs-, Beugungs- und Interferenzerscheinungen (mit Licht- und Mikrowellen) die Wellenlängen und die Lichtgeschwindigkeit.
... erläutern die qualitativen Vorhersagen der klassischen Elektrodynamik zur Energie von Photoelektronen (bezogen auf die Frequenz und Intensität des Lichts).
... stellen anhand geeigneter Phänomene dar, wann Licht durch ein Wellenmodell bzw. ein Teilchenmodell beschrieben werden kann.
... erläutern den Widerspruch der experimentellen Befunde zum Photoeffekt zur klassischen Physik und nutzen zur Erklärung die Einstein'sche Lichtquantenhypothese.
... diskutieren das Auftreten eines Paradigmenwechsels in der Physik am Beispiel der quantenmechanischen Beschreibung von Licht und Elektronen im Vergleich zur Beschreibung mit klassischen Modellen.
... deuten die Entstehung der kurzwelligen Röntgenstrahlung als Umkehrung des Photoeffekts.
... erläutern das Absorptionsgesetz für Gamma-Strahlung, auch für verschiedene Energien.
... erklären die Entstehung des Bremsspektrums und des charakteristischen Spektrums der Röntgenstrahlung.
... unterscheiden α -, β -, γ -Strahlung und Röntgenstrahlung sowie Neutronen- und Schwerionenstrahlung.

... beschreiben Wirkungen von ionisierender und elektromagnetischer Strahlung auf Materie und lebende Organismen.
... erläutern den Nachweis unterschiedlicher Arten ionisierender Strahlung mithilfe von <i>Absorptionsexperimenten</i> .
... bereiten Informationen über wesentliche biologisch-medizinische Anwendungen und Wirkungen von ionisierender Strahlung für unterschiedliche Adressaten auf.
... erläutern das Vorkommen künstlicher und natürlicher Strahlung, ordnen deren Wirkung auf den Menschen mithilfe einfacher dosimetrischer Begriffe ein und bewerten Schutzmaßnahmen im Hinblick auf die Strahlenbelastungen des Menschen im Alltag.
... begründen in einfachen Modellen wesentliche biologisch-medizinische Wirkungen von ionisierender Strahlung mit deren typischen physikalischen Eigenschaften.
... benennen Geiger-Müller-Zählrohr und Halbleiterdetektor als experimentelle Nachweismöglichkeiten für ionisierende Strahlung und unterscheiden diese hinsichtlich ihrer Möglichkeiten zur Messung von Energien.
... beurteilen Nutzen und Risiken ionisierender Strahlung unter verschiedenen Aspekten.

Tab. 21: Kompetenzen aus dem KLPen des Faches Physik, die in Bezug zur elektromagnetischen Strahlung stehen.

Dabei erreichen die Kompetenzerwartungen, wie auch an den gewählten Operatoren erkenntlich (s. Tab. 21), alle drei Anforderungsniveaus. Durch die Nutzung unterschiedlicher Anforderungsniveaus innerhalb der Aufgaben und deren dadurch entstehende Vielfalt eröffnen sich innerhalb der Inhaltsfelder unterschiedliche Perspektiven. Dies ist ein Indiz dafür, dass nicht nur innerhalb unterschiedlicher Inhaltsfelder elektromagnetische Strahlung thematisiert wird, sondern auch auf unterschiedlichen kognitiven Ebenen.

4. Wird schließlich in den KLPen der Unter- und Oberstufe nach dem Ausdruck *Licht* und den damit verwandten Begriffen und Ausdrücken gesucht, stößt man insgesamt auf eine Vielfalt und Vielzahl davon: *Ausbreitung des Lichts; Lichtstrahlung; Absorption und Brechung von Licht; Lichtstrahlung; Licht und der Schall; Licht und Sehen; Lichtquellen; Lichtempfänger; Farbzerlegung des Lichts; Lichtleiter; Zusammensetzung des weißen Lichts* [144]; *Entstehung des Lichts; Lichtgeschwindigkeit; Lichtwellenlänge; Lichtfrequenz; Licht und Materie; Quantelung der Energie von Licht; Quantencharakter von Licht; Wellenlänge und Frequenz von Licht; Welle- und Teilchenmodell für Licht; Lichtuhr; Lichtwellen; Licht als Quantenobjekt; lichtelektrischer Effekt; Lichtquantenhypothese; Frequenz und Intensität des Lichts; Lichtquanten; Lichtquelle* [145]. Zudem kann diese Liste mit weiteren Ausdrücken, die allgemeiner im Zusammenhang mit dem Begriff der elektromagnetischen Strahlung stehen, fortgesetzt werden.

Werden die Erkenntnisse aus den vier vorgeführten Anzeichen zusammengefasst, so ist festzustellen, dass zwar eine Fülle an Fachtermini und eine Vielzahl an thematischen Verortungen der elektromagnetischen Strahlung bzw. von Licht in den KLPen des Faches Physik zu finden sind, jedoch auch eine gewisse Begrenzung impliziert wird: Der Schwerpunkt liegt dabei viel weniger

darauf, dass das Licht eine Energieform ist und „auch den Körper verändern [kann], mit dem sie wechselwirkt“ [144]. Vielmehr wird das Licht als ein Forschungsobjekt betrachtet, das „reflektiert, absorbiert, gebrochen oder auch in Farbbestandteile zerlegt werden“ kann; passend zu dieser Feststellung wird im KLP der fachwissenschaftliche Ausdruck *Quantenobjekt* verwendet [145]. Außerdem sind die Kompetenzerwartungen (3.) und auch die Fachtermini (4.) sind geprägt von den Eigenschaften des Lichts: *Lichtgeschwindigkeit*, *Lichtwellenlänge*, *Lichtfrequenz* etc. Dies suggeriert auch die Tatsache, dass im Physikunterricht Licht als ein (Quanten-)Objekt betrachtet wird und seine gezielte Nutzung als Energieform zur Beeinflussung der Materie nicht die Priorität hat, sondern nur peripher eine Rolle spielt.

3.2.4 Ergebnisse

Durch die in den Kapiteln 3.2.2 bis 3.3.2 konstatierten Erkenntnisse können im Folgenden die Forschungsfragen wie folgt beantwortet (A) werden:

F. 1: Welche Rolle nimmt die Energie für den Chemieunterricht laut der BS und Lehrpläne ein?

A. 1: Aufgrund der Tatsache, dass in den BS ein gleichnamiges Basiskonzept existiert, und der damit kohärenten Aufgaben von Basiskonzepten (s. Kap. 3.2.2) spielt die Energie als ein Basiskonzept durch die Lehrpläne aller Bundesländer und die darin verankerten Inhaltsfelder hindurch die Rolle eines "Vernetzers" bzw. eines Gerüsts zur horizontalen und vertikalen Vernetzung des Fachwissens, worauf nicht ohne weiteres verzichtet werden kann. Abgesehen von dem Bezug des Themas *Energie* zu gegenwärtigen Alltagssituationen aus der Lebenswelt der Schüler wird sowohl in den BS als auch in den KLPen eine Zukunftspropädeutik suggeriert, indem die *zukunftsichere Energieversorgung* in der Sek. 1 oder die *Energieversorgung der Zukunft* in der Sek. 2 als mögliche Themengebiete angegeben werden [20, 317].

F. 2: In welchen Zusammenhängen wird *Licht* bzw. *elektromagnetische Strahlung* in den BS und Lehrplänen angeführt? Welche Rolle nimmt *Licht* bzw. *elektromagnetische Strahlung* in den BS und Lehrplänen ein?

A. 2: Erst in den Lehrplänen wird der Ausdruck *Energieform* aus den BS (s. Kap. 3.2.2) konkretisiert. Mit Blick auf den Inhalt des Analyserasters (s. Kap. 3.2.3; Tab. 14) kommt in den Lehrplänen einiger Bundesländer der Ausdruck *Licht* bzw. *Strahlung* vor und in einigen dieser Fälle explizit im Kontext *Energie*. Oft wird das Licht scheinbar als eine Art "Nebenerscheinung" bzw. nur flüchtig erwähnt, wie beispielsweise im Themenbereich der Farbstoffchemie in der Oberstufe. Dies jedoch verhält sich paradox zu der inhaltlichen Aussage in Antwort 1. Zudem wird insgesamt betrachtet de facto das Licht häufiger im Kontext Energie erwähnt als sogar Wärme (s. Kap. 3.2.3; Tab. 14).

F. 3: Inwieweit könnten theoretisch photochemische Inhalte mit Blick auf die BS und KLPe in den Chemieunterricht integriert werden?

A. 3: Sowohl in der Gesamtbilanz als auch bezogen im Speziellen auf die KLPe des Bundeslandes NRW resultierte aus der Untersuchung eine eminente Anzahl an Andockstellen bzw. Integrationsmöglichkeiten für photochemische Inhalte in den Chemieunterricht (vgl. [338]). Die Anzeichen dafür sind in erster Linie das für alle Lehrpläne obligatorische Basiskonzept *Energie* (s. Kap. 3.2.2) und die Kompetenzerwartungen. Letztere sind zum Teil so abstrakt, dass beispielsweise neben der Nutzung von Experimenten, in denen elektrische Energie oder Wärme als Energieform eingesetzt werden, gleichfalls als Alternative der Einsatz photochemischer Experimente, in denen elektromagnetische Strahlung durch Lampen oder die Sonne verwendet wird, möglich wäre (s. Kap. 3.2.3.1). D.h.: „Im Hinblick auf die konkrete didaktische Konzeption lassen die Kernlehrpläne, die in NRW formuliert wurden, den Lehrenden einen möglichst großen Gestaltungsspielraum“ [339]. Legitimiert wird diese Feststellung durch die Expertise des BMBF zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards wie folgt:

„Nach unserer Meinung ist deshalb eine Strategie der Steuerung notwendig und angemessen, in der die Leitfunktion nationaler Bildungsstandards und die Orientierungsfunktion von Lehrplänen systematisch gekoppelt werden, und zwar so, dass **die Autonomie der Einzelschule** gefördert wird. Im Ansatz der fachbezogenen Kerncurricula lässt sich ein solches integriertes Steuerungssystem entwickeln, das einerseits anschlussfähig ist an Kompetenzvorgaben, wie sie in Bildungsstandards entwickelt werden, und andererseits **offen ist für zeitliche Sequenzierungen und konkrete Unterrichtsempfehlungen**, wie sie zur Orientierung der alltäglichen Schularbeit unentbehrlich sind.“ [291]

Für das Fach Chemie kommt im Vorwort des KLPs durchaus noch die Information hinzu, dass selbst mit den KLPen eigentlich nur eine hinreichende Konkretisierung der BS vorliegt und erst durch die Entscheidungen der Fachkonferenz der jeweiligen Schule im Hinblick auf den Inhalt des schulinternen Curriculums die *notwendige Konkretisierung* für den Chemieunterricht geleistet wird [340]:

„Der Grundgedanke dieser Standardsetzung ist es, in kompetenzorientierten Kernlehrplänen die fachlichen Anforderungen als Ergebnisse der schulischen Arbeit klar zu definieren. Die curricularen Vorgaben konzentrieren sich dabei auf die fachlichen „Kerne“, ohne die didaktisch-methodische Gestaltung der Lernprozesse regeln zu wollen. Die Umsetzung des Kernlehrplans liegt somit in der **Gestaltungsfreiheit – und der Gestaltungspflicht – der Fachkonferenzen** sowie der **pädagogischen Verantwortung der Lehrerinnen und Lehrer.**“ [20]

Offensichtlich entscheiden letztendlich die Schulen, welche Form die notwendige Konkretisierung im Rahmen der KLPe einnehmen soll (s. Kap. 2.3.1, Definition von *Curriculum*). Die Fachkonferenz bekommt die Freiheit, Methoden, Beispiele und Experimente in dem Curriculum zu verankern.

Im Hinblick auf die horizontale Vernetzung konsolidiert auch der Inhalt der KLPe benachbarter naturwissenschaftlicher Fächer die Sinnhaftigkeit der Integration von photochemischen Experimenten in den Schulunterricht zur Realisierung der Vorgaben zum Basiskonzept *Energie* (s. Kap. 3.2.2). In den KLPen der Biologie und der Physik gibt es ausreichend Berührungspunkte für jene Experimente, sodass photochemische Experimente oder die Arbeitsmaterialien dazu eventuell etwas modifiziert auch im Biologie- oder Physikunterricht ihren Einsatz finden könnten (s. Kap. 3.2.3.2). Mit Blick auf die KLPe ergänzen sich die drei Fächer theoretisch im Bezug auf die Thematisierung elektromagnetischer Strahlung bzw. des Lichts durch die disjunkte Menge an drei unterschiedlichen Betrachtungen der Lichtenergie: Dadurch, dass im Biologieunterricht insbesondere natürliche durch Lichtbeteiligung funktionierende Systeme wie der Kohlenstoffkreislauf Photosynthese / Zellatmung beobachtet werden [146], und der Physikunterricht seinen Fokus „auf die Frage nach der Natur des Lichts und seine Eigenschaften“ [341] setzt, ist es letztendlich die Aufgabe des Chemieunterrichts, die stofflichen und energetischen Auswirkungen der Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Strahlung und Materie aufzugreifen. Diese Feststellungen legen somit nahe, dass photochemische Inhalte besonders gut für fächerübergreifenden Unterricht (s. Kap. 3.2, Definition) geeignet wären.

So könnten photochemische Inhalte in den in einigen Bundesländern bereits vorhandenen Unterrichtsfächern wie *Naturwissenschaften, Natur und Technik* etc. (s. Kap. 3.2.2) der Sekundarstufe 1 zuerst didaktisch vereinfacht auf *phänomenologischer Ebene* und später aufgrund der Möglichkeiten des kumulativen Unterrichts in den weiterführenden Klassenstufen allmählich auch auf der *submikroskopischen Ebene* betrachtet werden [342, 343] (vgl. Kap. 4.1.2). Unterstützt wird dieser Gedanke durch die Bildungsstandards. Denn sie „liefern Ansatzpunkte für fächerübergreifenden Unterricht [und] [...] erlauben es, eine größere horizontale Kohärenz zwischen den Fächern herzustellen und damit die verschiedenen Fächer und Lerngegenstände im Zusammenhang zu sehen“ [277].

Inzident ergibt sich zudem aus dieser Untersuchung die Erkenntnis, dass ein gewisser Zusammenhang zwischen den geographischen sowie ökonomischen Gegebenheiten in Deutschland im Hinblick auf die Solarenergie und den Inhalten der Lehrpläne besteht. In den Bildungsstandards spiegelt sich dies im Kapitel *Beiträge des Faches Chemie zur Bildung* wie folgt wider:

„Die Schülerinnen und Schüler erkennen die Bedeutung der Wissenschaft Chemie, der chemischen Industrie und der chemierelevanten Berufe für Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt. Gleichzeitig werden sie für eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen sensibilisiert.“ [14]

Außerdem wird der Zusammenhang zwischen Bildung und Wirtschaft andeutungsweise durch die folgende Feststellung der KMK unterstützt: „Das Bildungswesen nimmt eine Schlüsselrolle für die individuelle Entwicklung, für gesellschaftliche Teilhabe sowie für das berufliche Fortkommen des Einzelnen, aber auch für den wirtschaftlichen Erfolg und den sozialen Zusammenhalt eines Landes ein“ [344]. Letztendlich kann auch aus der folgenden Aussage der *Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung* (OECD) die wirtschaftliche Beeinflussung des Bildungswesens sehr deutlich abgeleitet werden:

„Von Anfang an hat die OECD die Bedeutung von Bildung und Humankapital für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung betont [...]. Die Investitionen in Bildung sind inzwischen zu hoch und der Nutzen der Bildung für den Erfolg von Wirtschaft und Gesellschaft zu wichtig, als dass die Entwicklung leistungsstarker Bildungssysteme ohne die Kenntnis und die Beobachtung von Bildungsindikatoren vorstatten gehen könnte. [...] Die OECD hat von Anfang an betont, dass Bildung eine entscheidende Rolle für die wirtschaftliche Entwicklung spielt.“ [345]

3.3 Schulbuchanalyse

WIATERS Definition nach ist das Schulbuch „im engeren Sinne ein überwiegend für den Unterricht verfasstes Lehr-, Lern- und Arbeitsmittel in Buch- oder Broschüreform und Loseblattsammlungen, sofern sie einen systematischen Aufbau des Jahresstoffs enthalten“ [346]. Nach Artikel 7 (Absatz 1) des Grundgesetzes, welcher da lautet: „Das gesamte Schulwesen steht unter der Aufsicht des Staates“ [347], entscheidet der Staat über den Inhalt der Schulbücher. Konkret bedeutet dies, dass in jedem Bundesland das für Bildungsangelegenheiten vorgesehene Ministerium über die Zulassung von Schulbüchern bestimmt [348]. Dabei ist zu ergänzen, dass das Schulbuch „keineswegs nur das Ergebnis didaktischer oder speziell methodisch-medialer Überlegungen zum Schulunterricht [ist], es erklärt sich immer auch aus politischen und pädagogischen Satzungen“ [346].

Ein bindendes Kriterium ist die Konformität der Schulbuchinhalte mit den jeweiligen Vorgaben der Lehrpläne, welches durch die entsprechenden Institutionen des Bundeslandes überprüft wird [349]. Außerdem haben die

„Ergebnisse internationaler Schulleistungsvergleiche wie TIMSS¹¹⁶ und PISA¹¹⁷ [...] insbesondere die Reflexion über didaktische Konzepte, die

¹¹⁶ „TIMMS (Trends in International Mathematics and Science Study) erfasst das mathematische und naturwissenschaftliche Grundverständnis von Schülerinnen und Schülern am Ende der 4. Jahrgangsstufe in einem vierjährigen Rhythmus“ [350].

¹¹⁷ Die internationale Schulleistungsstudie PISA [(Programme for International Student Assessment)] im Auftrag der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) erfasst die Kompetenzen von 15-jährigen Jugendlichen beim Lesen, in der Mathematik und in den Naturwissenschaften“ [351] (vgl. [352]). Die Erfassung der Schülerleistungen verläuft weltweit und wird international verglichen [353].

den Schulbüchern zugrunde liegen, angeregt. Diese sind ein wichtiges Kriterium bei der Entscheidung für bestimmte Schulbücher. Seit der Einführung von Bildungsstandards ist insbesondere die Kompetenzorientierung ein Kriterium, das bei der Wahl des Schulbuches neben der Differenzierung eine zentrale Rolle spielt.“ [349]

Demzufolge können nach FUCHS „Schulbücher aus verwaltungstechnischer, didaktischer [...] [und] wissenssoziologischer Perspektive“ wie folgt definiert werden:

„Stellt man die kennzeichnenden Merkmale eines Schulbuchs aus den Verwaltungsordnungen der deutschen Länder zusammen, dann handelt es sich um ein für Schüler bestimmtes Lernmittel, das in Druckform vorliegt, sich schulart- und schulfachbezogen an Lehrplänen oder Standards orientiert und die dort bestimmten Ziele, Kompetenzen und Inhalte umsetzt.“ [354]

Das Schulbuch findet seinen Einsatz in unterschiedlichen Phasen wie der Einstiegs-, Informations-, Erarbeitungs- oder Festigungsphase [355]. Außerdem kann es eine Steuerungs- und Strukturierungsfunktion einnehmen, denn es gibt Lehrenden „Anregung zur Unterrichtsplanung durch Einleitung in Kapitel, Gewichtung des Inhalts etwa durch das Angebot an Beispielen sowie die Formulierung von Merksätzen oder Erfolgskontrollen“ [355]. FUCHS et al. argumentieren dabei für einen nur mediaten Einfluss der schulinternen Curricula auf den Lernprozess der Schüler, wenn davon ausgegangen wird, dass die Korrelation zwischen den Inhalten der Schulbücher und denen der Lehrpläne als besonders hoch eingeschätzt wird [354] und bei der Erstellung der schulinternen Lehrpläne Lehrer sich an schulbuchinhalten orientieren. Dadurch ist nämlich die Auswirkung der Schulbücher auf den alltäglichen Unterricht höher als die Auswirkung der Lehrpläne selbst [356]. Nicht umsonst findet deshalb die Bezeichnung des Schulbuches als „heimlichen Lehrplan“ größtenteils ihre Berechtigung [356]. So nehmen sie eine „bedeutende Rolle ein als *Mediatoren* zwischen dem intendierten Lehrplan (Policy-Ebene) und dem implementierten Lehrplan (Schul-/Klassenebene)“ [354].

Sowie STEIN Schulbücher im Hinblick auf ihre Mehrdimensionalität aus funktioneller Perspektive als *Informaticum*, *Politicum* und *Paedagogikum* beschreibt [357], betrachtet APPLE das Schulbuch neben seiner Funktion als Medium für Fachwissen als einen weiteren "Austragungsort" „politischer, ökonomischer und kultureller Aktivitäten, Auseinandersetzungen und Kompromisse“ (zitiert nach [354, 358]). Alles in allem dienen Schulbücher, so FLECHSIG, als „Regelungen mit denen Gesellschaften festlegen, welche ihrer Wissensvorräte sie an die nachkommende Generation überliefern wollen“ (in [359], zitiert nach [357]). Aus dieser Überzeugung heraus soll im Folgenden die Analyse der Schulbücher des Faches Chemie vorgestellt werden.

3.3.1 Forschungsfragen und Vorgehensweise

Ziel dieser Untersuchung war es, herauszufinden, inwieweit photochemische Inhalte in den Schulbüchern bereits thematisiert werden und wie viel Handlungsraum zur Integration besteht. Deshalb wurden folgende Forschungsfragen gestellt:

F. 1: Wie groß ist der Stellenwert photochemischer Inhalte in den Schulbüchern?

F. 2: In welchen Zusammenhängen wird *Licht* bzw. *elektromagnetische Strahlung* in den Schulbüchern angeführt?

F. 3: Inwieweit könnten im Rahmen der aktuell gültigen KLPe photochemische Inhalte mit Blick auf die Schulbuchinhalte in den Chemieunterricht integriert werden?

Hierzu wurden sowohl Schulbücher für die Sekundarstufe 1 als auch für die Sekundarstufe 2 gesichtet. Für die Unterstufe sind vom Ministerium für Schule und Bildung des Bundeslandes NRW für das Schuljahr 2017/2018 im Chemieunterricht genehmigte Schulbücher [348] und für die Oberstufe die in NRW in den Schulen im Jahr 2018 aktuellsten Ausgaben der Schulbücher von vier bekannten Schulbuchverlagen gewählt worden. Insgesamt wurden 11 Schulbücher analysiert:

Sekundarstufe 1	Sekundarstufe 2
• Chemie heute S1, Gesamtband Schroedel Verlag, 2017 (1)	• Chemie heute, Einführungsphase Schroedel Verlag, 2014
• NEO Chemie, Gesamtband Schroedel Verlag, 2017 (2)	• Chemie heute, Qualifikationsphase Schroedel Verlag, 2014 (6)
• Chemie 2000+, Sekundarstufe 1 Gesamtband C.C.Buchner Verlag, 2010 (3)	• Chemie 2000+, Einführungsphase C.C.Buchner Verlag, 2012
	• Chemie 2000+, Qualifikationsphase C.C.Buchner Verlag, 2014 (7)
• Elemente Chemie 1, Gesamtband Ernst Klett Verlag, 2009 (4)	• Elemente Chemie, Oberstufe Gesamtband Ernst Klett Verlag, 2015 (8)
• Fokus Chemie, Sekundarstufe 1 Gesamtband Cornelsen Verlag, 2010 (5)	• Chemie, Oberstufe Gesamtband Cornelsen Verlag, 2010 (9)

Tab. 22: Zur Analyse ausgewählte Schulbücher.

Da durch die Analysen nicht auf die Beurteilung von Lehrmitteln als solche gezielt wurde und auch keine *Wirkungs- oder Rezeptionsforschung* hier beabsichtigt war [354], waren somit keine Kriterienkataloge wie das *Bielefelder Raster*, das *Reutlinger Raster* etc. als Ganzes notwendig (vgl. [281]). Im Hinblick auf die oben aufgeführten Forschungsfragen wurde bei den Analysen wie bereits bei den BS und Lehrplänen (s. Kap. 3.2) quantitativ vorgegangen, indem Frequenz- und Kontingenzanalysen (vgl. Kap. 3.2.1) durchgeführt wurden. Dabei wird auf qualitative *kategoriale Inhalts- und Strukturanalysen* verzichtet (vgl. [360]), da diese für den aufgezeigten Zweck der vorliegenden Unter-

suchung nicht notwendig sind. Qualitativ ausgewertet wurden bei der Erstellung des Analyserasters nur in diesem thematischen Rahmen auffällige Aspekte.

Zur Beantwortung der ersten beiden Forschungsfragen wurden zwei Schritte vorgenommen (s. Kap. 9.1): Zuerst wurden alle Kapitel aus den Büchern aufgelistet, in denen in irgendeiner Weise elektromagnetische Strahlung bzw. Licht entweder in den Texten, Abbildungen oder auch Experimenten angeführt wird. Anschließend wurden die photochemischen Schulexperimente, die sich in den Büchern befinden, separat gezählt. Zur relativen Betrachtung und Vergleichbarkeit der Befunde zu photochemischen Inhalten wurden auf gleiche Weise auch die Kapitel in den Büchern gesichtet, die die Inhaltsfelder aus den KLPen der Sek. 1 und 2 explizit thematisieren, welche der Elektrochemie zuzuordnen sind. Das Inhaltsfeld für die Unterstufe lautet *Freiwillige und erzwungene Elektronenübertragung*, für die Oberstufe *Elektrochemie*. In den Schulbüchern werden sie zwar unterschiedlich bezeichnet, jedoch werden inhaltlich diese beiden Inhaltsfelder umgesetzt.¹¹⁸

3.3.2 Auswertung

Die Schulbücher wurden untersucht, wie in Kap. 3.3.1 beschrieben. Zur übersichtlichen Auswertung wurde ein gemeinsames Analyseraster für alle Schulbücher verwendet, welches sich im Anhang befinden (s. Kap. 9.1). Die auf den Seiten der Schulbücher identifizierten photochemischen und elektrochemischen Experimente wurden dabei, wenn sie nicht bereits eine Überschrift besaßen, je nach Inhalt mit einer kurzen Betitelung in das Analyseraster aufgenommen. Zusätzlich wurde die Anzahl der Angaben in den Feldern des Analyserasters angegeben. Die in Kap. 3.3.1 beschriebenen zwei Schritte werden mit den Ausdrücken *Themen* und *Experimente* abgekürzt. Zum direkten Vergleich der Befunde zu photochemischen und elektrochemischen Inhalten (grau hinterlegt) befinden sich diese je Kategorie (Themen, Experimente) direkt untereinander. Bei zwei separaten Schulbüchern für die Oberstufe wie der Verlage *C.C.Buchner* und *Schroedel* wurden für die graphische Auswertung die jeweiligen Anzahlen der Fachtermini aus dem Schulbuch für die Einführungsphase und dem für die Qualifikationsphase zusammengefasst und im Folgenden als ein Gesamtband für die Oberstufe betrachtet (s. Abb. 57 u. 58). Die Zuordnung der Nummerierung der Schulbücher (1–9) in den Abbildungen 57 und 58 befindet sich in Tab. 22 (s. Kap. 3.3.1). Zwar erfolgte mithilfe des Analyserasters und der Grafiken eine quantitative Auswertung, jedoch werden im Folgenden insbesondere auch Auffälligkeiten in den Schulbüchern thematisiert und ausdiskutiert.

¹¹⁸ Fachtermini, die nicht unmittelbar im Themenfeld *Elektrochemie* vorkommen, sondern in weiteren Themenfeldern, die z. B. das Inhaltsfeld *Säuren, Basen und analytische Verfahren* behandeln und innerhalb dessen beispielsweise die Leitfähigkeitstiteration erwähnt wird, sind hier nicht mit inbegriffen.

In allen Schulbüchern kommt elektromagnetische Strahlung als eine Energieform vor, sei es im Sachtext, explizit als Thema, im Zusammenhang mit Reaktionsgleichungen oder in Abbildungen. Die Thematisierung der Nutzung der Lichtenergie wird daran deutlich, dass diese in den Schulbüchern in folgenden Kontexten erwähnt wird: *Photosynthese*, *Photovoltaik* bzw. *Solarzelle*, *Photolumineszenz*. Mit einer Ausnahme, dem *Chemie 2000+* für die Qualifikationsphase, thematisieren alle anderen Schulbücher photochemische Inhalte, entweder explizit oder implizit, maximal sieben Male (s. Abb. 57).¹¹⁹ In ca. der Hälfte der Fälle spielen sie durch die einfache Darstellung der Lichtenergie innerhalb von Abbildungen, beispielsweise durch eine Sonne, nur eine Nebenrolle, auf die im Sachtext kaum näher eingegangen wird. Am häufigsten wird diese Energieform im Themenbereich *Farbstoffchemie* in den Schulbüchern der Oberstufe herangezogen. In der Unterstufe ist die Sonnenenergie unter den Themen wie *zukunftsichere Energieversorgung* und *Nachhaltigkeit* oder auch im Zusammenhang mit *nachwachsenden Rohstoffen* und *regenerativen Kraftstoffen* innerhalb von Abbildungen der Herstellung von Biodiesel zu finden [361 – 364]. In allen gesichteten Schulbüchern werden mehr als doppelt so viele elektrochemische Inhalte thematisiert (s. Abb. 57). Werden die Themen, die Photochemie umfassen, und die Themen, welche Elektrochemie umfassen, ins Verhältnis gesetzt, so ergibt sich, dass knapp 70 % der Themen elektrochemischer und somit nur fast 30 % der Themen photochemischer Natur sind.¹²⁰

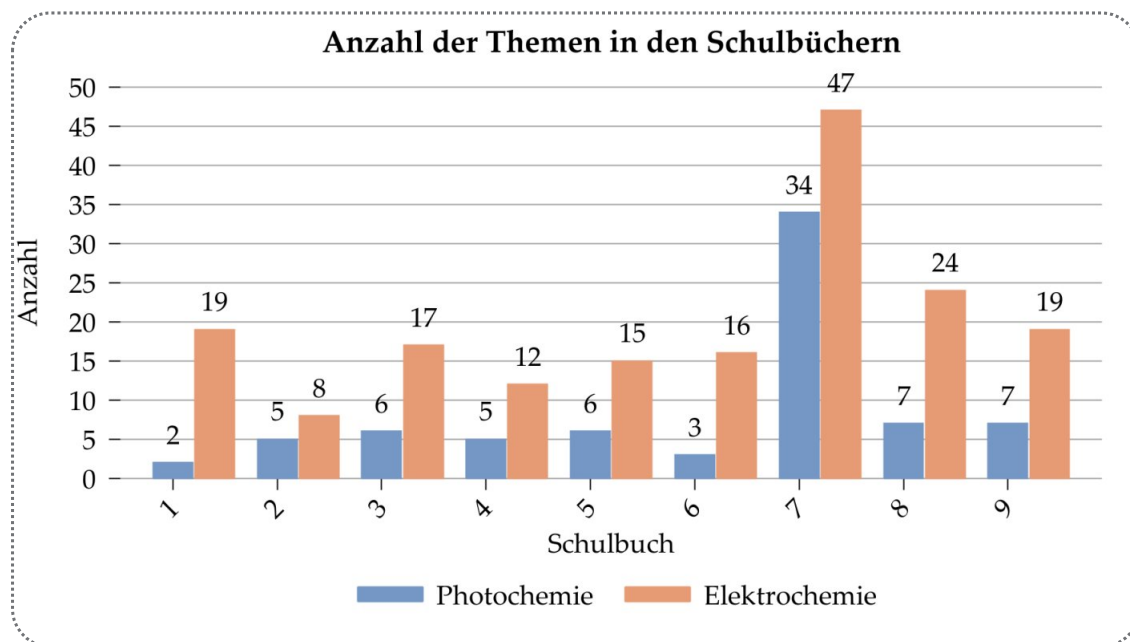


Abb. 57: Anzahl der Themen in den Schulbüchern zu photochemischen und elektrochemischen Inhalten im Vergleich.

¹¹⁹ Davon ausgeschlossen sind aus den Schulbüchern der Sekundarstufe 1 das Trennverfahren Chromatographie und der Nachweis von Metallen durch Flammenfärbung, zudem noch aus den Oberstufenbüchern die Einstiegskapitel zur Farbstoffchemie über den Farbeindruck und die Photometrie.

¹²⁰ Hierfür wurden die einzelnen Anzahlen an Themen aus Abb. 57 addiert und die Gesamtmenge ($G = 75_{\text{photochemisch}} + 177_{\text{elektrochemisch}} = 252$) wurde als Grundwert (100 %) betrachtet.

Bei Betrachtung der Anzahl der Experimente fällt die größere Differenz zwischen der Anzahl elektrochemischer und photochemischer Inhalte auf:

48 der 50 als photochemisch betrachteten Experimente befinden sich in den Schulbüchern für die Oberstufe. In der Unterstufe hingegen wurden nur in dem Schulbuch des Verlags *C.C.Buchner* (3) photochemische Experimente festgestellt. Gleichzeitig befinden sich knapp über 80 % (41 von 50 Experimenten) der photochemischen Schulversuche in den Schulbüchern desselben Verlags für die Oberstufe. Insgesamt enthalten 5 der 9 Schulbücher keine Experimente, bei der Lichtenergie genutzt wird. Im Unterschied dazu gibt es in jedem Schulbuch mindestens 5 Experimente, die sich mit elektrochemischem Fachwissen auseinandersetzen. Fast 78 % (174 von 224 Experimenten) aller aufgelisteten Schulversuche (s. Kap. 9.1) basieren auf elektrochemischem Fachwissen und werden in den entsprechenden Themenbereichen im Schulbuch angeboten. Nur knapp über 22 % (50 von 224 Experimenten) sind Versuche, bei denen sich Schüler mit photochemischem Fachwissen auseinandersetzen (s. Abb. 58).

In einigen der Schulbücher wird auf die Bedeutung der Lichtenergie zwar aufmerksam gemacht, jedoch mangelt es in diesen Büchern an Vorschlägen für photochemische Experimente für den Unterricht. In *Elemente Chemie 1* (4) heißt es:

„Sonne, Wind und Wasserstoff sind hingegen unerschöpfliche Energiequellen. [...] Wind- und Sonnenenergie haben den Nachteil, dass sie nicht gelagert und transportiert werden können. [...] Mit Solarzellen kann Sonnenenergie aber direkt in elektrische Energie umgewandelt werden [...].“ [364]

Ein Experiment in diesem Zusammenhang wird nicht angeboten, wodurch die Erkenntnisse aus diesem Sachtext von den Schülern auch praktisch erfahren werden könnten. Die Wirkung und die Umwandlung von Lichtenergie bleibt somit, zumindest was das Angebot des Schulbuches angeht, hier in der Theorie.

In den Schulbüchern der Unterstufe werden explizit folgende Themen aufgeführt: *Ohne Wasser läuft nichts* (in 1); *Die Luft – unser „Abfalleimer“?*, *Wasser ist unser Leben* (in 5); *Luft und Wasser, Ressource Luft, Ressource Wasser* (in 4). In dem Schulbuch *Fokus Chemie* (5) ist zudem ein Unterthema in dem Kapitel *Zukunftssichere Energieversorgung* betitelt mit dem Ausdruck *Das schwarze Gold*, womit das Erdöl gemeint ist. Auffällig ist, dass dieselben Schulbücher dagegen die Sonne nicht in ähnlicher Form betonen wie z. B. als eine unendliche Ressource o. ä. Warum sollte sich als Pendant zum schwarzen Gold die Sonne nicht als „*Der gelbe Saphir*“ in den Schulbüchern etablieren, könnte ein jeder sich fragen.

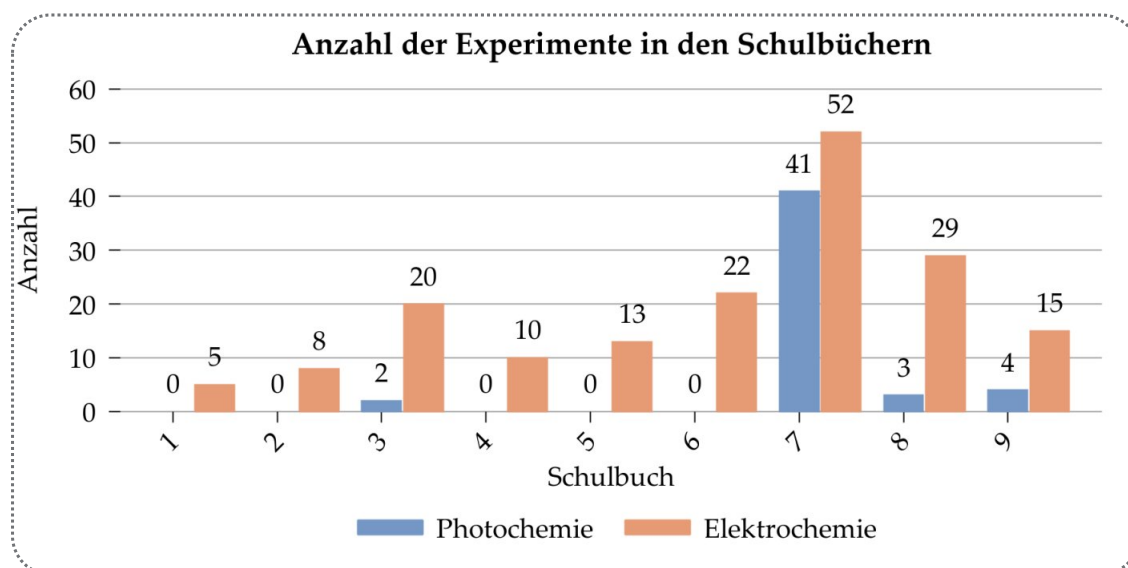


Abb. 58: Anzahl der Experimente in den Schulbüchern zu photochemischen und elektrochemischen Inhalten im Vergleich.

Schließlich wurde die Gesamtzahl der Themen ins Verhältnis zu der Anzahl der Experimente gesetzt: Unabhängig vom Schulbuch sind insgesamt 177 Themen und 174 Schulversuche dem Bereich Elektrochemie zugeordnet worden. Das Verhältnis ist insgesamt fast 1 : 1. Die Photochemie wird auf direkte oder indirekte Art in 75 Themen erwähnt, thematisiert oder abgebildet. Verhältnismäßig sind es mit 50 gezählten photochemischen Experimenten ein Drittel weniger Experimente als Themen. Zudem befinden allein 43 der Experimente sich in den Schulbüchern *Chemie 2000+* (3 und 7). Nur 7 Schulversuche werden in den restlichen 6 Schulbüchern insgesamt angegeben. Dafür gibt es mehr als 10 Mal so viele Stellen in den Schulbüchern (75 Mal), die in irgendeiner Weise Photochemie thematisieren. Die Berücksichtigung der elektromagnetischen Strahlung als eine Energieform ist auch an der Fülle der dazu in Beziehung stehenden Ausdrücken zu erkennen:

Fluoreszenz	Photolumineszenz	Solarthermie
Licht	Photometer	Solartechnik
Lichtwahrnehmung	Photopolymerisation	Sonneneinstrahlung
Lichtabsorption	Photorezeptor	Sonnenkollektor
Lichtemission	Photovoltaik	Solarstrom
Lichtfarbe	Photonen	Solar-Waver
Lichtquant	Photochemische Halogenierung	Solar-Wasserstoff-Technik
Lichtquelle	Photochromie	Solarzelle
Lichtschutzfaktor	Photosensibilisator	Sonnenenergie
Lichtbogen	Photosynthese	Solarenergie
Lichtgeschwindigkeit	Photooxidation	Sonnencreme
Phosphoreszenz	Photokatalytische Wasserspaltung	Sonnenschutzmittel
Photochemische Reaktion	Photosmog	Ultraviolettstrahlung

Tab. 23: Auswahl an Ausdrücken aus den Inhaltsverzeichnissen der Schulbücher, die im Zusammenhang mit elektromagnetischer Strahlung stehen.

3.3.3 Ergebnisse

In den Lehrplänen des Landes NRW ist das Thema Energie, nicht zuletzt weil es ein Basiskonzept ist, sehr präsent. In diesen befinden sich Ausdrücke wie *Energiespeicherung, Energiegewinnung, Energienutzung, verschiedene Möglichkeiten der Energiegewinnung, Gewinnung nutzbarer Energie, zukunftssichere Energieversorgung, zukünftige Energieversorgung, Energieversorgung der Zukunft* [20, 317]. Da sich die Schulbuchverlage an den Inhalten der KLPe orientieren, kann bestätigt werden, dass die gesichteten Schulbücher, sowohl die vom Ministerium genehmigten für die Sekundarstufe 1 als auch die für die Sekundarstufe 2, die inhaltlichen Vorgaben der Kernlehrpläne im Hinblick auf das Basiskonzept *Energie* beachten und schließlich umsetzen. Mit Blick auf die Themenlisten (s. Kap. 9.1), ist zu erkennen, dass auch die Tendenz der Zukunftsorientiertheit der KLPe (s. Kap. 3.3.2, Tab. 23) sehr deutlich berücksichtigt wird. Vor allem lässt sich der Stellenwert der Lichtenergie an der Menge an Fachwörtern in den Inhaltsverzeichnissen ablesen.

Es ist festzuhalten, dass jedoch eine Diskrepanz zwischen der Anzahl der Themen, in denen direkt oder indirekt photochemischer Inhalt oder allgemein ein Inhalt zum Thema Licht zu finden ist, und der Menge an Experimenten zu diesen Inhalten besteht. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein eindeutiger Mangel an photochemischen Schulversuchen in den Schulbüchern herrscht. Dies ist ein Zeichen für den Bedarf an Angeboten von photochemischen Schulversuchen. Das fehlende Angebot an photochemischen Experimenten für den Schulunterricht hindert die Gewinnung von Erkenntnissen über die eigene praktische Erfahrung, wenn die Lehrperson denn keine zusätzlichen Materialien unabhängig vom Schulbuch nutzt.

Da Licht in unterschiedlichen Inhaltsfeldern und auch Kapiteln in den Schulbüchern vorkommt, zudem im Unterschied zur Elektrochemie nicht als ein kompaktes Kapitel abgearbeitet wird, entsteht somit die Aussicht, photochemische Experimente in unterschiedliche Kontexte bzw. Themenbereiche zu "streuen" oder bereits vorhandene Experimente um weitere zu ergänzen.

3.4 Erfassung unterschiedlicher Perspektiven auf die Photochemie

Bisher wurden zur Voruntersuchung formale bzw. offizielle Quellen wie Bildungsstandards, Lehrpläne oder Schulbücher genutzt. Nun sollen in diesem Kapitel zur Erlangung von weiteren Erkenntnissen im Sinne von BLUMER (s. Kap. 2.1.4.1) über die Photochemie in der Bildungslandschaft die Meinung und das Wissen von Personengruppen¹²¹ aus der Praxis, d. h. Lehrpersonen

¹²¹ Zudem wurden ausgewählte, deutschlandweit bedeutende Chemieunternehmen befragt, um das Thema auch aus wirtschaftlicher Perspektive zu beleuchten und Meinungen aus der Wirtschaft einzuholen. Aus Gründen des Mangels an ausreichender Rückmeldung wird auf diese Befragung hier nicht näher eingegangen.

(s. Kap. 3.4.2.2), Lehramtsstudierende (s. Kap. 3.4.2.3) und Leiter von Lehrerfortbildungszentren (s. Kap. 3.4.3.4) dafür hinzugezogen werden. Diese sollen der Arbeit als authentische Referenzen aus dem Bildungssystem für die Erfahrung des Stands der Photochemie in diesem dienen. Da jedoch die eigentliche "Hauptader" im Chemieunterricht selbst liegt, wurden davor im Unterricht Hospitationen durchgeführt, um aus nächster Nähe in die Praxis zu "horchen" und erste Eindrücke über photochemische Inhalte im Schulunterricht zu sammeln (s. Kap. 3.4.2.1). Unterstützt wird die Ergänzung der vorhandenen Abschnitte der Voruntersuchungen (s. Kap. 3.1; Kap. 3.2; Kap. 3.3) durch Kapitel 3.4 schließlich mit folgender Aussage von BLUMER:

„Das Ziel der exploratorischen Forschung ist es, ein entsprechend den Umständen möglichst umfassendes und genaues Bild des zu untersuchenden Bereiches zu entwickeln und auszufüllen. Das Bild sollte den Wissenschaftler in die Lage versetzen, sich in dem Bereich zu Hause zu fühlen, von einer durch Fakten belegten und nicht von einer spekulativen Position aus zu sprechen.“ [71]

3.4.1 Vorgehensweise und Methodenwahl

Die Konstellation der drei zu befragenden Personengruppen, Lehramtsstudierende, Lehrer und Leiter von Lehrerfortbildungszentren, entstand mit der Intention, dass erfahren werden sollte, ob und wie viel photochemische Inhalte den Chemieunterricht erreichen. Hinter der Wahl ausgerechnet dieser drei Gruppen lag folgende Überlegung: Es sollten alle drei Zeiträume des Chemieunterrichts, die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, einbezogen werden, um zusätzlich zu dem beabsichtigten Ziel (s.o.) für dieses einen zeitlichen Überblick zu erhalten: Dabei sind die Lehramtsstudierenden diejenigen, die noch am besten den eigens erlebten Schulstoff im Chemieunterricht aus der Vergangenheit mit dem für den eigenen Unterricht in der Zukunft als Lehrer erlerntem Fachwissen aus dem Studium vergleichen und wiedergeben können. Die Lehrer hingegen können den aktuellen Stand des Chemieunterrichts wiedergeben. Da die Lehrerfortbildungszentren Angebote für Lehrer planen und organisieren, konnte über diese erfahren werden, ob es in der Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft mögliche Fortbildungen zu photochemischen Themen gab, gibt bzw. geben wird. So wurde gehofft, in gewissem Maße durch das Angebot der Zentren, das sich zu Teilen an dem Interesse der Lehrer, der aktuellen Forschung für den Chemieunterricht und der Bildungspolitik orientiert, gewisse Rückschlüsse zu ziehen, um diese in der Gesamtbilanz der Voruntersuchungen zu nutzen.

Die Methodenwahl orientiert sich an der Definition BLUMERS zur Intention von explorativen Studien (s. Kap. 3.4). Demnach war es in erster Linie wichtig, durch die getroffene Wahl an Methoden vorhandene persönliche Spekulationen oder Vorstellungen des Autors über das Wissen und die

Meinung der gewählten Personengruppen mit Fakten zu substituieren [71]. Deshalb wurden die gewählten Methoden nicht auf eine hochkomplexe Art und Weise eingesetzt, sondern so weit, dass gezielt dieses Ziel erreicht werden konnte.

3.4.1.1 Beobachtung

Zuerst wurden im Rahmen einer kurzen *deskriptiven Feldforschung* Hospitationen im Chemieunterricht an zwei verschiedenen Wuppertaler Gymnasien durchgeführt (s. Kap. 3.4.2.1).

„Ziel der deskriptiven Feldforschung ist es, eine Kultur aus der Sicht ihrer Mitglieder kennenzulernen und zu beschreiben. Die Kultur soll durch die Forschungstätigkeit möglichst nicht verändert werden. Wichtigste Methode der Datenerhebung ist die teilnehmende Beobachtung.“ [73]

Um die Kultur, in diesem Fall also den Chemieunterricht zu photochemischen Inhalten, zu verstehen, wurde, da es dabei nicht „um die präzise Messung vorher definierter Merkmale und Verhaltensweisen“ [72] geht, die Methode der *qualitativen Beobachtung* gewählt. Denn das

„offene, nicht-strukturierte Vorgehen bei der qualitativen Beobachtung ermöglicht es, Phänomene besonders detailreich zu erfassen (meist in Form verbaler, visueller bzw. audiovisueller Daten) sowie im Verlauf des Forschungsprozesses unerwartete Aspekte entdecken zu können“ [72].

Dabei nimmt der Beobachter nicht am Geschehen teil, „um die untersuchten Effekte nicht durch eigene Interaktionen im Untersuchungsfeld zu verfälschen und um sich auf Beobachtungen und deren Dokumentation während des Beobachtungszeitraums besser konzentrieren zu können“ [365]. Insgesamt wurde in vier Schulstunden hospitiert. Es handelte sich in beiden Fällen um Grundkurse des Faches Chemie. Zur Dokumentation wurden zu den Unterrichtsdiskursen akustische Aufzeichnungen vorgenommen und schriftliche Feldnotizen erzeugt.

Durch eine Art "Bestandsaufnahme" sollten unter anderem das Ausmaß der Thematisierung der Lichtenergie und die räumlichen und materiellen Gegebenheiten für mögliche Integrationen von photochemischen Experimenten bzw. die Umsetzbarkeit der Hauptuntersuchung herausgefunden werden. Da die Forschende bis dato keine Erfahrung mit der Umsetzung photochemischer Inhalte im Chemieunterricht hatte, sollten zudem erste Eindrücke über den Umgang der Schüler mit dem Thema erhalten werden. „In diesem Fall ist eine qualitative Beobachtung mit *geringem Komplexitätsgrad* indiziert: Man konzentriert sich von vorne herein [!] auf bestimmte Ausschnitte des beobachteten Geschehens“, die als Einzelaspekte interessant sind [72].

Im Weiteren handelt es sich bei den Teilschritten (s. Kap. 3.4.1.2; Kap. 3.4.1.3) dieser Untersuchung um *mündliche* und *schriftliche Befragungen*. Konkret heißt das, dass *Interviews* und *Fragebogenerhebungen* durchgeführt wurden [365].

3.4.1.2 Interview

Es wurden insgesamt mit vier Gymnasiallehrern des Faches Chemie aus unterschiedlichen Städten in NRW (Neuss, Dortmund, Paderborn) qualitative Einzelinterviews [366] geführt.

„Für qualitative Interviews gilt das Prinzip der Offenheit; den Untersuchungsteilnehmern wird Raum für Elaboration, Klarstellung und Erklärungen und damit die Option zu tiefgründigeren und glaubwürdigeren Auskünften gegeben.“ – „Die Untersuchungsteilnehmer sollen in möglichst natürlich gehaltenen Gesprächen zur ausführlichen Darlegung ihrer Erfahrungen, Meinungen, Überzeugungen und auch ihres Wissens angeregt werden. Widersprüchlichkeiten, Vagheit und auch Nicht-Wissen können in den Antworten zum Ausdruck gebracht werden.“ [366]

Die Untersuchungsteilnehmer hatten zum Zeitpunkt unterschiedlich lange Berufserfahrung (zum Zeitpunkt des Interviews 40, 30, 5 Jahre und das Referendariat). Durch die Wahl der Erhebungsmethode des Interviews mit einer relativ kleinen zu befragenden Zielgruppe von vier Personen sollte parallel zu den schriftlichen Befragungen (s. Kap. 3.4.1.2) die Datenbasis ausdifferenziert werden [365].

Solche Aspekte [...], die in Fragebögen [...] nicht in den Blick kommen [könnten], [...] können mit Interviewgesprächen, die offene Fragen erlauben und die die Möglichkeit zu Rückfragen und weiterführenden Fragen geben, besser zutage gefördert werden. Daher eignet sich das Interviewgespräch vor allem für solche Situationen, in denen die Evaluationsakteure den Evaluationsgegenstand nicht ausreichend genau kennen oder selbst noch unsicher bezüglich der genauen Evaluationsfragen und der möglichen Antwortbreite sind. Hier können Interviewgespräche zur Exploration dienen.“ [365]

Zu Zwecken der Exploration sollte das Interviewgespräch möglichst authentischer Natur sein und sich nicht strikt an eine möglicherweise festgelegte Reihenfolge von Fragen halten, sondern Spielraum für während des Gesprächsflusses eventuell entstehende nicht eingeplante, unerwartete, spontane Situationen zur Informationsgewinnung erlauben. Trotzdem sollten die Daten und Ergebnisse aus den unterschiedlichen Interviews vergleichbar sein [72, 366, 367]. Außerdem sollte die Gewinnung von irrelevanten und zu

oberflächlichen Informationen für den zu untersuchenden Gegenstand, d. h. die Untersuchung des aktuellen Stands der Photochemie im Chemieunterricht, minimiert werden [366].

Aus diesem Grund wurde im Hinblick auf den Standardisierungsmodus des Interviews das leitfadengestützte Interview gewählt, welches sich an der „Offenheit qualitativer Forschung“ orientiert [366, 367]. „Das Leitfadeninterview ist eine häufig anzutreffende, semi-offene Form des qualitativen Interviews“ [367], wobei die „Kommunikation [...] mittels eines Interviewleitfadens strukturiert“ wird [368]. Der Leitfaden ist dabei eine Liste bzw. ein Pool aus offenen Impulsfragen, die während der Interviews zur Orientierung oder als Gerüst dienen sollen, sodass „nicht wesentliche Aspekte der Forschungsfrage im Interview übersehen werden“ [367]. *Kruse* bezeichnet ihn als „'Spickzettel', der sicherstellen soll, dass bestimmte Themen im Interview behandelt werden“ [368]. Bei den durchgeführten Interviews wurde in Abhängigkeit vom Gesprächsfluss und der Interviewsituation der Leitfaden flexibel angepasst. Wichtig war dabei, dass im Unterschied zu stark standardisierten Interviews hier spontan nach Bedarf und Interesse bedeutsame Ad-Hoc-Fragen gestellt werden konnten [369]. Insgesamt wurden unterschiedliche Fragetypen gewählt; unter anderem folgende [368]:

- Direkte Fragen, die auf eine direkte Antwort zielen,
- Vorbereitungsfragen, die nicht das „Hauptziel der Kommunikationsintention“ umfassten, jedoch dort hinführen sollen,
- suggestive Fragen, die im Vornhinein schon bestimmte Antworten beabsichtigen, und
- prospektive Fragen, „die das Ziel haben [...], zukünftige, mögliche Erkenntnisse aus der Perspektive der Gegenwart zu entwerfen“.

Folgende Fragen wurden im Vorhinein formuliert, die während des Interviews zum Teil ergänzt oder auch leicht modifiziert wurden:

- Worin liegen Ihrer Meinung nach die größten Verständnisschwierigkeiten im Chemieunterricht?
- Zu welchem Zweck integrieren Sie Experimente in Ihren Chemieunterricht?
- Es gibt Experimente, die Chemielehrer gerne durchführen würden. Welche Gründe halten sie Ihrer Meinung nach davon ab?
- Wenn Sie sich als Chemielehrperson ein Schulexperiment wünschen dürften, welche Kriterien sollte das Experiment erfüllen, welche Eigenschaften und Merkmale sollte es haben?
- Welche Rolle spielt Ihrer Meinung nach die Lichtenergie im Chemieunterricht für eine Rolle?
- Sollte oder könnte man Ihrer Meinung nach das Thema *Licht* noch mehr einbinden? Wenn ja, wie?
- Es gibt mittlerweile Experimente, die nicht wie gewöhnlich mithilfe von Wärmeenergie, z. B. eines Brenners, sondern mithilfe von Lichtenergie durchgeführt werden. Wie sinnvoll finden Sie die Integration von

solchen Experimenten, wenn wir davon ausgehen, dass die Lichtenergie eine immer größere Rolle im Hinblick auf die erneuerbaren Energien spielt?

- Welche Hindernisse / Schwierigkeiten sehen / vermuten Sie im Schulalltag beim Einsatz photochemischer Experimente?
- Was spricht Ihrer Meinung nach für die Integration photochemischer Experimente in den Chemieunterricht?

Die Interviews wurden jeweils in den Räumlichkeiten der Schulen durchgeführt und dauerten zwischen 12 und 25 Minuten. Dabei orientierte sich der Verlauf der geführten Leitfadeninterviews an dem Vorschlag von REINDERS [370]:

Phase	Beschreibung
Einstiegsphase	<ul style="list-style-type: none"> • Begrüßung • Informierung des Befragten über das Interview • Einholung des Erlaubnisses zur Aufzeichnung
Warm-Up-Phase	<ul style="list-style-type: none"> • Einführung des Interviewten in das Thema durch Vorbereitungsfragen • Vertrautmachung mit dem Interaktionsschema
Hauptphase	<ul style="list-style-type: none"> • Stellen von Fragen aus dem Leitfaden • Sukzessive Entwicklung des Gesprächs, bei dem der Befragte stärker steuert • Anpassung von Fragen an die Interviewsituation • Stellen von Ad-Hoc-Fragen bzw. bislang nicht thematisierten Fragen aus dem Leitfaden
Ausklang	<ul style="list-style-type: none"> • Langsame Entlassung des Befragten aus dem Gespräch • Danksagung

Tab. 25: Verlauf der Leitfadeninterviews in Anlehnung an [370].

Die Interviewaufnahmen wurden nach FUSS und KARBACH mit dem *modularen Transkriptionssystem* transkribiert [371]. Da „der Fokus der Analyse vorwiegend auf dem Inhalt des Interviews lag“, war ein *Grundtranskript* dafür ausreichend [371]. Somit wurde das Regelsystem der Transkription daran angepasst, sodass nach vier *Modulen* transkribiert wurde (s. Kap. 9.2): Pause, Sprachklang, Zeichensetzung und sonstige Regeln. Die in der Auswertung (s. Kap. 3.4.2.2) vorzufindenden Ausschnitte aus den Interviews sind im Hinblick auf dialektale Redewendungen und für den Inhalt irrelevante Sprachklänge so weit geglättet worden und zusätzlich wurden Satzbaufehler, die zu Missverständnissen führen könnten, behoben [372].

3.4.1.3 Schriftliche Befragung

Für die zwei weiteren Schritte der Voruntersuchungen wurde die Methode der schriftlichen Befragung gewählt. Für die erste Befragung (s. Kap. 3.4.2.3) wurden alle Universitäten angefragt, die das Fach Chemie als Lehramtsstudium für Gymnasien anbieten, sodass im Anschluss an die Einholung der Erlaubnis für

die Durchführung die *Paper-Pencil-Fragebögen* postalisch verschickt werden konnten [72, 373]. Dazu wurde zur Rücksendung ein frankierter Rücksendumschlag mitgeschickt. Insgesamt wurden 37 Universitäten angefragt, von denen mit einer Anzahl von 20 mehr als die Hälfte an der Studie teilnahmen.

Für die zweite Befragung (s. Kap. 3.4.2.4) wurden die Ansprechpartner der von den Bundesländern selbst, nämlich von den VCI¹²²-Landesverbänden und den GDCh-Fortbildungszentren [374], organisierten Lehrerfortbildungen angefragt und per Mail der entsprechende Fragebogen versendet. Letzterer war ein *elektronischer Fragebogen*, der digital ausgefüllt per Mail zurückgesendet werden konnte [72]. Anders als bei den Universitäten lag die Rücklaufquote bei den Fortbildungszentren lediglich mit 6 der angefragten Personen bei ca. 18 %.

Die Eignung des Fragebogens als ein weiteres Messinstrument für das Ziel der Voruntersuchungen (s. Kapitel 3.4.1) ist mit folgenden Argumenten nach MERCHEL gewährleistet:

„Schriftliche Befragungen haben den Vorteil, dass man zeitgleich relativ viele Meinungen oder Einschätzungen einholen kann und damit eine breite Basis für die Bewertungen innerhalb einer Evaluation erhält; ferner lässt sich durch entsprechende Arrangements die Anonymität im Erleben der Befragten so weit gewährleisten, dass sie in relativ großer persönlicher Unabhängigkeit ihre Einschätzungen im Fragebogen niederlegen. Würde man eine ähnlich breite Basis mit mündlichen Befragungen [...] herstellen wollen, wäre dies mit erheblich höherem Aufwand verbunden. Ferner könnte der Wechsel zu Interviews zu einer sachlichen Verschiebung der Ergebnisse führen, weil die Befragten dann nicht mehr so sehr auf eine anonyme Verwertung ihrer Antworten vertrauen.“ [365]

Die Bewahrung der Anonymität der Teilnehmer war im Hinblick auf die Studierenden wichtig, da durch die Beantwortung bzw. die Formulierung der Antworten und Nutzung des Fachvokabulars bei der Beantwortung der Fragen (s. Kap. 3.4.2.3) unter anderem auch Rückschlüsse über ihr Wissen gezogen werden konnten. Wohingegen die Fragen an die Ansprechpartner der Fortbildungszentren ausschließlich einen informierenden Zweck erfüllten, da weder durch Literatur noch das Internet die Beantwortung der für die angegebenen Forschungszwecke gestellten Fragen möglich war. Bei beiden Fragebögen handelt es sich um nicht-standardisierte Fragebögen, bei denen „sich die Befragungspersonen schriftlich in eigenen Worten zu einem Thema, ohne dass ein detaillierter Fragebogenkatalog vorgelegt wird“, äußern konnten [72]. Es wurde auf geschlossene Fragen verzichtet, sodass im Sinne der qualitativen Fragebogenmethode offene Fragen gestellt wurden [73,375].¹²³ „Dies ist sinnvoll, wenn der Raum möglicher Antworten groß oder nicht vollständig bekannt ist“ [376]. Außerdem ist bei offenen Fragen die Wahrscheinlichkeit größer, durch unerwartete Antworten der Teilnehmer an neue Informationen zu gelangen, unter anderem weil die Befragten in ihren eigenen Worten antworten [375].

¹²² VCI: Verband der Chemischen Industrie.

¹²³ Lediglich bei der letzten Frage an die Studierenden wurden drei Antwortmöglichkeiten angegeben, wobei jedoch wiederum die Antwortwahl individuell begründet werden sollte.

3.4.2 Auswertung

Um über die an der Studie teilgenommenen Personen eine Übersicht zu verschaffen, werden im Folgenden die Probandengruppen für die Voruntersuchungen aufgelistet:

Forschungsmethode	Ort	Probandengruppe
Beobachtung	Schulen	2 Schülergruppen; ca. n = 40
Interview	Schulen	n = 4 Lehrpersonen
Schriftliche Befragung	Universitäten	n = 426 Lehramtsstudierende
Schriftliche Befragung	Lehrerfortbildungszentren	n = 6 Ansprechpartner

Tab. 25: Die Anzahlen der Probanden, die an den Voruntersuchungen teilgenommen haben.

3.4.2.1 Beobachtungen im Chemieunterricht

Für die Auswertung wurden die Tonaufnahmen transkribiert. Die Transkriptionen und Feldnotizen wurden schließlich nach dem Prinzip der *qualitativen Beobachtung mit geringem Komplexitätsgrad* ausgewertet [72]: „Nur Einzelaspekte des beobachteten Geschehens [sind] wichtig [...]. Man konzentriert sich von vornherein auf bestimmte Ausschnitte des beobachteten Geschehens“. Dies wird im Folgenden anhand der konkreten Auswertungen deutlich:

Beide Kurse befanden sich im Themengebiet *Farbstoffchemie*. Dieses wurde vom Autor bewusst mit der Überlegung gewählt, dass im Zusammenhang mit Farbstoffen die Lichtenergie am meisten thematisiert und dort eventuell die Integration photochemischer Experimente am ehesten möglich würde. In den vier Stunden wurden folgende Themenbereiche daraus behandelt:

- Der Reaktionsmechanismus zur Herstellung von Azofarbstoffen,
- Auswertung des Experiments: Farbigkeit mit Tomatensaft und Bromwasser,
- Experiment: Herstellung vom Indigofarbstoff,
- Wiederholung: Farben und Farbstoffe.

Zum dritten Themenbereich legte die Lehrperson eine Folie mit den Aufgaben auf den Overheadprojektor (s. Abb. 59).

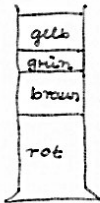
Zum letztgenannten Unterrichtsthema wurden von der Lehrperson folgende drei Aufträge an der Tafel festgehalten:

- a) Welche physikalischen Eigenschaften des Lichts verursachen den Farbeindruck?
- b) Welche Stoffeigenschaft sorgt für die Farbe eines Stoffes?
- c) Unterscheide Reflexion von Fluoreszenz.

Fachbegriffe, die innerhalb der vier Schulstunden genutzt wurden, waren unter anderem folgende: *Absorption, additive Farbmischung, subtraktive Farbmischung, Einfallswinkel, Ausfallwinkel, Reflexion, Emission, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, sp²-Hybridisierung, Wellenlänge, Energie, π -Elektronensystem, Farbigkeit, Bathochromie, funktionelle Gruppen, Azofarbstoffe, Auxochrome, Azokopplung, Diazotierung.*

Auffällig war, dass drei Schüler aus dem einen Kurs versucht haben, mit ihren Kenntnissen aus dem Physikunterricht die Eigenschaften von Licht noch

Tomaten erhalten ihre charakteristische rote Farbe durch Lycopin. Dieses Carotinoid absorbiert im blau-grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Bei Zugabe von Bromwasser zu Tomatensaft ändert sich die Farbe.



a) Erklären Sie, warum nach Zugabe von Bromwasser im Standzylinder verschiedene Farben zu beobachten sind.

b) Formulieren Sie für die beliebige Anlagerung zweier Brom-Moleküle an ein Lycopin-Molekül das Reaktionsprodukt.

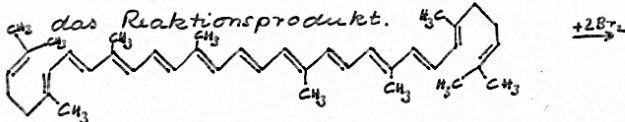


Abb. 59: Aufgaben zur Auswertung eines Experiments von der Lehrperson.

tiefgründiger zu erklären. Hier wurde ganz klar die Interdisziplinarität des Themas *Licht* deutlich, und dass Schüler, wenn möglich, auf das Wissen aus anderen naturwissenschaftlichen Fächern zurückgreifen (vgl. Kap. 3.2.3.2).

Zur Wiederholungsstunde teilte der Lehrer den Schülern die Chemieschulbücher aus, die Schüler besaßen diese also nicht. Bei Bedarf wurden sie scheinbar von dem Lehrer mit in den Unterricht genommen. In allen anderen drei Schulstunden an der zweiten Schule brachte die Lehrperson den Schülern die Arbeitsaufträge entweder in Form eines Arbeitsblatts mit, oder verschriftlichte sie auf einer Folie und legte diese zum Abschreiben auf den Overheadprojektor. In diesen Stunden wurden die Schulbücher meist nur als Informationsquelle zum Nachschlagen nebenher von Schülern genutzt. Dass diese durchschnittlich selten direkt im Unterricht ihren Einsatz finden, wurde von BAMBERGER bereits nachgewiesen [377]. Dies ist gleichzeitig ein Zeichen dafür, dass nicht jedes Schulbuch, anders als von den Lehrern gewünscht, die zu dem eigenen Unterricht bzw. die für die entsprechenden Lerngruppe passenden Inhalte enthält (vgl. Kap. 3.3.3).

Im Zusammenhang mit Lichtemission wurde über das Phänomen der Phosphoreszenz gesprochen. Dabei erklärte eine Schülerin dieses über die dort in dem Mechanismus stattfindende kurzzeitige Energiespeicherung der von dem Stoff absorbierten Lichtenergie. Dies verdeutlicht, dass die Schülerin ein Verständnis dafür hat, dass auch Lichtenergie auf eine bestimmte Art oder in bestimmter Form gespeichert werden kann.

Werden die Herangehensweisen an das Themengebiet *Farbstoffchemie* der beiden Lehrpersonen innerhalb der vier hospitierten Stunden verglichen, so fällt insgesamt auf, dass, egal wie sehr die *Inhaltsfelder*, *inhaltlichen Schwerpunkte* und *Vorschläge für mögliche Kontexte* in den Kernlehrplänen bereits zu finden sind (vgl. Kap. 3.2.3.1) [20, 142], letztendlich die Lehrperson zumindest die Nuancen darin entscheidet und die einzusetzenden Experimente bestimmt.

3.4.2.2 Interviews mit Lehrpersonen

Die Auswertungsmethode der Interviews orientiert sich an der Vorgehensweise der *qualitativen Inhaltsanalyse* nach der Ausführung dieser Analysemethode von KUCKARTZ [378]. Bei der Analyse wurde weder die Entwicklung des Gesprächsverlaufs fokussiert, noch wurde, wie es bei einer Systemanalyse der Fall ist, „Strukturaspekte, die sich in der Argumentationslogik der Textteile ausdrücken“ [379], herausgearbeitet. In erster Linie ist die inhaltliche Ebene der Lehrerantworten entscheidend. Im Gegensatz zur quantitativen Inhaltsanalyse „bezieht [die qualitative Inhaltsanalyse jedoch] auch Elemente der Interpretation mit ein“ [380]. Es wird hauptsächlich die *komparative Interpretation* durchgeführt:

„Hierbei werden Texte mit anderen Texten zum gleichen Thema [...] verglichen, um Besonderheiten wie Gemeinsamkeiten prägnant herauszuarbeiten. Zum Tragen kommen komparatistische Ansätze vor allem bei „Metastudien“ [...], also Forschungsüberblicken mit Hinsicht auf eine bestimmte Fragestellung; gleichfalls wären sie bei Vergleichen von Interviewaussagen oder anderen Datenmengen zu berücksichtigen.“ [366]

Zwar wurde hier nicht „mit einer enormen Materialmenge“ [379] gearbeitet, wie es für die *qualitative Inhaltsanalyse* von MAYRING [369] üblich ist, doch es wurde an jene Analysemethode anlehnend dennoch, zur Strukturierung der Erkenntnisse aus den Interviews, eine Kategorienbildung vorgenommen. Grundsätzlich ist die Inhaltsanalyse ein Verfahren, das „eine Auswertung an deduktiv und induktiv gewonnenen Kategorien zulässt. [...] So kann gezielt nach Äußerungen im Text gesucht werden, die sich auf Einstellungen beziehen, es können aber zusätzlich induktiv weitere Kategorien aus dem Datenmaterial gewonnen und systematisch in die Analyse einbezogen werden“ [381]. D. h.: Hier wurde das Analyseverfahren flexibel an die Intention der geführten Interviews angepasst und es hätten im Vorhinein anhand der gestellten Fragen grob Kategorien *deduktiv* entwickelt werden können. Darauf wurde jedoch verzichtet, sodass erst nach der ersten Sichtung der Transkription eine *induktive Kategorienbildung* direkt am Material vorgenommen wurde [380]. Letztendlich konnten nach dem folgenden Kategoriensystem die vier Interview-Transkripte codiert werden:

Kürzel	Name der Haupt- und Subkategorien
E	Experimente im Chemieunterricht
E P	Argumente für den Einsatz von Experimenten
E C	Argumente gegen den Einsatz von Experimenten
E W	Wunscheigenschaften / Erwartungen der Lehrpersonen
PH	Photochemische Inhalte in der Schule
PH A	Aktueller Einsatz
PH C	Argumente gegen den Einsatz von photochemischen Experimenten
PH P	Argumente für den Einsatz von photochemischen Experimenten
PH M	Möglicher Einsatz

Tab. 26: Das Kategoriensystem zur Auswertung der Interviews in Form einer Hierarchie (nach [375]).

Aufgrund des überschaubaren Umfangs konnten in Anlehnung an CORBIN und STRAUSS nach der Methode *constant comparison coding* (des permanenten Vergleichs [72]) die drei Techniken *offenes*, *axiales* und *selektives Codieren* angewandt werden [382], um folglich unter anderem durch die Unterscheidung von Abstraktionsniveaus *Haupt- und Subkategorien* festzulegen [380]. Den „Zuordnungsprozess von Kategorien und Textstellen [betrachtet MAYRING bereits] als Interpretationsakt“ [383]. Zur Kategorisierung bzw. Codierung wurde im Hinblick auf die geringe Anzahl der Interviews keine Software genutzt, sondern dieses Vorgehen manuell umgesetzt.

Zur Analyse werden die Interviewausschnitte¹²⁴ nach den Hauptkategorien sukzessive bearbeitet. Folgende Auswertung resultiert dabei mithilfe der Kategorisierung:

1. Die Lehrpersonen führen insgesamt bekannte *Argumente für den Einsatz von Experimenten* an unterschiedlichen Stellen des Interviews an: Die Schüler würden generell das Fach Chemie mit Experimenten und dem Experimentieren in Verbindung bringen. Dass Schülerinteresse durch das Experimentieren im Durchschnitt erhöht wird, ist keine neue Erkenntnis [384, 385]. „Wenn Sie nicht experimentieren, ist es langweilig“, so die Lehrperson über die Meinung ihrer Schüler. Weiter sagt sie aus: „Es ist dadurch natürlich offener und das schätzen die Schüler sehr, wenn sie das machen können. Aus dem Aspekt heraus ‚Ich möchte jetzt gerne etwas lernen‘ ist, glaube ich, prozentual etwas weniger [vertreten]“. Hier wird deutlich, dass laut Lehrperson Schüler in erster Linie nicht um des Wissens willen experimentieren, sondern wegen der Tätigkeit und der Beobachtungen, die dabei entstehen. „Ich sage jetzt mal, in den unteren Stufen ist es wirklich schon eine Motivation, sich dann damit auch zu beschäftigen“, heißt es zusätzlich. Eine weitere Lehrperson begründet den Wunsch der Schüler nach Schülerversuchen wie folgt:

„Also zum einen, weil sie praktisches Arbeiten natürlich immer attraktiver finden als in der Theorie zu arbeiten. Zum anderen auch, denke ich, weil es so ein generelles Bedürfnis ist bei vielen [Schülern] zu forschen oder ihren Ideen nachzugehen. Und ich finde, das heißt auch, dass man Phasen vom offenen Experimentieren braucht. Und wo sie das auch machen können, auch wenn es eine hohe Misserfolgswahrscheinlichkeit hat. Aber auch das muss zwischendurch gewährleistet sein.“

Eine plausible Begründung für die Lehrermeinungen im Hinblick auf den Aspekt der Motivation der Lernenden durch Experimente liefern FRISCHKNECHT-TOBLER und LABUDDE:

¹²⁴ Bei Bedarf kann auf Nachfrage in die Gesamttranskripte der Interviews eingesehen werden. Die Transkriptionsköpfe befinden sich im Anhang (s. Kap. 9.3). Diese wurden in Anlehnung an die Angaben in [371] erstellt.

„Grundsätzlich wirkt der aktive, handlungsorientierte Wissenserwerb, wie er sich beim Experimentieren und Forschen zeigt, positiv auf die Lernmotivation. Schülerinnen und Schüler sind besonders dann zum Experimentieren motiviert, wenn

1. das Experiment eine kognitive Herausforderung darstellt,
2. sich mit ihm ein klares Ziel verfolgen lässt, das immer wieder in Erinnerung gerufen wird,
3. das Experiment den Lernenden genügend Freiräume gibt,
4. das Experiment funktioniert und
5. die Ergebnisse diskutiert und in einen größeren Kontext gestellt werden“ [386].

Die Lehrer betrachten die einzusetzenden Experimente außerdem noch aus weiteren Perspektiven. Dies zeigt sich in den Antworten der Frage nach gewünschten Merkmalen eines Schulexperiments:

- (a) „Zum einen, dass es **nicht zu aufwendig** ist, weil wir bis auf in der Sek. 2 nur Einzelstunden haben. [...] Deswegen muss es **zeitlich** passen. Dann darf es vom **Material her nicht so ausgefallen** sein, dass man dafür erst mehrere Sachen anschaffen muss, weil es dann für ein Experiment in der Regel **zu teuer** wird. [...] und es sollte von dem, was man beobachten kann her, schon eine **gewisse Eindeutigkeit** besitzen. Also, dass es **zumindest bei 70 % funktioniert**, sonst wird es schwierig für die **Auswertung** [des Versuchs].“
- (b) „Also, was ich immer interessant finde, ist, weil es dann auch relativ **schülernah** ist, mit Stoffen und Materialien zu arbeiten, die denen bekannt sind **aus ihrem Alltag**. Dann darf der **Aufwand nicht so hoch** sein. [...] dass die Schüler [den Versuch] selbst mit einem **guten Ergebnis durchführen** können, das wäre toll!“
- (c) „Dann müssen die Experimente auch so sein, dass man weiß, welchem [inhaltlichen] Bereich man sie zuordnen kann, wo es [inhaltlich] passt. [...] Es ist hilfreich zu wissen, **wo ich das einsetzen** kann.“

Kurz und knapp drückt eine Lehrperson die Merkmale mit den folgenden beiden Adjektiven aus: *Einfach* und *eindrucksvoll* sollen die Schülerversuche nämlich am besten sein. Das Experiment sollte idealerweise die sinnliche Wahrnehmung ansprechen und zudem sollten Schüler mit den für den Aufbau eines Experiments zur Verfügung stehenden Materialien selbstständig umgehen und somit den Versuch durchführen können (a, b). Für eine der Lehrpersonen wären auch hilfreiche Informationen zur Verortung des Experiments wichtig (c). Außerdem wird durch sowohl internationale als auch nationale Studien bestätigt, dass in erster Linie „nicht die Anzahl und die Dauer der

Experimentierphase das Lernen aus Experimenten positiv beeinflusst, sondern dass vor allem die Einbettung und die praktische Gestaltung der Experimente von großer Bedeutung“ seien [387].

Zusätzlich sollen, da ein gewisser Zusammenhang zu diesen Lehrermeinungen besteht, auch die Interviewpassagen der Unterkategorie *Argumente gegen den Einsatz von Experimenten* zuerst dargelegt werden. Im Anschluss daran werden dann die den Lehrern wichtigen Merkmale von Schülerexperimenten ergänzt und konkreter herauskristallisiert. Den Lehrern wurde hierzu folgende Frage gestellt: *Es gibt Experimente, die Chemielehrer gerne durchführen würden. Welche Gründe halten sie Ihrer Meinung nach davon ab?* Die Antworten dazu lauten:

- (d) „Ich bin noch nicht lange dabei, weil ich in der Universität ganz viel gemacht habe, was man im Unterricht nicht macht. Und dafür bei Experimenten aus dem Unterricht nicht Erfahrung habe und entsprechend **unsicher** bin. Bei Experimenten, die auch eine gewisse **Gefahr beinhalten**, wofür man auch die **Zeit braucht**, es erst einmal für sich in Ruhe auszuprobieren. Und wenn man diese nicht hat, dann guckt man ein Video. Und zum anderen ist das bei uns so, dass wir **nur einen Abzug** haben, der nicht von hinten zu begehen ist. [...] Schülerexperimente, die unter dem Abzug zu machen sind, lassen sich in der Regel nicht durchführen, außer, es ist ein **sehr kleiner Kurs** oder man hat verschiedene Gruppen.“
- (e) „**Aufwand**, das [Experiment] vorzubereiten, die hohe **Schüleraktivität unter Kontrolle** zu halten, **Sicherheitsbedenken** [...], mit dem **Bunsenbrenner** zu arbeiten. Da verbrennt sich jemand vielleicht etwas. Ich glaube, es ist schon der **Zeitaufwand**, sich damit zu beschäftigen. Vorwiegend. Weil es vorher ausprobiert werden muss. Wenn man es nicht ausprobiert, kann es passieren, dass es im Unterricht **nicht gelingt**. Das ist auch nicht gut. Daher, glaube ich, neigen einige Kollegen dazu, das Experiment einfach nicht durchzuführen.“

Im Gesamten bedeutet dies, dass die Schülerexperimente, soweit es geht, gefahrlos von den Schülern selbst durchführbar sein sollten. Explizit wird hier der Bunsenbrenner als eine mögliche Gefahrenquelle betont. Wichtig wäre auch, dass die Materialien dafür nicht kostenintensiv sein dürften und am besten, so eine Lehrperson, Materialien genutzt würden, die den Schülern aus ihrem Alltag bekannt sind (a, b). Das Experiment muss klar von der Umsetzung her sein und darf somit auch nicht zu viel Zeit in Anspruch nehmen (a, d, e). Dass ein Experiment sehr viel Zeit allein für die Vorbereitungen und das vorherige Testen in Anspruch nimmt, ist für die interviewten Lehrer ein eindeutiges Manko. Außerdem wünschen sich die Lehrer eine hohe Wahrscheinlichkeit für das Gelingen des Experiments bzw. sichere Ergebnisse (d, e).

2. Um etwas über die aktuelle Integration photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht und deren Ausmaß zu erfahren, wurde unter anderem folgende Frage gestellt: Welche Rolle spielt Ihrer Meinung nach die Lichtenergie in dem Chemieunterricht für eine Rolle? Es wurde absichtlich nicht explizit nach der Rolle der Photochemie gefragt. Der Grund für die Wahl des abstrakteren und umfassenderen Ausdrucks Lichtenergie bzw. für diese implizite Frage war es, herauszubekommen, welche Art von Inhalten die befragten Lehrer damit in erster Linie in Verbindung bringen und inwieweit ihnen photochemische Inhalte einfallen; und zudem sollte dadurch der Anteil der Photochemie mit weiteren Inhalten im Zusammenhang mit der Lichtenergie zu verglichen werden. Aus den Antworten auf jene Frage und weiteren Stellen aus den Interviews ergab sich die Subkategorie *Aktueller Einsatz photochemischer Inhalte* im Chemieunterricht:

- (a) „Ich würde schon sagen, dass man ja immer wieder darauf zurückgreift. Also zum einen ja schon, wenn man sich **Energieumsatz** anguckt. Dass man da ja auch exotherme Reaktionen darüber charakterisiert, dass man da noch eben das **Nachglühen** hat oder eine **Flamme**, die danach erscheint. Dann ist es ja auch so, dass man, wenn man die Elementgruppen untersucht, man z.B. schaut, welche Färbung welches Salz macht. ... gut bei den **Farbstoffen** natürlich, wenn man da Also eigentlich wird die Lichtenergie thematisch ja zumindest nicht in der Form behandelt, dass den Schülern deutlich wird, von wo bis wo das Spektrum geht oder auch, was energiereich und was energiearm ist. Da erwartet man, dass sie das so in Teilen aus dem **Physikunterricht** mitbringen, was sie manchmal tun und manchmal nicht. Das noch mal so extra zu thematisieren, hat man auch keine Zeit. [...] Man nutzt es ja eher, um sich Energieumsätze oder ähnliches anzugucken.“
- (b) „In der Sekundarstufe II gibt es das ja auch zum Teil bei der **radikalischen Polymerisationsreaktion**, wo man das mit dem Tageslichtprojektor machen kann oder ähnliches. [...] Aber in der Sekundarstufe I nutzt man das ja überhaupt nicht eigentlich.“
- (c) „In der 9. Klasse machen wir z.B. die Elektrolyse mit Wasser mit **Solarzellen**. Aber auch je nach Zeit, weil andere Sachen gemacht werden müssen und das dann das ist, was man machen kann, wenn man noch Zeit hat.“
- (d) „Man kann verschiedene nette Versuche machen. Man fängt an, **Chlorophyll-Extrakt** herzustellen. Jeder kennt grüne Blätter. Dann kommt das erste Phänomen. Wenn man das mit UV-Licht bestrahlt, wird es knallrot und das ist richtig deutlich zu sehen. Dann hat man noch die **Fluoreszenz** und die **Phosphoreszenz**. [...] und dann kann man ein bisschen **[Chemo-]Lumineszenz**.“

- (e) „Ich mache eine sehr ausgedehnte Einführungsphase [im Themenfeld *Farbstoffchemie*], 2 Wochen lang: Licht; Wie funktioniert das mit dem Licht?; Was ist die **additive Farbmischung**; **subtraktive Farbmischung** ... dann auch noch die **optische Täuschung**. Wie funktioniert die? Und auch ... Wie sehen wir überhaupt? Das ist eben Grundlage für alles, was danach kommt. D. h. es ist sinnvoll, ausführlich darauf einzugehen und evtl. mit dem **Physiklehrer** zu kooperieren.“
- (f) „In meinem Unterricht spielt die Lichtenergie [im Hinblick auf das Themenfeld *Farbstoffchemie*] eine untergeordnete Rolle. Die Tatsache, dass es Licht gibt... Ich habe auch die entsprechenden Formeln angeschrieben und habe immer darauf hingewiesen, dass Energie und **Wellenlänge** immer umgekehrt proportional sind. Das war immer ganz wichtig, und dass man sich im **Spektrum** orientieren kann, dass also das violette Licht energiereicher ist ...“
- (g) „Im Bereich **der organischen Reaktionen**, da brauchen wir für manche [Versuche] Lichtenergie, UV-Strahlung, und dann brauchen wir das im Bereich der **Farbstoffchemie**.“
- (h) „Eine typische lichtinduzierte Reaktion, die ich immer gerne zumindest als Film vorführe, ist die **Chlorknallgasreaktion**.“
- (i) „Was mir natürlich spontan [aus meiner MINT-AG] einfällt, wofür sich die Schüler auch interessieren, sind **Knicklichter**. [...] Und dann haben sie auch versucht, **kaltleuchtende Stoffe** in anderen Alltagsmitteln zu finden, in Tee und solchen Dingen.“

Es ist auffällig, dass die vier Lehrpersonen, weder explizit noch implizit, kaum photochemische Experimente nennen, die sie aktuell in der Unterstufe fest in ihrem praktischen Unterrichtsprogramm einsetzen. Lediglich eine der Lehrpersonen spricht den Einsatz von Solarzellen (zur Wasserzersetzung) nur bei ausreichend viel Zeit an (c). Weiter wird noch die Chlorknallgasreaktion, d. h. eine lichtinduzierte Radikalbildung, angesprochen, die jedoch nur theoretisch anhand eines Lehrfilms, die die Lehrperson im Unterricht bespricht (h). Daneben sprechen zwei Lehrpersonen zwar Experimente an, wie z. B. die Flammenfärbung im Zusammenhang mit Alkalimetallen und der Einführung von exothermen Reaktionen (a), oder die Chemolumineszenz von Knicklichtern usw. (i). Dies sind ebenfalls Phänomene mit Lichtbeteiligung, wenngleich sie nach der IUPAC-Definition (s. Kap. 2.3.3) nicht als photochemische Vorgänge betrachtet werden.¹²⁵ Laut Aussage (b) soll die Lichtenergie angeblich in der Sekundarstufe 1 sogar überhaupt keinen Einsatz finden. Vielmehr wird die Lichtenergie und ihr Einsatz in Experimenten in der Oberstufe verortet (b, d, e, f, g). Konkret gehören zu

¹²⁵ Es handelt sich hierbei aber sehr wohl allgemeiner gefasst um Photoprozesse mit angeregten Molekülzuständen (vgl. Kap. 2.3.3.2).

den aktuellen Experimenten, die der eine oder andere befragte Lehrer durchführt, scheinbar eine radikalische Polymerisation (b), Beleuchten des Chlorophyll-Extrakts mit UV-Licht und zudem noch weitere Versuche zur Photo- und Chemolumineszenz (d). Alle aufgeführten Experimente lassen sich in das Inhaltsfeld aus dem KLPen der Sek. 2 *Organische Produkte – Werkstoffe und Farbstoffe* einordnen [20].

Anstatt über den Aspekt der Nutzung von Licht als eine Energieform und über dessen chemische Wirkung zu sprechen, gehen zwei der Lehrer viel mehr auf die physikalischen Eigenschaften von Licht ein (e, f). Dass das Thema *Licht* auch im Physikunterricht vorkommt, ist den Lehrpersonen bewusst (a, e). Somit zeigt sich hier eine Möglichkeit der interdisziplinären Kooperation. Unterstützt wird diese Idee durch die folgende Aussage einer Lehrperson:

„Ich glaube, [die Farbstoffchemie] haben Viele stiefmütterlich behandelt, weil da viele physikalische Aspekte sind und ich glaube, das ist [der Grund], warum dann die Kollegen vielleicht lieber Kunststoff-Chemie machen. Wegen den physikalischen Aspekten scheuen sich vielleicht auch einige. Genau!“

Auch gerade deshalb wäre eine Zusammenarbeit von Chemie- und Physiklehrern sinnvoll und denkbar. Tatsächlich könnten zudem die Schüler ein gewisses Grundwissen über Lichtenergie aus dem Physikunterricht mitbringen, zumindest theoretisch laut der KLPe des Faches Physik (s. Kap. 3.2.3.2), „denn [f]ächerübergreifender naturwissenschaftlicher Unterricht wird in nahezu allen Lehrplänen gefordert“ [388]. Der Austausch der beiden Fachlehrer könnte die Nutzung von Synergieeffekten fördern, sodass damit einhergehend Unterrichtszeit eventuell für den Einsatz passender photochemischer Experimente verlagert werden kann.

3. Eine weitere Frage, die den Lehrern gestellt wurde, lautet: *Welche Hindernisse / Schwierigkeiten sehen / vermuten Sie im Schulalltag beim Einsatz photochemischer Experimente?* Mit den Antworten darauf und einigen weiteren Aussagen, die im Laufe der Interviews entstanden, bildet sich die Subkategorie *Argumente gegen den Einsatz photochemischer Experimente* bzw. Nachteile davon wie folgt:

- (a) „Also zum Teil sicherlich, dass je nach dem, was man als Lichtenergie braucht, man einfach die **Quellen dafür nicht hat** und dementsprechend einiges nicht durchführen kann oder auch **Schutzvorkehrungen** für die Schüler nicht treffen kann, zumindest nicht, wenn man mit einer normalen Klassenstärke arbeitet. Bei den Experimenten, wobei Licht am Ende emittiert wird, gibt es das Problem, dass es häufig **schwierig zu sehen** ist. Man kann aber den Raum, wenn man acht Schülergruppen hat, die experimentieren, nicht so **abdunkeln**, dass [für jeden] alles gut zu sehen ist. [...] Aber man braucht da schon sehr **eindeutige Reaktionen**, damit das gut zu sehen ist.“
- (b) „Zum Teil kann man die Experimente **nur im Abzug** machen. Wir haben diesen einen Abzug. D. h. da sieht keiner was. Dann ist da das

Problem mit den **Chemikalien**, dass sie zum Teil recht **problematisch** oder auch **sehr teuer** sind.“

- (c) „Ein Nachteil [von photochemischen Experimenten] ist vielleicht, dass **gasförmige Stoffe entstehen**, die natürlich auch bei den organischen Reaktionen entstehen. Natürlich dann auch der **Sicherheitsaspekt**, weil viele keine **Abzüge** haben. Dann kann man das nur als Lehrer-Demonstrationsexperiment und nicht als Schüler-Demonstrationsexperiment durchführen.“

Wie aus den geführten Interviews herauszuhören war, haben die Lehrpersonen ihre praktischen Erfahrungen in der Schule mit Licht, das als eine Energieform in Experimenten eingesetzt wird, d. h. mit der Photochemie, fast ausschließlich im Oberstufenunterricht gesammelt und wurden kaum, wenn nicht überhaupt nicht, in der Unterstufe damit konfrontiert. Die getroffenen Aussagen (a – d) aus der zuletzt aufgeführten Subkategorie sind vermutlich nur aus den unter Punkt 2 aufgezeigten eigenen Erfahrungen (a – i) der Lehrer entstanden. Dabei handelt es sich aus der Perspektive der aktuellen Forschung zu photochemischen Experimenten für den Schulunterricht nur um vermeintliche Nachteile bzw. Fehlvorstellungen dieser Lehrpersonen. Hilfreich sind diese Angaben bei der Wahl der photochemischen Experimente für die Arbeitsmaterialien und die Feldstudie (s. Kap. 4.1.1.1), denn aus diesen Angaben der Lehrpersonen, die zum Teil Fehlvorstellungen (s. Kap. 3.4.2.5) sind, lässt sich zugleich eine Liste aus Kriterien erschließen, die photochemische Experimente aus der Sicht der Lehrer erfüllen sollten:

Scheinbar wünscht sich eine der Lehrpersonen, dass die Materialien für die Schülerversuche sich an die aktuellen Umstände in den Schulen anpassen (a). Zum Teil decken sich diese Aussagen speziell über photochemische Experimente auch mit den Erwartungen der Lehrer an Schülerversuche aus Punkt 1 (a – c). Laut Aussage (d) wäre es ideal, wenn alle Schüler die Experimente durchführen könnten und diese nicht nur als Demonstrationsexperiment umzusetzen wären. Außerdem müssen die nötigen Materialien inhaltlich so gestaltet sein, dass in den Chemieräumlichkeiten die Schutzvorkehrungen dafür eingehalten werden können (a). Zwei Lehrpersonen gehen scheinbar davon aus, dass sogar öfters auch der Abzug für solche Arten von Experimenten genutzt werden müsse (b, d). Eine der Lehrpersonen begründet dies mit der Gasentwicklung (d). Jedoch gibt es mittlerweile ausreichend viele photochemische Experimente, bei denen sich weder giftige Gase bilden, noch aus anderen Gründen der Abzug nötig wäre [7, 24, 252, 389]. Von großer Bedeutung sei auch das Ergebnis der Versuche. Sie sollten eindeutig und erkennbar sein. Dafür müssen Maßnahmen überlegt bzw. entwickelt werden, die beispielsweise dafür sorgen, dass auch die Emission bei Experimenten zu Photolumineszenz von Schülern gut beobachtbar ist (a). Grundsätzlich besteht aber auch der

Bedarf nach Erfahrungen der Lehrer mit photochemischen Experimenten, durch die dann die meisten hier als Nachteile angegebenen Aspekte widerlegt werden können. Denn allein dadurch können Vorurteile gegenüber der Photochemie und Photoprozesse im Allgemeinen am effektivsten abgebaut werden, sodass bei dem einen oder anderen Lehrer die Hemmschwelle beseitigt und somit photochemischen Experimenten eine Chance zur Integration in den Chemieunterricht gegeben wäre. Damit wäre ein Argument mehr entkräftigt.

4. Auf die Frage *Was spricht Ihrer Meinung nach für die Integration von photochemischen Experimenten in den Chemieunterricht?* entwickelte sich ein Pool aus den folgenden Pro-Argumenten der Lehrpersonen:

- (a) „Dass man daran ganz **viel zeigen** und ganz **viel sehen** kann.“
- (b) „In erster Linie ist [Lichtenergie] eine **Alternative** zur Wärme. Viele Experimente starten durch Wärme und [...] wenn man jetzt noch ein zweites Beispiel hätte und somit sagen könnte ‚*Es muss nicht immer Wärme sein, sondern kann auch Licht sein!*‘.“
- (c) „Um gerade auch das **Konzept der Energie** den Schülern nahezu legen. Dass es **nicht nur die Wärme** gibt, mit der Reaktionen gestartet werden, sondern dass wir das auch mit anderen Dingen tun können. Sei es durch mechanische Energie [...] oder durch Lichtenergie.“
- (d) „**Aufwandtechnisch**, würde ich sagen, [sind die photochemischen Experimente] eher positiv, weil **kein Dreck** entsteht. Nicht so wie bei anderen Experimenten mit dreckigen Reagenzgläsern, wenn dann arbeitet man ja vorwiegend nur mit Küvetten oder mit Flüssigkeiten in Reagenzgläsern. [...] Ein Vorteil für mich ist erst einmal, dass es "saubere Chemie" in Anführungszeichen ist.“
- (e) „Den Schülern [damit] **Alternativen** noch einmal aufzuzeigen, wäre sicherlich nicht verkehrt.“

Den Lehrern geht es in erster Linie darum, den Schülern aufzuzeigen, dass Lichtenergie einen mindestens so wichtigen Stellenwert als eine Energieform hat wie die Wärme. Mit der Wärme ist höchstwahrscheinlich konkret der Einsatz von Brennern in den Schulexperimenten gemeint. Eine Lehrperson geht völlig unerwartet auf den Faktor *Sauberkeit* ein. Sie ist der Überzeugung, dass photochemische Experimente nicht so viel Zeit zum Aufräumen und Säubern der Materialien beanspruchen würden wie beispielsweise Versuche, bei denen in Reagenzgläsern Substanzen erhitzt werden und diese später wieder intensiv geputzt werden müssen. Weitere Vorteile photochemischer Experimente finden sich eigentlich implizit in Punkt 1 (*Argumente für den Einsatz von Experimenten; gewünschte Merkmale eines Schulexperiments*), denn viele der Angaben werden von verschiedenen

sten photochemischen Experimenten erfüllt (s. Kap. 4.1.1.1.1; Kap. 5.4.4.2). Auffällig ist, dass in keiner der Antworten die durch den Einsatz photochemischer Experimente einhergehende innovative Zukunftsorientierung, auf die in den KLPen hingewiesen wird (s. Kap. 3.3.3), herauszuhören ist.

5. In den vier Interviews wird an einigen Stellen deutlich, in welchen Themenbereichen noch mehr Experimente, bei denen Licht als Energieform nötig ist, ihren Einsatz finden könnten:

- (a) „Energie ist ja sowieso ein ganz spezielles Thema. Das ist für die Schüler auch nicht so gut fassbar. Aber wir brauchen es in der Chemie, um vieles zu erklären. Ich setze in der **Jahrgangsstufe 7** schon damit an, das [Thema *Energie*] auch wirklich permanent zu verwenden und was passiert, wenn man einen Stoff erwärmt. Dass da Kräfte zwischen den Atomen überwunden werden. Von daher wäre es interessant zu wissen, was man da auch mit Licht und Lichtenergie machen kann. Überhaupt den Aspekt Energie, und gerade mit Lichtenergie wäre da interessant, damit ein bisschen mehr zu machen.“
- (b) „[...] Der Schwerpunkt bei den **Farbstoffen** liegt in meinem Unterricht auf dem Zusammenhang zwischen Struktur des Moleküls und dem Absorptionsverhalten. Ich weiß nicht, ob man an der Stelle etwas ausweiten kann, weil wir dafür keine Zeit haben.“
- (c) „Ja aber es ist ja nie eine reaktive [Wirkung]. Das ist ja immer nur eine Wirkung, die eine Anregung und das Wiederzurückfallen in den Grundzustand. Man nutzt [die Lichtenergie] ja ganz selten dafür, dass eine Reaktion auch anders verläuft und dass aus dem angeregten Zustand ja irgendwelche **Redoxprozesse** angestoßen werden: Das, was z. B. die **Photosynthese** macht. Das wären ja solche Sachen, wo man sagen würde, Lichtenergie startet da etwas, was anschließend reagiert. Aber das kommt in der Farbstoffchemie eigentlich so überhaupt nicht vor.“
- (d) „Ich würde diese Reaktionen [, die durch Lichtenergie stattfinden,] nicht unbedingt unter dem Thema *Farbstoffchemie* einordnen, sondern allgemein zu **Reaktionsenergetik**. Man macht ja z. B. in der **7. Klasse endotherme und exotherme Reaktionen**. [...] Wenn man dann [...] sagen könnte: ‚So, jetzt nehmen wir mal eine andere Energieform, z. B. Lichtenergie.‘ [...] Oder vielleicht auch in der **8. oder 9. Klasse**. Da hat man ja immer wieder im Rahmen des Spiralcurriculums die Frage der Energetik.“
- (e) „Dann gibt es noch die Reaktionen, die spontan ablaufen. Den Schülern da **Alternativen** [wie z. B. Reaktionen, die durch Lichtenergie stattfinden,] aufzuzeigen, wäre sicher nicht verkehrt.“

Ingesamt betrachtet kann laut der Aussagen der Lehrpersonen die Lichtenergie in allen Jahrgangsstufen, wo es im Chemieunterricht um die Reaktionsenergetik geht, als eine alternative Energieform neben den herkömm-

lichen Beispielen thematisiert werden (a, d, e). Konkret werden auch Kontexte wie *Redoxprozesse, Photosynthese, endotherme und exotherme Reaktionen* aufgeführt, die als mögliche Andockstellen für photochemische Experimente dienen könnten (c, d). Dabei gehe es, so der Lehrer, um „mehr als nur eine Wirkung [der Lichtenergie], die eine Anregung und das Wiederrückfallen in den Grundzustand“ (c) des Moleküls erreichen soll. Der Lehrer unterscheidet hier allgemein zwischen zwei Vorgängen: Beispielsweise geht es bei der Photolumineszenz (s. Kap. 2.3.3.3.1) um die Konversion der Lichtenergie teilweise in Bewegungsenergie und dadurch auch in energieärmeres Licht, das von den Molekülen wiederum emittiert wird. Im Unterschied dazu werden im Falle von photoinduziertem Elektronentransfer (s. Kap. 2.3.3.3.5) durch Lichtenergie chemische Reaktionen eingeleitet bzw. „irgendwelche Redoxpotenziale angestoßen“ (c). Als Beispiel dafür führt der Lehrer hier die Photosynthese an.

Eine Lehrperson sieht aufgrund des Zeitmangels kaum eine Chance, das Thema *Farbstoffchemie* noch weiter durch photochemische Experimente auszuweiten und begründet dies zusätzlich dadurch, dass sie hauptsächlich die Beziehung zwischen der Molekülstruktur und dem Absorptionsverhalten fokussiere. Aber gerade dieser Sachverhalt könnte zumindest auf phänomenologischer Ebene mithilfe von anschaulichen photochemischen Experimenten visualisiert werden (s. Kap. 4.1.1.1).

Werden diese vier Ausschnitte (a) bis (d) gemeinsam mit den Aussagen in der Subkategorie *Aktueller Einsatz photochemischer Inhalte im Chemieunterricht* aus dem Punkt 2 der Auswertungen betrachtet, so kristallisieren sich für die Weiterarbeit des Autors zwei übergeordnete inhaltliche Bereiche zur Integration von weiteren photochemischen Inhalten bzw. Schülerversuchen in den Chemieunterricht heraus. Diese könnten wie folgt lauten: *Farbigkeit und Lichtenergie; Energiekonversion und -speicherung*.

Festgehalten werden kann, dass aus Lehrerperspektive Erwartungen an Schulversuche bestehen. Je mehr davon erfüllt werden können, desto eher ist das Experiment zufriedenstellend. Dazu trifft eine der Lehrpersonen eine entscheidende Aussage: „Ich bin der Meinung, das Experiment ist unerlässlich. [...] Alles nur von der Theorie her durchzunehmen, ist, glaube ich, nicht im Sinne der Naturwissenschaft.“ In diesem Fall führt nicht jeder Weg nach Rom; d.h., der Weg des Chemieunterrichts ohne praktische Arbeit der Schüler führt nicht zu einem qualitativ guten Chemieunterricht. Zusätzlich ist an verschiedenen Stellen des Interviews auffällig, dass Lehrer ein verzerrtes Bild von photochemischen Experimenten bzw. Inhalten haben, die teilweise auch auf Defizite in dem Fachbereich hinweisen. Der Bedarf an Photochemie im Chemieunterricht ist somit nicht zuletzt durch die Argumente der Lehrpersonen für den Einsatz von photochemischen Experimenten (Punkt 4) und ihr Aufzeigen von deren Einsatzmöglichkeiten (Punkt 5) zu erkennen.

3.4.2.3 Befragung von Studierenden

Insgesamt wurden Lehramtsstudierende für die Schulformen Gymnasium und Gesamtschule aus deutschlandweit 20 Universitäten befragt. Die Stichprobengröße beträgt $n = 426$. Folgende vier Items (d. h. Fragen oder Aufgaben) wurden dafür gewählt:

- Kennen Sie **photochemische Experimente** aus Ihrer eigenen **Schulzeit**? Wenn ja, welche sind das?
- Kennen Sie photochemische Experimente aus Ihrem **Studium**? Wenn ja, welche sind das?
- Warum** würden Sie photochemische Experimente später als Lehrperson in Ihrem Chemieunterricht einsetzen?
- Vervollständigen Sie die Aussage: „**Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärmeenergie oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / weniger relevant / genauso relevant sein.**“ und begründen Sie Ihre Entscheidung.

Aufgrund der Größe der Stichprobe wurde hauptsächlich quantitativ ausgewertet. Hierfür wurde die Methode der induktiven Kategorienbildung gewählt (vgl. Kap. 3.4.2.2). Die Ergebnisse der Kategorisierung konnten mithilfe von Häufigkeitsverteilungen (Histogrammen) bzw. Säulendiagrammen veranschaulicht werden. Die vier gewählten Items werden im Folgenden in ihrer Reihenfolge ausgewertet:

Für die ersten beiden Fragen (Abb. 60, 61) wurde das gleiche Kategoriensystem gewählt:

	Name der Kategorie	Beispielaussagen
A	Photolyse	Halogenierung von Alkanen; radikalische Bromierung; Entfärbung einer Bromlösung, die auf dem OHP stand; Radikalbildung (OHP); radikalische Polymerisation; Cyclisierung; usw.
B	Analytische Verfahren	Photometrie; Spektroskopie; Flammenfärbung; usw.
C	Physikalische Experimente	Lichtbrechung; Photoeffekt; optische Dispersion; usw.
D	Photokatalyse, Photoredoxreaktionen	Photosynthese; Fotografie; Bleichen von Textilien; usw.
E	Photolumineszenz	Fluoreszenz; usw.
F	Chemolumineszenz, Biolumineszenz	kalte Weißglut; Knicklichter; Fluoreszenz von Bakterien; Blutnachweis; usw.
G	Photoelektrochemie, Photovoltaik	Solarzellen; photogalvanische Elemente; Titandioxid-Solarzellen; usw.
H	Elektrolumineszenz	Halogenlampen; OLED ¹²⁶ ; usw.
I	Photoisomerisierung	Cis-trans-Isomerisierung; Experimente mit Spiropyran; usw.
K	keine Angabe, nein	

Tab. 27: Das Kategoriensystem für die Antworten der ersten beiden offenen Fragen in der Befragung für die Lehramtsstudierenden.

¹²⁶ OLED: Organic light emitting diode.

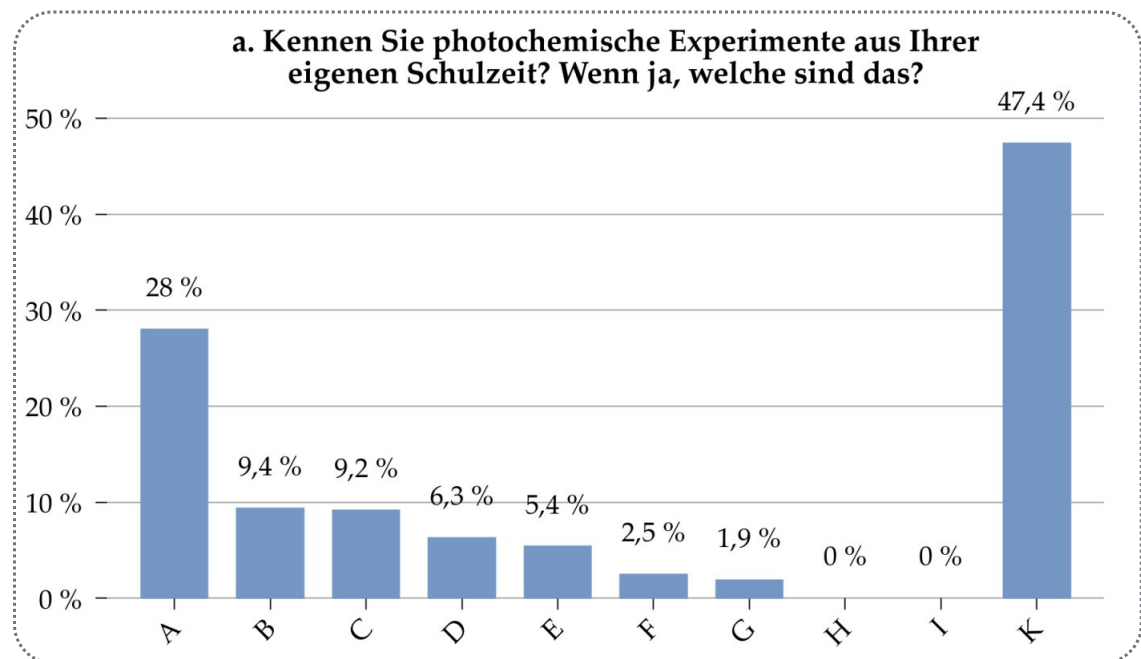


Abb. 60: Antworten der Studierenden (n = 426) auf die Frage *Kennen Sie photochemische Experimente aus Ihrer eigenen Schulzeit? Wenn ja, welche sind das?*, ausgewertet nach dem Kategoriensystem in Tab. 27.

1. Fast jedem Zweiten (47,4 %), d. h. 122 der befragten Lehramtsstudierenden, sind nach eigenen Angaben keine photochemischen Experimente aus der eigenen Schulzeit bekannt (Abb. 60). Mehr als die Hälfte ($2 \cdot 28,6 \% = 57,4 \%$) derer, die mit *Ja* antworteten, gaben als ihnen aus der Schulzeit bekanntes Experiment die lichtinduzierte radikalische Bromierung an (vgl. Kap. 2.2.1.2). Typischerweise wird dem Glasbehälter, in dem sich das Alkan befindet, Brom hinzugefügt. Dieser wird anschließend auf den Overheadprojektor (OHP) gestellt, sodass sich die braun-orangefarbene Probe langsam mit Einwirkung der Lichtenergie der Lampe des OHPs entfärbt. Von einigen der Studierenden wird der OHP explizit als Lichtquelle erwähnt.
2. Eine beachtliche Anzahl an Studierenden (50 Befragte) bezeichnet Schulversuche als photochemisch, die nach Definition der Photochemie jedoch keine sind. Diese wurden unter anderem in den Kategorien C und F zusammengeführt (s. Tab. 27): Fast 20 % der Studierenden, die mindestens ein ihnen aus der Schulzeit bekanntes Experiment angeben, nennen Schülerversuche, bei denen Licht aus physikalischer Perspektive beispielsweise mit einem Prisma erforscht wird und zu den klassischen Experimenten aus dem Physikunterricht gehören (Kategorie C). Der Rest der 50 Befragten gibt anwendungsbezogene Beispiele für die Lichtemission aus dem Alltag oder der forensischen Forschung an, wie *Knicklichter*, *Nachweis von Blut*, *Fluoreszenz von Schweineblut* etc., jedoch handelt es sich hierbei um durch chemische Reaktionen initiierte Lichtemission (Kategorie F).
3. Fast 10 % der Studierenden geben analytische Verfahren (Kategorie B) als photochemische Experimente an. Die Mehrheit davon nennt die

Flammenfärbung. Damit ist die qualitative Analyse von Proben gemeint, die zur Feststellung der Anwesenheit von gewissen Elementen oder ihren Verbindungen dient. In der Sekundarstufe 1 wird dies im Kontext der Alkali- und Erdalkalimetalle anhand der charakteristischen Färbung der nichtleuchtenden Flamme des Teclubrenners umgesetzt [317, 361]. Auch dabei handelt es sich nicht um photochemische Experimente. Wohingegen beispielsweise bei der *Photometrie* Licht genutzt wird; jedoch spielt sie dort in den physikalisch-technischen Grundlagen dieses Analyseverfahrens nicht die Rolle eines Reaktionsinitiators.

4. Auffällig ist zudem, dass kaum Experimente genannt werden, in denen das Licht explizit als eine Energieform betrachtet wird, welche in eine weitere im Alltag nützliche Energieform, wie beispielsweise elektrische Energie, umgewandelt wird. Diese Art von Schulversuchen sind mit einem Anteil von 10,3 % unter Kategorie G zu finden.

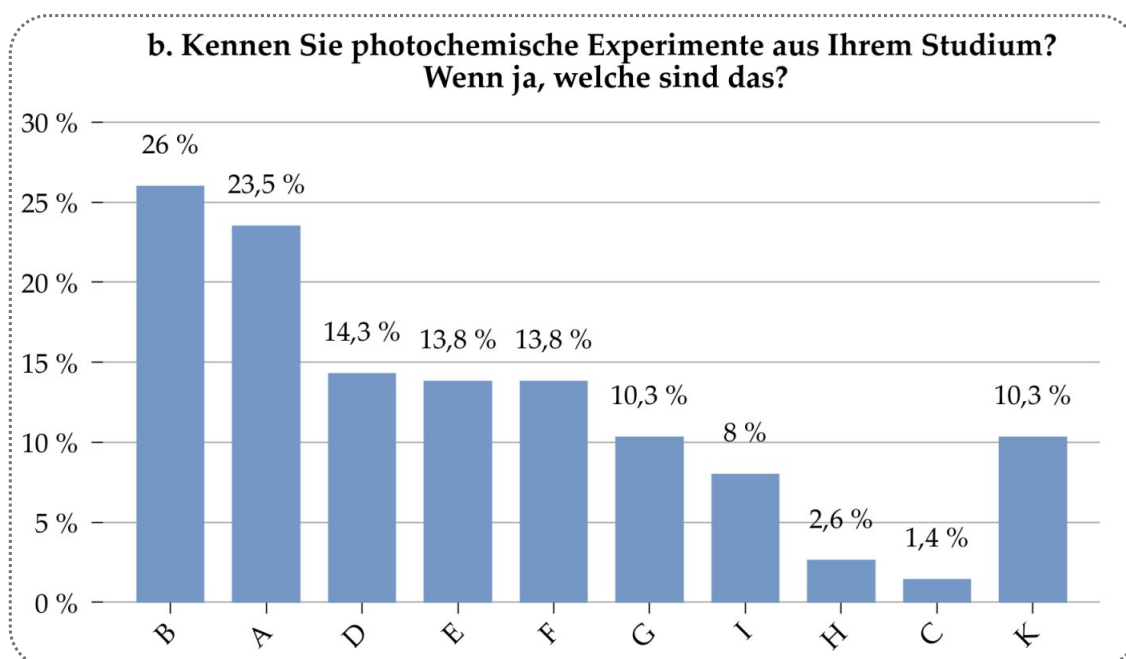


Abb. 61: Antworten der Studierenden (n = 426) auf die Frage *Kennen Sie photochemische Experimente aus Ihrem Studium? Wenn ja, welche sind das?*, ausgewertet nach dem Kategoriensystem in Tab. 27.

5. Während zu Frage a (s. Abb. 60) aus den Antworten der befragten Lehramtsstudierenden insgesamt 270 angegebene Experimente den Kategorien A bis I zugeordnet werden konnten, sind es in diesem Fall zu Frage b (Abb. 61) mit 512 Angaben in etwa doppelt so viele Experimente, die Studierende dieses Mal als ihnen aus dem Studium bekannte Experimente aufführen. Außerdem ist die Vielfalt der genannten Experimente in den Antworten auf die Frage b viel größer. Im Studium lernen die Lehramtsstudierenden, und damit die zukünftigen Chemielehrer, photochemische Experimente scheinbar in einem größeren Aus-

maß kennen, als dass diese nachher in der Schule ihren Einsatz finden. 202 Studierende konnten aus der eigenen Schulzeit keine photochemischen Experimente nennen, wohingegen die Anzahl derer, die keine Versuche zur Photochemie nennen konnten, sich auf ca. ein Fünftel reduziert hat, zu denen von 426 lediglich 44 Lehramtsstudierende (Kategorie K) gehören.

6. Am häufigsten werden analytische Verfahren (Kategorie B) als aus dem Studium bekannte photochemische Experimente angeführt (s. Abb. 61). Insbesondere photometrische Untersuchungen oder spektroskopische Methoden zur Analyse von Proben werden angegeben. Dennoch lernen auch im Studium viele Studierende den Einsatz der Lichtenergie in der organischen Chemie bei photolytischen Reaktionen kennen (s. Abb. 61, Kategorie A).
7. Auch zu dieser Frage werden Antworten gegeben, die Versuche enthalten, welche nicht photochemisch sind. Es sind Versuche zur Chemolumineszenz bzw. Biolumineszenz, Elektrolumineszenz und auch physikalische Experimente (Kategorien C, F, H), die aus der Perspektive der Studierenden in den Fachbereich der Photochemie einzuordnen sind.

Grundsätzlich wird durch die Antworten der Lehramtsstudierenden auf die ersten beiden offenen Fragen (Abb. 60, 61) in der schriftlichen Befragung klar, dass ein Teil der Studierenden nicht genau weiß, was mit *Photochemie* gemeint ist, zumal laut Beschluss der KMK von 2008 in den *Ländergemeinsamen inhaltlichen Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung* für das Studium des Lehramts der Sek. 2 *Grundlagen der Photochemie* als Studieninhalt angegeben wird [390]. Insgesamt betrachtet würden alle von den Studierenden aufgelisteten Experimente unter eine Kategorie fallen wie *Experimente, die in irgendeiner Weise mit Licht zu tun haben*, da nicht ausschließlich photochemische Experimente von den Befragten genannt werden. Jedoch erkennen sie bestimmte Prozesse aus der Natur (Kategorie D) und der Technik (Kategorie B), die Licht benötigen und nur damit funktionieren. Fest steht unter anderem, dass offensichtlich eine Diskrepanz im Ausmaß zwischen den an der Universität erlernten photochemischen Experimenten und den in der Schule praktisch eingesetzten Schulversuchen herrscht. Dies sollte nicht weiter verwunderlich sein, da diese Diskrepanz hier zwar festgestellt wurde, jedoch keine Ausnahme, sondern üblich und übertragbar auf viele weitere Themenbereiche ist. Werden aber die Ergebnisse zu Frage c betrachtet (Abb. 62, 8 – 11), dann stellt sich die Frage, warum dennoch keine photochemischen Experimente in den Schulunterricht integriert werden.

Das Kategoriensystem für die am häufigsten gegebenen Antworten der dritten offenen Frage (s. Abb. 62) setzt sich aus folgenden acht Kategorien zusammen:

	Name der Kategorie	Beispielaussagen
L	Visualität	Optisch eindrucksvoll; visuell ansprechend; anschaulich; veranschaulichend; usw.
M	Energie	Alternative Energieform; erneuerbare Energie; Energieumwandlung; Licht als Energieform; usw.
N	Alltagsbezug	Lebensnah; alltagsrelevant; Umweltbezug; aktuelle wissenschaftliche Forschung; kontextbezogen; lebensnah; usw.
O	Motivation	Interesse weckend; steigert Aufmerksamkeit; Motivationsstärkung; usw.
P	Zukunftsrelevanz	Energieform der Zukunft; um neue Entwicklungen zu machen; relevant für die Zukunft; usw.
Q	Lehrplan	Weil es Teil des Curriculums ist; je nach Lehrplan
R	Interdisziplinarität	Herstellung von Querverbindungen zu anderen Fächern; fächerübergreifende Ansätze (Physik, Chemie, Bio); interdisziplinärer Zugang; usw.
S	Praktikabilität	Einfache Versuchsaufbauten; wenig Aufwand; nicht heiß; super ungefährliche Experimente, einfach vorzubereiten; usw.

Tab. 28: Das Kategoriensystem für die Antworten der dritten offenen Frage in der Befragung für die Lehramtsstudierenden.

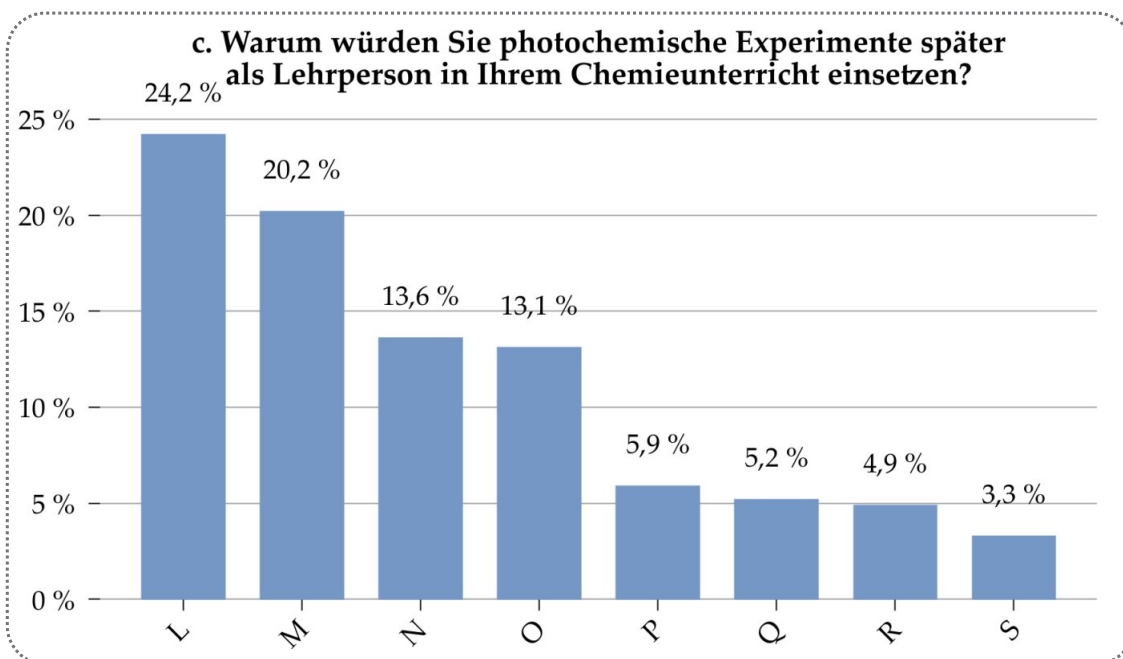


Abb. 62: Antworten der Studierenden (n = 426) auf die Frage *Warum würden Sie photochemische Experimente später als Lehrperson in Ihrem Chemieunterricht einsetzen?*, ausgewertet nach dem Kategoriensystem in Tab. 28.

8. Am wichtigsten scheint den Studierenden die visuelle Darbietung photochemischer Experimente für die sinnliche Wahrnehmung zu sein (s. Abb. 62). Fast jeder vierte Befragte legitimiert auf diese Weise die zukünftige Integration photochemischer Experimente in seinen Unterricht. Etwa ein Fünftel möchte die Lichtenergie als eine alternative

Energieform oder eine mögliche Energieform den Schülern vorstellen. Dadurch erfahren Schüler, dass neben der so oft verwendeten Wärme auch andere mindestens gleichwertige Energieformen vorhanden sind, die für den Menschen sich als nützlich erweisen.

9. Diejenigen Studierenden, die aus ihrer Perspektive die praktischen Vorteile als Argumente für den Einsatz photochemischer Experimente sehen, haben scheinbar selber die Erfahrung mit jenen Experimenten gemacht. Jedoch sind es gerade einmal 14 von 426 Studierenden, die dieser Meinung sind.
10. Eine fast gleiche Anzahl an inhaltlich ähnlichen Antworten umfassen die Kategorien *Zukunftsrelevanz*, *Lehrplan* und *Interdisziplinarität*. Im Durchschnitt argumentieren 23 Studierende damit, dass sie photochemische Experimente als zukunftsrelevant, thematisch gesehen lehrplankonform oder darin Potenziale für fächerübergreifenden Unterricht bzw. für Kooperationsmöglichkeiten zwischen den Naturwissenschaften sehen.
11. Nach der *induktiven Kategorienbildung* [380] (vgl. Kap. 3.4.2.2) fiel vor allem auf, dass die am meisten genannten Argumente der Studierenden zur Legitimation des Einsatzes photochemischer Experimente in den eigenen Unterricht tatsächlich inhaltlich mit vier der *fünf Bedeutungsaspekte* zu den *didaktischen Grundfragen* von KLAFKI kongruent sind [391]. Dabei wird nach der *exemplarischen Bedeutung*, der *Gegenwartsbedeutung*, der *Zukunftsbedeutung*, der *Sachstruktur* und der *Zugänglichkeit* des jeweiligen *Bildungsinhalts* gefragt [392].

„Klafki liefert mit diesen fünf Grundfragen Prüfinstrumente, mit denen die Lehrer das Material, das sie aus den Lehrplänen, den Schulbüchern oder aufgrund eigener Aktivitäten gewonnen haben, für die Unterrichtsplanung so einsetzen können, dass die Kinder tatsächlich den Schritt vom (vorgegebenen) Bildungsinhalt zum Bildungsgehalt vollziehen können.“ [392]

Die Grundfrage nach der *Exemplarität* photochemischer Experimente spiegelt sich in der Kategorie *Energie* wider, auf die in Auswp. 8 näher eingegangen wurde. Die Wahrnehmung der *Gegenwartsbedeutung* der Photochemie zeigt sich in den Argumenten unter Kategorie *Alltagsbezug*. Außerdem wird durch Letztere und die Kategorie *Motivation* verdeutlicht, dass aus Sicht der Studierenden für die Schüler eine positive *Zugänglichkeit* möglich sei. Die hier zur Analyse gebildete Kategorie *Zukunftsrelevanz* ist gleichbedeutend mit der *Zukunftsbedeutung* von KLAFKI. Diese Feststellung impliziert, dass photochemische Inhalte nach Zusammenführung der Studentenaussagen somit für den Einsatz im Unterricht legitimierbar wären.

Bei dem letzten Item (Abb. 63) wurde den Studierenden (sowie auch den Schülern und Lehrern (s. Kap. 5.4.4.1; Kap. 5.4.4.2; Kap. 7.2)) eine Aussage gegeben, mit welcher sie die zukünftige Bedeutung photochemischer Experimente prognostizieren sollten: *Vervollständigen Sie die Aussage: ‚Zukünftig werden im*

Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärmeenergie oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / ebenso relevant / weniger relevant.' Die Auswertung ist wie folgt ausgefallen:

d. Vervollständigen Sie die Aussage: "Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärme oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / ebenso relevant / weniger relevant."

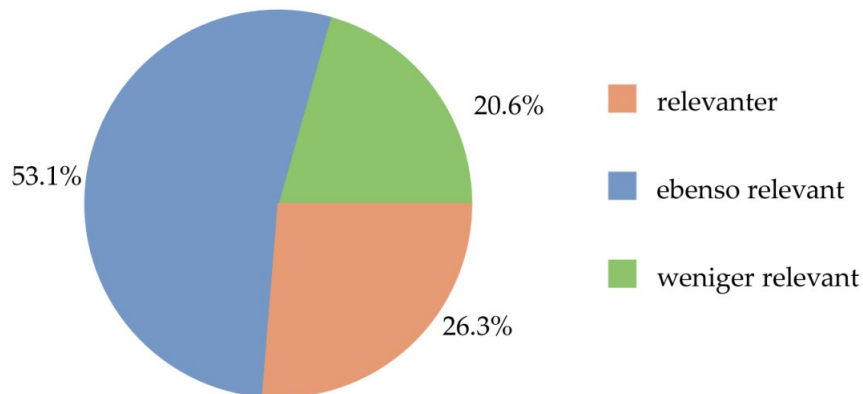


Abb. 63: Vervollständigung der Aussage *Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärme oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / ebenso relevant / weniger relevant.* durch die Studierenden (n = 407).

12. Die Argumente der Studierenden, die sich entweder für *ebenso relevant* oder *relevanter* entschieden haben, sind nahezu kongruent. Nur um einige der Begründungen der Studierenden hier zu zeigen:

relevanter	ebenso relevant
<ul style="list-style-type: none"> • Nachhaltige Energieressource • In Zeiten der erneuerbaren Energien wird die Lichtenergie immer bedeutender. Daher werden auch photochemische Experimente relevanter. • Guter Alltagsbezug • In der Forschung werden photochemische Experimente relevanter (z. B. Photoschalter). Da der Chemieunterricht die Forschung reflektiert, wird langfristig gesehen das Thema der Photochemie auch im Unterricht bedeutsamer. • ... ist meiner Meinung nach näher an der Alltagswelt der SuS¹²⁷ → es ist wahrscheinlicher, dass später einmal Solarzellen als Energiequelle für den eigenen Haushalt in Frage kommen als z. B. ein extra Wärmekraftwerk. 	<ul style="list-style-type: none"> • ... weil die Nutzung der Lichtenergie immer aktueller wird. • Lichtenergie wird vielleicht sogar relevanter sein als Wärmeenergie oder elektrische Energie, da Lichtenergie wichtig als erneuerbare Energiequelle ist. Ohne Licht wäre das Leben auf der Erde gar nicht erst möglich und Lichtenergie wird im Lauf der nächsten Jahre an Bedeutung zunehmen. • ... da das Thema <i>Lichtenergie</i> immer wichtiger wird, und sollte schon aus den Schulzeiten bekannt und verständlich sein. • Hohe Alltagsrelevanz (Solarzellen) • ... weil Licht häufig als Energieform in der Schule im Chemieunterricht etwas vernachlässigt wurde, aber es für SuS wichtig ist, auch andere Energieformen zu kennen.

Tab. 29: Begründungen der Studierenden, die die Lichtenergie in Zukunft im Chemieunterricht als *ebenso relevant* oder *relevanter* einstufen.

¹²⁷ SuS: Schülerinnen und Schüler.

Im Vergleich zu den Aussagen in Tabelle 29 haben die Argumente der Studierenden, die die Lichtenergie in Zukunft im Chemieunterricht im Unterschied zu den anderen Energieformen als relevanter ansehen, einen stärkeren dynamischen Charakter. Sie argumentieren, indem sie die Innovationen in F&E und neuen Technologien sich vor Augen führen und den Chemieunterricht als eine Projektionsfläche dieser fortschrittlichen Entwicklungen sehen, um die Forscher von morgen frühzeitig schon in der Schule auf die Teilhabe vorzubereiten. Im Gegensatz zu den Aussagen in Tabelle 30 sind die der Studierenden, welche meinen, dass in Zukunft die Lichtenergie weniger relevant sein wird, konkreter formuliert. Dadurch ist zu erkennen, dass diese Studierenden deutlich mehr spekulieren und aus ihren Aussagen teilweise Fehlvorstellungen bzw. scheinbare Voreingenommenheiten sich herauskristallisieren:

	Name der Kategorie	Beispielaussagen
T	Hohe Komplexität des Themas	<ul style="list-style-type: none"> • Komplexität des Versuchsaufbaus • Erklärung für SuS oft zu komplex • Licht wird meistens nur als Katalysator oder im Kontext „Farbstoffe & Farbigkeit“ angesprochen. Letzteres Inhaltsfeld ist für einige SuS bereits sehr abstrakt, weshalb ich mir nicht vorstellen kann, lichtenergiegetriebene Experimente vermehrt zu verwenden. • Zu komplex
U	Nicht lehrplankonform	<ul style="list-style-type: none"> • Randthema • Solche Experimente sind im Verhältnis zu anderen im Lehrplan weniger vorgeschrieben. • Wärmeenergie oder elektr. Energie sind besser in den Lehrplan integriert. • Licht nicht im Lehrplan verankert.
W	Kein Bedarf	<ul style="list-style-type: none"> • Die meisten Reaktionen werden durch Wärmeenergie gestartet. • Exotherm / endotherm ist am wichtigsten zu verstehen. • Es gibt viele Experimente, die wichtig für den CU¹²⁸ sind. • ... da der Großteil aller Reaktionen im schulischen Bereich durch thermische / elektrische Energie aktiviert wird.
X	Unwissenheit der Lehrer / Studierenden	<ul style="list-style-type: none"> • Mir fallen spontan deutlich mehr Experimente, die mit Wärmeenergie durchgeführt werden, ein. • ... weil ich kaum welche kenne! • Viele Lehrer haben kein Wissen darüber, bilden sich nicht fort etc. • ... weil man im Studium nur wenig dazu lernt. • Ich kenne mehr Experimente mit elektrischer Energie als mit Lichtenergie.
Y	Fehlender Alltagsbezug	<ul style="list-style-type: none"> • Kein Alltagsbezug • Nicht so lebensnah für die SuS • Wärmeenergie und elektrische Energie sind für Schüler relevanter im Lebensalltag • Weil diese Reaktionen (mit Licht) in der Umwelt weniger vorkommen.

¹²⁸ CU: Chemieunterricht.

	Name der Kategorie	Beispielaussagen
Z	Praktische Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • ... weil z.B. mit Wärmeenergie in der Schule einfacher Experimente durchgeführt werden können. • ... weil viele klassische Experimente einfacher mit elektrischer und Wärmeenergie durchgeführt sind • Gefährliche Chemikalien • "Klassische" Experimente lassen sich einfacher durchführen. • Teurer in der Anwendung • Aufwendiger als mit Wärmeenergie durchgeführte Experimente

Tab. 30: Das Kategoriensystem für die Begründungen in dem 4. Item in der Befragung für die Lehramtsstudierenden.

13. Die Begründungen der Studierenden wurden nach dem Kategoriensystem in Tabelle 29 codiert und graphisch aufgetragen (s. Abb. 64). Der Lehrplan als Steuerungsinstrument scheint diesen Studierenden besonders entscheidend zu sein im Hinblick auf den fachlichen und praktischen Inhalt ihres Unterrichts: Die meisten der Befragten, die der Ansicht sind, dass photochemische Experimente *auch* (vgl. Kap. 3.4.2.2) in Zukunft keine hohe Relevanz erreichen werden, begründen ihre Ansicht damit, dass diese Inhalte nicht lehrplankonform seien (Tab. 30, Kategorie U). Im Kontrast dazu nutzen mindestens genauso viele Probanden die Lehrpläne als Argumente für den Einsatz photochemischer Experimente später als Lehrperson in ihren eigenen Chemieunterricht (s. Abb. 62). Erstere könnten ihre Meinung möglicherweise sogar konkreter damit begründen, dass nicht explizit in den Kernlehrplänen Vorschläge für photochemische Experimente gemacht werden und dieses Themenfeld nicht obligatorisch vorgegeben wird. Jedoch ist der Einsatz, wie bereits aufgezeigt wurde, dennoch über die Kernlehrpläne zumindest theoretisch legitimierbar (s. Kap. 3.2.4).

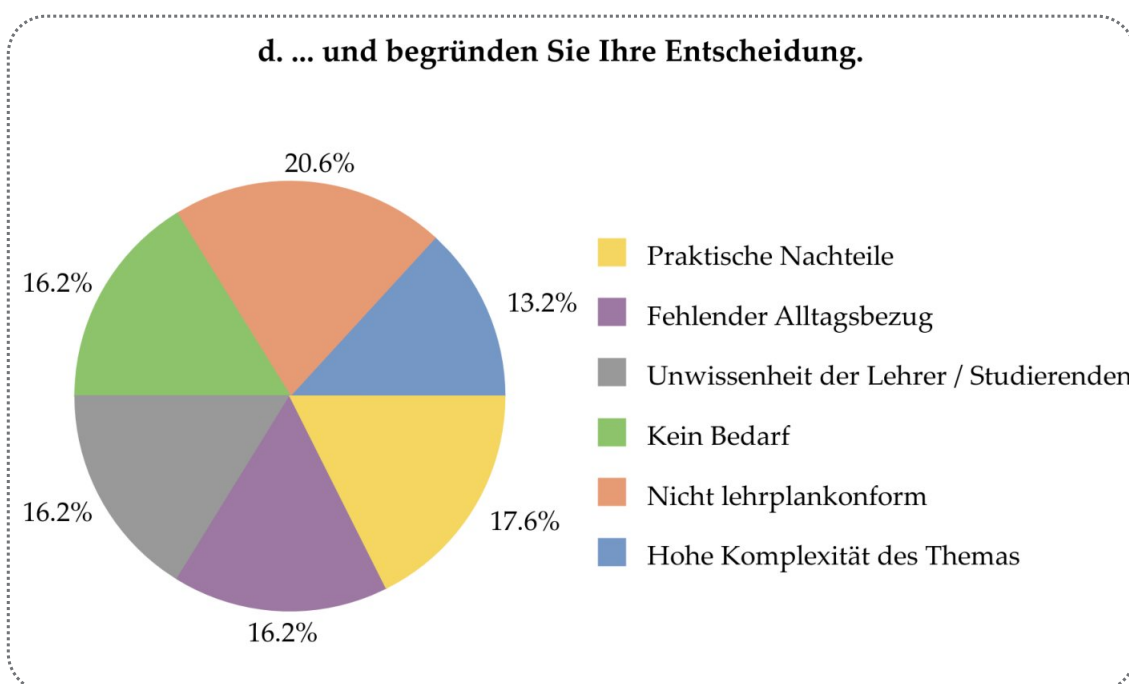


Abb. 64: Begründungen der Entscheidung der Studierenden (n = 68) im 4. Item (s. Abb. 63).

3.4.2.4 Befragung von Lehrerfortbildungszentren

Die Umfrage wurde an jeweils eine Organisation für Chemielehrerfortbildungen des entsprechenden Bundeslandes gesendet (n = 16). Zudem wurden die neun offiziellen GDCh-Fortbildungszentren (n = 9) und die Landesverbände vom VCI angefragt, welche auch eine große Auswahl an Fortbildungen für Lehrer anbieten (n = 7). Im Folgenden befinden sich in Tabelle 31 die Fragen bzw. Aufgaben an die deutschlandweit 32 Ansprechpartner der Lehrerfortbildungen und ihre Antworten darauf. Da insgesamt die Anzahl des Rücklaufs von sechs Personen ausreichend übersichtlich war, wurde zur Auswertung durch eine Codierung kein gesondertes Kategoriensystem erstellt. Folgende Punkte wurden als Ergebnisse der Auswertung ausgewählter Daten aus den Rückmeldungen festgehalten:¹²⁹

1. Bei Betrachtung des Angebots ab 2010 fällt auf, dass die Themen vielseitiger werden. Dadurch wird die Bedeutung der Photochemie innerhalb der unterschiedlichen Themenbereiche für den Schulunterricht verdeutlicht, und damit einhergehend zeigt sich die Vielzahl an Möglichkeiten der Integration von photochemischen Inhalten in unterschiedliche für den Chemieunterricht obligatorische Themenfelder. Die Rückmeldung von dem jeweiligen Ansprechpartner für die von den Bundesländern Thüringen und Hamburg organisierten Lehrerfortbildungen für naturwissenschaftliche Fächer beinhalten anscheinend Themen von Lehrerfortbildungen für den Biologieunterricht (s. Tab. 31, graue Felder).
2. Insgesamt wurden seit 1992 ca. 21 Lehrerfortbildungen¹³⁰ angeboten, die laut der Befragten photochemische Inhalte umfassten. Dies kann durch eine einfache Sichtung der Themen (s. Tab. 30) mit Ausnahme von zwei Angaben (*Eigenbau OLED – Hightech zu low cost; OLED & OPV – ein starkes Duo*) bestätigt werden. Auffällig ist, dass ab 2011 die Anzahl der Fortbildungen deutlich zunimmt. Allein 17 der explizit angegebenen Fortbildungen zum Themenbereich *Photochemie* fanden nach 2010 statt. Außerdem waren zum Zeitpunkt der Befragung weitere Fortbildungen in Planung (s. Tab. 31, 3. Item).
3. Die Gründe für das Angebot an photochemischen Inhalten, die von den Befragten genannt werden, stimmen größtenteils mit den kategorisierten Argumenten der Lehramtsstudierenden für den Einsatz photochemischer Experimente im Chemieunterricht überein (s. Kap. 3.4.2.3, s. Abb. 62).
4. Keiner der Organisatoren gibt an, dass Lehrer explizit ihr Interesse an photochemischen Inhalten äußern.

¹²⁹ Aufgrund der Tatsache, dass eine geringe Anzahl an Rückmeldungen eingeholt werden konnte, wird davon ausgegangen, dass auch an anderen Orten zwar photochemische Inhalte thematisiert wurden, die aber hier nicht aufgeführt werden können.

¹³⁰ Die Fortbildungen aus dem Bereich der Ökologie, die in Thüringen und Hamburg angeboten wurden, werden nicht berücksichtigt, da explizit nach Fortbildungen für den Chemieunterricht gefragt wurde.

1. Bitte nennen Sie uns diejenigen Fortbildungen mit **photochemischem Inhalt**, die Sie **seit Gründungsbeginn angeboten haben**. Fügen Sie bitte Jahr, Thema und Teilnehmerzahl hinzu. (Gerne können Sie uns auch eine Übersicht senden, die wir selbst durchsehen.)

Jahr	Name
Jährlich	Fortbildungen zu Photosynthese eingebettet in verschiedene Themen: Ökologie und Experimente zur Physiologie.
1992	Fachliche und didaktische Fragen zu „Stoff- und Energiekreislauf“ im Leistungskurs Biologie: biochemische Prozesse bei Photosynthese, heterotropher Assimilation, Chemosynthese, Zellatmung und Gärung
2005	Photochemie
2006	Photosynthese und Photovoltaik - Ein Beitrag zur Lösung globaler Energieprobleme
ab 2010	Ökosysteme im Flaschengarten: d. h. es werden entweder Pflanzen der Tropen oder Sukkulenten ausgegeben und dann das Wachstum im Verlaufe von 1 – 2 Jahren mit Schulklassen verfolgt. Seit 2017 kann mit digitaler Messtechnik der Verlauf der CO ₂ - und O ₂ -Produktion gemessen werden.
ab 2007	Wasserpest wird für Versuche zur Photosynthese kostenfrei an Hamburger Schulen abgegeben, ebenso Litops für morphologische Untersuchungen rund um die Fotosynthese.
2011	Natürliche und künstliche Photosynthese – Eine Lösung für globale Energieprobleme?
2011	Künstliche Photosynthese mit organischen Photovoltaikzellen
2011	Neue Lehrpläne im Fach Biologie – Bedeutung, Umfang und fachliche Tiefe der Unterrichtseinheit „Stoffwechsel und Energieumwandlungen der grünen Pflanzen
2011	Bau einer Farbstoffphotozelle – Fortbildungskurs zu einem Schülerpraktikum
2012	Natürliche und künstliche Photosynthese – Eine Lösung für globale Energieprobleme?
2012	Lumineszenzphänomene - zeitnah visualisiert (Vortrag)
2012	Bau einer Farbstoffphotozelle
2013	Magische Stifte - Die Chemie der Zaubermarker
2013	Vom Chlorophyll-Abbau und dem blauen Leuchten von Bananen
2013	Eigenbau OLED – Hightech zu low cost
2014	Biosynthese möglicher Pflanzenabwehrverbindungen und deren ökologische Relevanz
2014	Brennstoffzelle, Grätzelzelle und mehr
2015	OLED & OPV – ein starkes Duo
2016	Photochemische Experimente im Chemieunterricht - Schülerexperimentierset Photo-Mol
2016	Photochemische Experimente im Chemieunterricht - Schülerexperimentierset Photo-Mol
2016	Beeinflussung des Stoff- und Energiewechsels grüner Pflanzen; Bedeutung der Kenntnis für Gartenbau und Landwirtschaft
2016	Photo-Mol – Photonen und Moleküle
2017	Biochemische Grundlagen des Kohlenstoff- und des Stickstoffkreislaufs – Empfehlungen für den Biologieunterricht in Sek I und Sek II
2017	Biochemie Herbivorie induzierter Duftstoffe in Pappeln
2017	Photochemische Experimente im Chemieunterricht - Schülerexperimentierset Photo-Mol
2017	Licht, Farbe, Photosynthese
2017	Naturstoffe und Solarenergie – Fächerübergreifende Themen für den naturwissenschaftlichen Unterricht

<p>2. Für den Fall, dass Sie zu den Veranstaltungen ein Lehrerfeedback eingeholt haben, freuen wir uns, wenn Sie uns Ihre Auswertungen zur Verfügung stellen. Uns kommt es insbesondere darauf an, aus welcher Motivationslage heraus die Lehrkräfte an der Fortbildung teilgenommen haben und welches inhaltliche Interesse vorlag.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schulische Integrierbarkeit der Inhalte • Erwerb neuer fachlicher Erkenntnisse • Kennenlernen schulrelevanter Experimente • Auffrischen experimenteller Kenntnisse • Anwendbarkeit der Experimente für Oberschulen • Aktualität des Themas • Wenn die Fortbildung ein Thema aus dem Lehrplan betrifft, ist auch das Interesse der Lehrer/innen gegeben.
<p>3. Welche photochemisch orientierten Fortbildungen haben Sie für die Zukunft bereits eingeplant?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimentelle Photochemie (2019) • Photogalvanische Zellen (2018) • Licht, Farbe, Photosynthese (2019)
<p>4. Welche Gründe gibt es, diese Inhalte anzubieten?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Photochemische Experimente sind für Schülerinnen und Schüler sehr motivierend und anschaulich. • Versuche in allen weiterführenden Schulen einsetzbar • Fächerverbindung mit der Biologie • Aktualität des Themas • Bezug zum Lehrplan (Energie bei chemischen Reaktionen; Chemische Reaktionen – energetisch betrachtet) • Wir denken, dass dies ein interessantes Thema ist [...].
<p>5. Wird von Lehrern der Wunsch geäußert, Themen aus dem Bereich der Photochemie innerhalb der Fortbildungen aufzugreifen? Wenn ja, welche?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bis jetzt haben wir keine solche Wünsche erhalten. • – • nein

Tab. 31: Antworten der Ansprechpartner für das Fach Chemie von Lehrerfortbildungszentren.

3.4.2.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Photochemie ist noch kein in der chemieunterrichtlichen Landschaft etablierter fachwissenschaftlicher Bereich. Sowohl durch die Aussagen der Lehramtsstudierenden (s. Kap. 3.4.2.3) als auch die der Lehrpersonen (s. Kap. 3.4.2.2) wird dies deutlich; zumal teilweise die Probanden davon ausgehen, zu wissen, was Photochemie bedeutet, jedoch eindeutige Fehlvorstellungen haben, die widerlegt werden können (s. Kap. 3.4.2.2): Es gibt bereits viele photochemische Schulversuche, die keinen „Abzug“ benötigen (3, (b)). Und dass nicht alle diese Experimente so kostspielig sind, kann auch bestätigt werden (3, (b)). Außerdem gibt es sehr viele Beispiele für photochemische Experimente, die eindeutige Ergebnisse zeigen (3, (a)), sodass für die Lehrer bei der

Auswertung nicht zusätzlicher spontaner Erklärbedarf durch unerwartete Beobachtungen entstehen würde.

Sowohl durch die Interviews mit den Lehrpersonen als auch die Hospitationen im Chemieunterricht (s. Kap. 3.4.2.1) zeigt sich, dass letztendlich die Lehrperson basierend auf bestimmten Argumenten (s. Kap. 3.4.2.2, 1) über die Schülerversuche in ihrem Unterricht entscheidet. Im KLP des Faches Chemie für die gymnasiale Oberstufe wird dies wie folgt formuliert:

„Die curricularen Vorgaben konzentrieren sich auf die fachlichen ‚Kerne‘, ohne die didaktisch-methodische Gestaltung der Lernprozesse regeln zu wollen. Die Umsetzung des Kernlehrplans liegt somit in der Gestaltungsfreiheit – und der Gestaltungspflicht – der Fachkonferenzen sowie der pädagogischen Verantwortung der Lehrerinnen und Lehrer. Schulinterne Lehrpläne konkretisieren die Kernlehrplanvorgaben und berücksichtigen dabei die konkreten Lernbedingungen in der Schule.“ [20]

Ein Indiz für die mögliche zunehmende Bedeutung der Photochemie für den Chemieunterricht könnte das steigende Angebot an Lehrerfortbildungen dazu sein, wenn auch lediglich von sechs Fortbildungszentren auswertbare Rückmeldungen erhalten wurden (3.4.2.4). Außerdem wird sowohl mit der Charakterisierung von photochemischen Experimenten durch die Lehramtsstudierenden (s. Kap. 3.4.2.3, Abb. 62) als auch durch die Lehrer (s. Kap. 3.4.2.5, 4.), welche den Sinn dieser Innovation bestätigen, ein offener Weg Richtung Integration photochemischer Experimente in den Chemieunterricht aufgezeigt.

3.5 Fazit

Für die explorative Vorgehensweise der bisherigen Untersuchungen wurde vom eigenen Kenntnisstand des Autors¹³¹ ausgegangen. Dabei war die Erkenntnis aus dieser Exploration, dass die Photochemie sowohl in der Theorie, was die BSs und Lehrpläne angeht (s. Kap. 3.2.4), als auch in der Praxis (s. Kap. 3.4.2.3, Tab. 23; s. Kap. 3.4.2.4, Tab. 28, 1. Item) weder nur eine unbedeutende Nebenerscheinung im Bereich der Farbstoffchemie bzw. im Inhaltsfeld *Organische Produkte – Werkstoffe und Farbstoffe* [20] ist, noch ein Thema sein müsste, das unabhängig von den anderen Inhaltsfeldern als ein weiteres separates Inhaltsfeld in die KLPe aufgenommen werden müsste. Photochemische Inhalte bzw. Experimente könnten in bereits vorhandene Inhaltsfelder der KLPe theoretisch eingebettet werden (s. Kap. 3.2.4) und müssen nicht ein als ein komplett neues Inhaltsfeld in den KLPen zu finden sein, zumal „für innovative Inhalte, die nicht als Pflichtinhalte vorgesehen sind, [...] wenig Spielraum“ [26]

¹³¹ Der Autor ist eine Lehrperson, die den Fachbereich Photochemie explizit weder aus der eigenen Schulzeit noch aus dem Studium kennt. Da Licht erfahrungsgemäß mit der Farbigkeit in Verbindung gebracht wurde, wählte der Autor beispielsweise zur Hospitation in der Schule Unterrichtsstunden zum Themenbereich Farbstoffchemie in der Oberstufe aus.

bleibt, so auch die Meinung der Lehrpersonen (s. Kap. 3.4.2.2, 1, (a)). Hier muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass an verschiedenen Stellen in den Voruntersuchungen die Thematisierung von Licht als eine Energieform auch in den benachbarten naturwissenschaftlichen Fächern der Fall ist. WAGNER und FLINT bezeichnen das *Energiekonzept* nicht umsonst „als interdisziplinäre[n] Knotenpunkt zwischen den Naturwissenschaften“ [157]. Eine Idee wäre, die Perspektiven auf das Thema *Licht* aus verschiedenen naturwissenschaftlichen Fächern so zu koppeln, dass eventuell mehr Zeit für die praktische Umsetzung von photochemischen Experimenten zur Verfügung steht (s. Kap. 3.2.4; Kap. 7.5).

Zur tatsächlichen Implementation (s. Kap. 2.1.2) gehören jedoch neben den bereits entwickelten photochemischen Experimenten auch Handreichungen zur Orientierung für die Lehrer (vgl. Kap. 3.4.2.2, 1. Auswp., (c)) und auch Arbeitsmaterialien, da mithilfe der Schulbuchanalyse sehr gut deutlich wurde, dass in dem für den Unterricht traditionellsten Lehrmittel, dem Schulbuch, die Kapazitäten für photochemische Inhalte im Vergleich dieser untereinander noch kaum ausgeschöpft sind (s. Kap. 3.3.3). Durch die Voruntersuchungen wird signalisiert, dass einem größeren Anteil des sinnvollen Einsatzes photochemischer Inhalte im Chemieunterricht eine Chance gegeben werden sollte, nicht zuletzt aus den Gründen, die die Lehramtsstudierenden formulieren (s. Kap. 3.4.2.3). Ein bedeutender Effekt wäre der Beitrag der Photochemie zur Verbesserung des Images des Faches Chemie unter der Schülerschaft [380].

„An ausgewählten Beispielen [...] sollte [außerdem] ein Blick in die aktuellen Entwicklungen [für den Chemieunterricht] gewagt werden, insbesondere dort, wo anhand dieser Beispiele technische Innovationen, ökologische Zusammenhänge oder neue theoretische Erkenntnisse vermittelt werden können.“ [26]

4 Entwicklung von Arbeitsblättern

„Unterricht in der Schule wird nicht dadurch besser, dass Wissenschaftler an Hochschulen sich aus vornehmer Zurückhaltung nicht trauen, beherzt Anregungen zu unterbreiten, und zwar auch dann, wenn diese nicht auf Wirkungsbeweisen beruhen. Lehrerinnen und Lehrer sind auf Unterstützung angewiesen, um ihre vielfältigen Aufgaben zu erfüllen. Niemand kann zu allen Inhalten, die unterrichtet werden müssen, immer eigene Entwicklungsarbeit leisten. [...] Wenn die auf Unterricht und Schule bezogenen Hochschulfächer nichts anbieten, was Lehrerinnen und Lehrer für brauchbar, verwertbar und hilfreich halten, dann verlieren diese Fächer die wichtigsten Bündnispartner für den Zugang zu ihrem zentralen Forschungsfeld.“ [393]

— J. KAHLERT

Da es bei der Hauptuntersuchung in erster Linie darum ging, Feedback der Schüler und Lehrpersonen direkt nach dem unmittelbaren praktischen Kontakt mit photochemischen Inhalten einzuholen, wurden in diesem nächsten Schritt als Mittel für den beschriebenen Zweck Arbeitsmaterialien entwickelt (s. Kap. 4.1.3). Aus den folgenden praktischen Gründen bzw. Vorteilen im Hinblick auf die Feldstudie (s. Kap. 5) fiel dabei die Entscheidung bei der Auswahl der Arbeitsmaterialien auf selbstentwickelte Arbeitsblätter, welche die zuvor durch die Wuppertaler Chemiedidaktik der AG TAUSCH konzipierten photochemischen Experimente, Modellanimationen und Lehrfilme beinhalten. Folgende Überlegungen wurden dabei berücksichtigt:

- Das gewählte Medium zum Übertragen bzw. Integrieren von photochemischen Inhalten in den Chemieunterricht sollte ein sowohl der Schülerschaft als auch den Lehrpersonen geläufiges Arbeitsmaterial sein. Anderenfalls wäre vor der Studie eine ausreichende Einführung in die Benutzung des ihnen nicht bekannten Arbeitsmaterials notwendig gewesen.
- Für den Inhalt der Arbeitsblätter konnten bei der Auswahl der darin zu integrierenden Experimente unmittelbar das aktuelle Interesse der befragten Gruppen und der dadurch implizierte schulische Bedarf berücksichtigt werden.
- Der Inhalt der Arbeitsblätter konnte nach den gegenwärtig für den schulischen Gebrauch notwendigen Kriterien (s. Kap. 4.1.1; Kap. 4.1.2) und den Ergebnissen der Voruntersuchungen (s. z. B. Kap. 3.4.2.2, 3 – 5; Kap. 3.4.2.3, 8 – 11) konzeptualisiert werden.

Ein fertig durchstrukturierter Unterrichtsentwurf oder auch ein Unterrichtskonzept zu einem Thema als Mittel für die Feldstudien der Hauptuntersuchung zur Integration photochemischer Inhalte in den Unterricht wurde abgelehnt und stattdessen wurden mehrere Arbeitsblätter zu unterschiedlichen Thematiken genutzt. Die Gründe dafür waren folgende:

- Es ging bei der Feldstudie nicht in erster Linie darum, ein **Unterrichtskonzept** bzw. die entwickelten Arbeitsmaterialien (s. Kap. 4.1.3; s. Kap. 9.4) zu testen (vgl. Kap. 1.1). Dies wäre ein zu beachtendes Desiderat (s. Kap. 7.5), welches mithilfe der Ergebnisse der vorliegenden explorativen Arbeit erfüllt werden könnte, um anhand dieser beispielsweise für die Zukunft konkrete Unterrichtsentwürfe und Vorgehensweisen zu entwickeln und zu evaluieren. Im Unterschied dazu wurde hier zunächst das Einholen der Meinung (konstruktive Kritik, Wünsche, Bedürfnisse, hilfreiche Bestätigungen etc.) sowohl der Lehrenden als auch der Lernenden bevorzugt. Mit anderen Worten sollte der "Puls" der Lehrer und Schüler unmittelbar nach der Konfrontation mit photochemischen Experimenten aufgenommen werden (s. Kap. 5.4.1).
- Die **Hauptbedingung der Teilnahme an der Feldstudie** war der Einsatz ausgewählter photochemischer Experimente und die Nutzung der dafür vorgesehenen Auswertungsaufgaben, sodass diese beiden Aspekte im Mittelpunkt der Feldstudie standen. D.h.: Die Lehrer, die an der Feldstudie teilnehmen wollten, mussten sich zu diesen beiden Aktivitäten bereit erklären. Allerdings sollten sie abhängig von der Kursstärke sowie den vorhandenen Kompetenzen ihrer Schüler, über die Unterrichtsmethoden und den -entwurf selbst entscheiden (s. Kap. 5.4.3). Für die vom Autor selbst durchgeführten Einzelstudien wurde ein flexibel handhabbarer Unterrichtsablauf entwickelt (s. Kap. 5.4.3.1).
- Ein **Unterrichtsentwurf** wäre im Vergleich zu einem Arbeitsblatt ein abgeschlossenes und in sich stimmiges Konzept, sodass es für die Lehrpersonen eine gewisse Hürde bedeuten würde, diesen bei der praktischen Umsetzung an die eigene Lerngruppe anzupassen, weil die einzelnen voneinander abhängigen Phasen und Schritte schülerorientiert überdacht und nicht so einfach separabel wären. Für das explorative Ziel der Untersuchung hätte dies sicherlich auch gewinnbringend sein können, jedoch wäre der organisatorische Rahmen dadurch gesprengt worden. Der Lehrer sollte selber über seine Unterrichtsmethoden und Konzepte entscheiden, da hier diese bei der Untersuchung nicht zur Debatte standen; sondern lediglich der Einsatz photochemischer Experimente und die Integration der Photochemie allgemein in den Chemieunterricht. Außerdem sollte der Lehrer die photochemischen Experimente unabhängig von jeglichen konzeptionellen Vorgaben viel flexibler in seinen eigenen Unterricht integrieren und nach Bedarf seiner Lerngruppe das Ausmaß der Binnendifferenzierung dabei bestimmen können. Dadurch sollte gleichzeitig *schülerorientiertes* Unterrichten im Sinne von EINSIEDLER [394] (vgl. auch HELMKE [395]) gefördert werden.
- Außerdem wurde nicht darauf abgezielt, den Lehrpersonen als Produkt am Ende der nutzenorientierten Grundlagenforschung einen abgeschlossenen Unterrichtsentwurf nur zu einem bestimmten Thema für eine entsprechende Jahrgangsstufe zu liefern. Durch die Entscheidung gegen diese Art von

Eingrenzung wurde erwartet, ein viel allgemeineres Feedback zu photochemischen Inhalten seitens der Schüler einzuholen, indem die Daten aus den einzelnen Feldstudien in unterschiedlichen Jahrgängen und zu unterschiedlichen Themen (s. Kap. 4.3) metaanalytisch zusammengeführt werden sollten (s. Kap. 5.4.4.1). Aus einer weiteren Sichtweise ist folgendes anzumerken: Die Photochemie ist so vielfältig (s. Kap. 2.3.3.3), dass bei solch einer Einschränkung auf ein Thema ein stark monoperspektivisches Feedback eingeholt worden wäre, da nur in einem bestimmten Jahrgang zu einem vorgegebenen photochemischen Experiment die Feldstudie stattgefunden hätte. Durch die Wahl von mehreren Themen und die Berücksichtigung verschiedener photochemischer Experimente konnte das Feedback viel allgemeiner gehalten werden.

Basierend auf den Voruntersuchungen (vgl. Kap. 4.1.1) und didaktisch-methodischen Erkenntnissen (s. Kap. 4.1.2) wurden zuerst Arbeitsblätter entwickelt, die begründet in den Lehrplänen verortet wurden (s. Kap. 4.1.3). Später wurden dann noch zusätzliche Materialien konkret für die Experimente, aber auch als Handreichungen für die Lehrpersonen entwickelt (s. Kap. 9.5). All diese Materialien dienten als Mittel zum Zweck: Das Hauptaugenmerk lag auf der Integration der photochemischen Experimente bzw. auf dem Kontakt der Schüler und Lehrer mit photochemischen Inhalten, um ein aussagekräftiges Meinungsbild dazu einzuholen (vgl. Kap. 2.1.4.1; Kap. 7.3).

4.1 Konzeptualisierung

Es wurden zur Erstellung der Arbeitsblätter im Hinblick auf die Wahl der Experimente, die Aufgabentypen, Darstellungsebenen und die Gestaltung der Arbeitsblätter Kriterien aufgestellt. Diese orientierten sich sowohl an den Voruntersuchungsergebnissen als auch an den didaktischen Materialien aus der Wuppertaler curricularen Innovationsforschung und den allgemeingültigen didaktischen und methodischen Erkenntnissen aus den Bildungswissenschaften (s. Kap. 4.1.2). Im Folgenden werden zuerst die vier ursprünglichen grundlegenden Charakteristika der entwickelten Sammlung an Arbeitsblättern (s. Kap. 4.1.3.1; Kap. 4.1.3.2) kurz erläutert.

4.1.1 PHOTO-LIKE

Die Abkürzung *PHOTO-LIKE* steht für *lehrplankonforme, interdisziplinäre, kohärente und experimentbasierte Arbeitsmaterialien für den Chemieunterricht zur Photochemie*. Im Folgenden wird auf die vier Aspekte einzeln eingegangen (Abb. 65):

Lehrplankonform: Ein allgemeingültiges Kriterium für die Planung und Umsetzung von Schülerexperimenten bzw. Unterricht ist die Kenntnis der

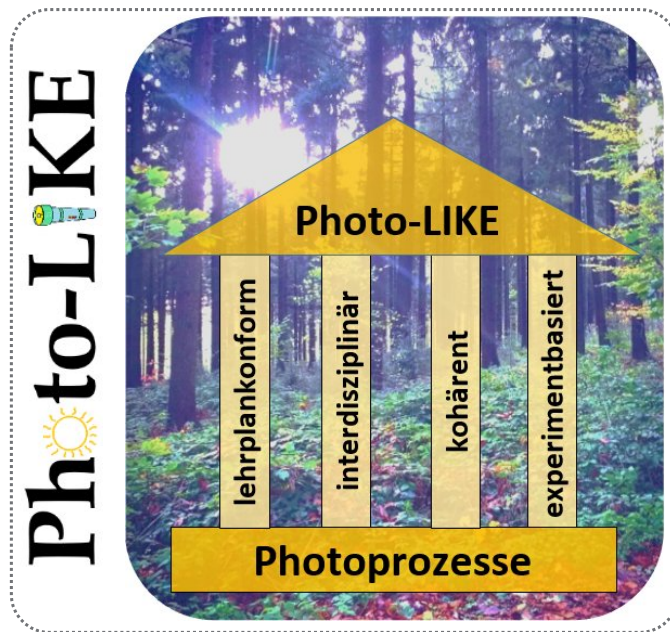


Abb. 65: PHOTO-LIKE.

Lehrenden über den Lehrplaninhalt [396]. Lehrer sind dazu angehalten, sich bei der inhaltlichen Gestaltung des Unterrichts an den obligatorischen Vorgaben zu orientieren (vgl. Kap. 3.2.3). So waren diese auch hier bei der Wahl der zu fördernden Kompetenzen bzw. Aufgaben und ihrer Formulierung ein Anhaltspunkt.

Interdisziplinär: Anhand der Äußerungen der Lehrpersonen (s. Kap. 3.4.2.2, 2) und nicht zuletzt auch durch das gemeinsame Basiskonzept *Energie* der drei naturwissenschaftlichen Kernfächer¹³² wird das interdisziplinäre Potenzial der Photochemie deutlich. Auch im Hinblick auf die erstellten Arbeitsblätter ist darauf hinzuweisen, dass in allen Aufgaben Fachwissen aus den benachbarten Fächern Physik und Biologie nützlich ist und eingesetzt werden kann bzw. muss. So basieren die Arbeitsblätter zum Hauptthema *Energiekonversion und -speicherung* (s. Kap. 4.1.3.2) kontextuell auf dem natürlichen Kohlenstoffkreislauf Photosynthese / Atmung, welcher als Thema für das Fach Biologie obligatorisch ist. Dahingegen kann bei den Arbeitsblättern zum Hauptthema *Farbigkeit und Lichtenergie* (s. Kap. 4.1.3.1) sehr wohl auch physikalisches Fachwissen eingesetzt werden.

Kohärent: Durch die Arbeitsblätter wird aufgezeigt, dass die gewählten photochemischen Experimente in den beiden Sekundarstufen eingesetzt werden können.

Experimente, die die Schüler in der Sekundarstufe 1 hauptsächlich *phänomenologisch* auswerten konnten, konnten sie in der Oberstufe nun auch fachwissenschaftlich vertiefter und fortgeschrittener auf der *submikroskopischen Ebene* betrachten (s. Kap. 3.2.4, A. 3). So gewährleisteten diese photochemischen Experimente stufenübergreifende Kohärenz. Der Vorteil des Wiedererkennungscharakters der Experimente in der Oberstufe könnte den Zugang zur Fachsystematik erleichtern.

¹³² Damit sind die Fächer Biologie, Chemie und Physik gemeint.

Experimentbasiert: Die Chemie hat sich als eine *experimentelle Naturwissenschaft* entwickelt [397]. Das Fach „ist – methodisch betrachtet – zunächst einmal ein Experimentalunterricht“ [398]. So ist das Experiment das wohl wichtigste Kennzeichen des Chemieunterrichts [387, 399]. PFEIFER bestätigt dies wie folgt:

„Moderner Chemieunterricht ist zugleich zeitgemäßer Experimentalunterricht. Er vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt der faszinierenden Welt chemischer Phänomene. Sie findet ihren Niederschlag im Ideenreichtum und Prägnanz [sic!] chemischer Experimentierkunst, die sich nicht im Reagenzglas erschöpft!“ [61]

Dass dabei die empirische Erkenntnisgewinnung eine der wichtigsten Funktionen des Experiments in der Chemie ist [397], schlägt sich auch in den nationalen Bildungsstandards nieder, da „sich sechs der acht Standards im Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung auf das Experimentieren beziehen“ [387]. Nach HÖTTECKE sichert

„das Experimentieren nicht nur die empirische Basis der Naturwissenschaften mit [...], sondern [trägt] vielmehr zum Selbstverständnis der naturwissenschaftlichen Disziplinen selbst bei [...]. Insofern erfüllt das Experiment im Unterricht [auch] eine Sozialisationsfunktion.“ [400]

Mit jener Legitimation war bei der Erstellung der Arbeitsblätter die wichtigste Voraussetzung, dass diese auf einem experimentellen Fundament entstehen. In erster Linie konnte somit über den praktischen Einsatz photochemischer Experimente ein Feedback zur Photochemie im Chemieunterricht eingeholt werden. Das bedeutet, dass dem Experiment keine unterrichtsbegleitende, sondern eine unterrichtstragende Rolle zukam [401]. Zudem gefällt es – unabhängig davon, ob es ihr Lieblingsfach ist oder nicht, und ob sie besonderes Interesse daran haben oder nicht – den Schülern insbesondere, wenn sie selber Experimente durchführen dürfen [402–404]. Somit konnte auch den Interessen der Hauptadressaten entsprochen werden. Hinzu kommt, dass das „Bemühen des Lehrers um Schülerversuche [...] mit Fachbeliebtheit und Interesse“ korreliert [405]. Dabei ist entscheidend, dass das Experiment nicht um seiner selbst willen eingesetzt, sondern in einem zyklischen Prozess mit der Theorie verknüpft wird (s. Abb. 66) [406]. Nach dem konstruktivistisch-hermeneutischen Ansatz wird der Lernerfolg, so sehr das Experimentieren an sich schon Schülern Freude bereitet, nicht nur „durch die bloße Durchführung eines Experiments“ erreicht. „Erst, wenn eine Verknüpfung von Theorie und Praxis hergestellt wird, besteht die Wahrscheinlichkeit auf Lernerfolg“ [406]. Denn ABRAHAM und MILLER sehen im Experimentieren die folgende ausschlaggebende Intention: „The fundamental purpose of practical activity in science teaching is to help the students make links between the real world of objects, materials and events, and the abstract world of thoughts

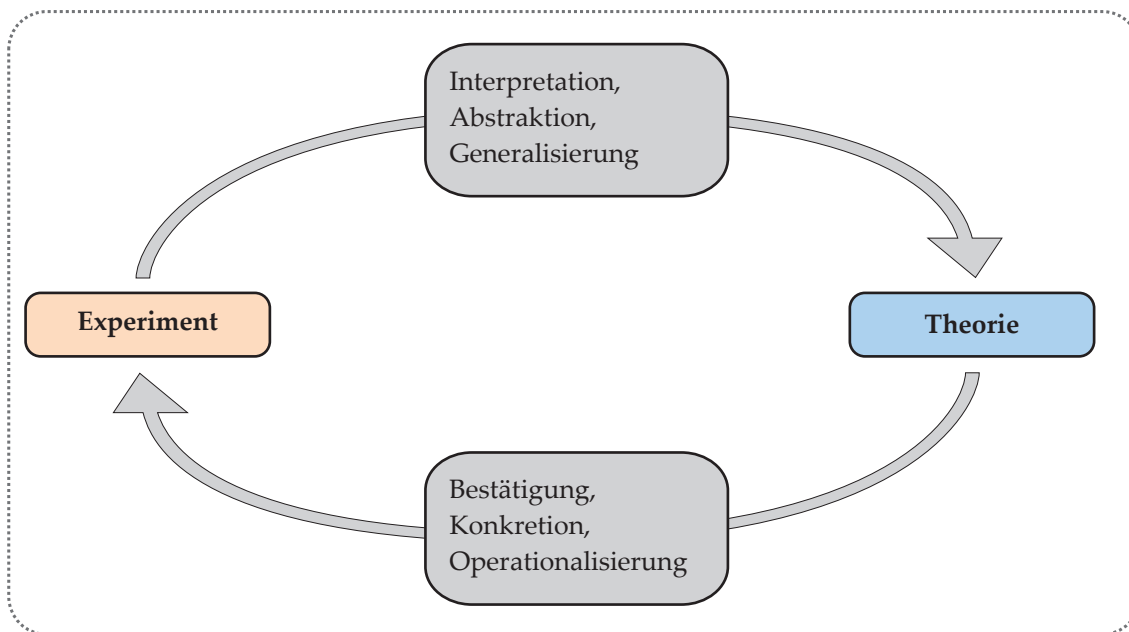


Abb. 66: Verhältnis von Theorie und Praxis (nach [406]).

and ideas" [407]. Mit den Worten von Max PLANCK hieße es: „Theorie und Experiment, sie gehören zusammen, eines ohne das andere bleibt unfruchtbar. Theorien ohne Experimente sind leer, Experimente ohne Theorie sind blind“ [408].

4.1.1.1 Auswahl der Experimente

„Ein hübsches Experiment ist schon an sich wertvoller, als zwanzig in der Gedankenretorte entwickelte Formeln; einen jungen Geist vollends, der sich in der Welt der Erscheinungen erst zurecht finden will, soll man mit den Formeln gänzlich verschonen.“ [409]

— A. EINSTEIN

„Schüler schätzen es ganz besonders, wenn aktuelle und lokalspezifische Kontexte aufgegriffen und in den Unterricht integriert werden“, so TAUSCH [83]. Und wenn diese Kontexte, konkret auf den Chemieunterricht bezogen, auf Experimenten basieren, dann müsste das Experiment für den Schüler, zumindest was den Inhalt angeht, der Inbegriff idealen Unterrichts sein. Denn zahlreiche Studien wie beispielsweise die von DEMUTH belegen die positive Wirkung der Schülerversuche auf die Schüler: „Zwischen 30 – 40 % der Schüler sind am Fach Chemie stärker interessiert, wenn Schülerübungen durchgeführt werden“ [384]. Den Versuch zu unternehmen, zeitgemäße Inhalte wie z. B. innovative Schülerexperimente in den Unterricht zu integrieren, ist eine notwendige Aufgabe der Chemielehrer (vgl. Kap. 2.1.3, Einstiegszitat). STÄUDEL und WÖHRMANN appellieren angesichts der Ergebnisse der ersten TIMSS-Studien wie folgt:

„Dringender als je zuvor wird dazu aufgerufen, dass der Unterricht die Erfahrungen der Schülerinnen und Schüler – die aktuellen wie die im gesellschaftlichen Umfeld machbaren einbezieht; [...] und dass das praktische Arbeiten wieder an Bedeutung gegenüber dem Verbal-Kognitiven gewinnt“. [398]

Natürlich soll das Experimentieren den Schülern Spaß bereiten, denn dadurch setzen sie „von sich aus die Lernhandlung fort“ [410], zumal laut einer früheren Studie von BECKER das „Bemühen des Lehrers um Schülerversuche [...] mit Fachbeliebtheit und -interesse“ korreliert [405]. Jedoch müssen darüber hinaus noch weitere Faktoren erfüllt werden. Dafür sollten hier neben bildungswissenschaftlichen Erkenntnissen die Meinung der Lehramtsstudierenden und insbesondere der Lehrpersonen (s. Kap. 3.4.2.2; Kap. 3.4.2.3) berücksichtigt werden. Das bedeutet konkret, dass bei der Auswahl der photochemischen Experimente für die Arbeitsmaterialien bzw. die Feldstudie vor Ort an Schulen die Bedürfnisse und Vorstellungen der Lehrpersonen zur Kenntnis genommen wurden. Denn unter „den schulischen Kontexten im Chemieunterricht nimmt die Lehrperson den Spitzenplatz ein. Sie hat den wichtigsten Einfluss nicht nur auf die Lernmotivation und die Lerneffizienz in einer Lerngruppe, sondern auf das Image und die Beliebtheit des Chemieunterrichts an der Schule insgesamt“ [83].

4.1.1.1.1 Anforderungen an die Experimente

Werden die Erwartungen der Lehrpersonen und der Lehramtsstudierenden zusammengeführt, so spiegeln sich darin die Kriterien für die Auswahl der photochemischen Experimente wider, die insgesamt betrachtet den Anforderungen von BANERJI an didaktisch prägnante Experimente gleichzusetzen sind (vgl. [411]):

„Im Rahmen der curricularen Innovation kommt [...] der Entwicklung didaktisch prägnanter Experimente zu neuen Inhalten eine zentrale Bedeutung zu. Didaktisch prägnant ist ein Experiment nach Auffassung des Autors dieser Arbeit, wenn folgende Kriterien erfüllt sind.

- a) Das Experiment zeigt eindeutig das Phänomen, welches zum didaktisch intendierten Lernziel führt und weist möglichst wenige Nebenphänomene auf, die vom Hauptphänomen ablenken könnten.
- b) Das Experiment ist adressatengerecht, d.h. von Schülern der entsprechenden Jahrgangsstufe oder aber zumindest von Chemielehrern selbst durchführbar.
- c) Das Experiment erfüllt die Sicherheitsanforderungen für den Einsatz an Schulen.
- d) Das Experiment ist mit schulüblichen Mitteln, geringer finanzieller Belastung („low-cost“) und mit vertretbarem zeitlichem Aufwand im Chemieunterricht einsetzbar.“ [30]

Im Folgenden werden diese vier Kriterien a) bis d) theoretisch legitimiert und näher erläutert:

a) Das erste Kriterium kann in zwei "Unterkriterien" geteilt werden, die oftmals während der Durchführung eines Experiments voneinander abhängen: Das Experiment sollte 1. gelingen und 2. einen deutlichen Effekt zeigen [412] (vgl. Kap. 3.4.2.2). Durch die Erfüllung dieser Kriterien soll „das Kompetenzerleben durch Erfolgserlebnisse“ gewährleistet werden [406]. Dass das Experiment „zumindest bei 70 % funktioniert, [wäre für die interviewte Lehrperson wichtig, da es sonst] [...] schwierig für die Auswertung [des Versuchs]“ würde (s. Kap. 3.4.2.2, 1). Bezogen auf das 2. Unterkriterium sagen BADER und LÜHKEN: „Es ist von geringer Überzeugungskraft, wenn aus einer farblosen Flüssigkeit durch Zugabe eines farblosen Reagenzes eine farblose Lösung entsteht. Die Effekte sollten vor allem von jüngeren Lernenden unmittelbar zu erkennen sein“ [412]. KEUNE (nach [413]) setzt die Anschaulichkeit eines chemischen Schulexperiments sogar einem Wertmesser gleich, der als didaktisches Mittel den „Schülern das Erreichen eines Unterrichtsziels zu erleichtern vermag“ [413]. Unterstützt wird diese Ansicht von POSNER et al.:

„Most of the anomalies will not be readily seen as anomalies by students without a thorough understanding of the observational theory in which the experiment was embedded. That is, most of the experiments are far from being 'transparent'.” [414]

Wenn die Gedankengänge der Schüler nicht zusätzlich mit optischen Eindrücken untermauert werden können, dann ist die Folge, dass diese zudem nur im Kurzzeitgedächtnis gespeichert werden und kein nachhaltiger Lernerfolg erreicht wäre, „da Bilder das Verstehen und Behalten [...] deutlich unterstützen können“ [415]. So ist der

„Chemieunterricht [...] in ganz besonderer Weise auf ‚hübsche Experimente‘ angewiesen, die in sinnlich wahrnehmbaren Phänomenen genau die Beobachtungen liefern, die treffsicher Deutungen und Erklärungen auf der gedanklichen Ebene der Modelle und Konzepte einleiten.“ [416]

Durch die unerwarteten Beobachtungen kann bei den Schülern, die bisher keine photochemischen Experimente bzw. nicht die Wirkung der Lichtenergie als Auslöser für Farbveränderungen oder Lichtemission von Proben kennen, ein *kognitiver Konflikt*, auch *kognitive Krise* genannt, im Sinne des *Konstruktivismus* ausgelöst werden [384, 417]. TAUSCH drückt dies wie folgt aus:

„Gelegentlich führt die Konfrontation mit neuen Fakten zu einer kognitiven Krise oder einem kognitiven Konflikt mit den bisher vorhandenen Vorstellungen und Konzepten. In diesen Fällen kommt es bei der Anpassung zu grundlegenden Änderungen von Begriffen und Konzepten vergleichbar mit dem Paradigmenwechsel in der Wissenschaftstheorie.“ [417]

Der *Paradigmenwechsel* in den Naturwissenschaften nach KUHN [418] ist eng mit der *Conceptual-Change-Forschung* verbunden [419]. Im Sinne der *Conceptual-Change-Theorie* nach POSNER et al. ist für die Akkomodation eines naturwissenschaftlichen Konzepts ein kognitiver Konflikt notwendig [414]. Dabei sollte man jedoch realistisch bleiben, wenn es um die Dauer des Konzeptwechsel-Prozesses geht [414]. Nach FRIEDRICH heißt es dazu:

„Selbst wenn sich wegen eines kognitiven Konflikts Lernende bewusst mit wissenschaftlich angemessenen Konzepten auseinandersetzen, wäre aufgrund der tiefen Verwurzelung der Präkonzepte nur mit einer graduellen, schrittweisen Abänderung dieser Präkonzepte zu rechnen, was auch empirische Studien belegten.“ [419]

Wenn Schüler durch eigene Erfahrungen feststellen, dass das neue Konzept bzw. die Errungenschaft, in diesem Fall die Feststellung der Beeinflussung von chemischen Reaktionen durch Lichtenergie, übertragbar ist auf weitere Situationen, dann wird das neue Konzept von ihnen übernommen. POSNER et al. drücken dies wie folgt aus: „If the new conception not only resolves its predecessor’s anomalies, but also leads to new insights and discoveries, then the new conception will appear fruitful and the accommodation of it will seem persuasive“ [414].

b) „Unabdingbares Charakteristikum des Schülerexperiments [...] ist die Selbsttätigkeit der Lernenden“ [420]. Nach SCHMIDKUNZ und LINDEMANN ist eines der pädagogischen Mittel, die sie allgemein als didaktische Lernprinzipien bezeichnen, zur förderlichen Beeinflussung des Lernprozesses das *Prinzip der hohen eigenen Aktivität*. Dieses besagt,

„dass ein Lernprozess dann günstig beeinflusst wird, wenn der Lernende mit hoher eigener Aktivität am Wissenserwerb beteiligt ist und möglichst selbstständig zu neuen Erkenntnissen gelangt. Die Grundlagen hierfür bilden psychologische Forschungsergebnisse von PIAGET und AEBLI, die auf den großen Einfluss der Aktivität bei Lernprozessen hinweisen.“ [421]

Dabei sollen das *Prinzip der hohen eigenen Aktivität* und das *des Lernens aus Interesse* im Lernprozess *synergetisch* wirken. Mehreren Untersuchungen zufolge konnte festgestellt werden, dass durch die Möglichkeit des selbstständigen Experimentierens¹³³ in Kleingruppen sowohl das Interesse als auch der Lernerfolg der Schüler gesteigert werden konnte [406, 421]. „Nach konstruktivistischer Auffassung erfolgt Wissenserwerb nur dann, wenn eine aktive, eigenständige Konstruktion von Wissen durch den Lernenden selbst stattfindet“ [422]. Der so bezeichnete Kreis schließt sich also mit dem *Prinzip des Erfolgserlebnisses* (s. Abb. 67): „Erfolgserlebnisse wecken neues Interesse, schaffen somit weitere Lernmotivation, fördern eigene Aktivitäten und den Drang zum Suchen, um neue Erkenntnisse zu erwerben“ [421].

¹³³ Dass dieses Kriterium auch für die teilnehmenden Lehrpersonen von großer Bedeutung war, wurde durch ihr Feedback deutlich (s. Kap. 5.4.4.2, Tab. 47, I15).

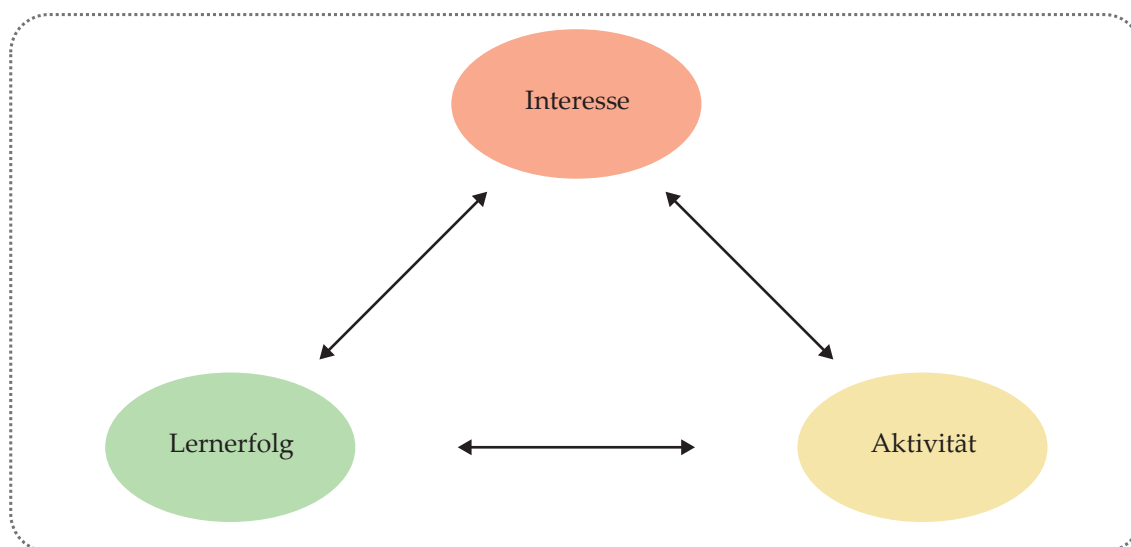


Abb. 67: Die Wechselwirkung von drei der Prinzipien des *forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens* nach SCHMIDKUNZ und LINDEMANN (nach [421, 423]).

Auch im Hinblick auf den impliziten Wunsch der interviewten Lehrpersonen nach Schülerversuchen (s. Kap. 3.4.2.2, 1; 3, (c)) wurden nur Experimente gewählt, die von den Schülern der entsprechenden Jahrgangsstufe (unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vergaben (s. c)) selbstständig durchgeführt werden dürfen.

c) Die Arbeitssicherheit muss für alle, sich zum Zeitpunkt des Experimentierens im Chemieraum befindenden Personen gewährleistet sein. Bei der Auswahl der Experimente wurden daher die *Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht an allgemeinbildenden Schulen in NRW* (RISU-NRW) befolgt. Zudem wurden die Tätigkeitsbeschränkungen und -verbote für Chemikalien aus dem *Gefahrenstoffsystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung* (DEGINTU) berücksichtigt. Für die Lehrpersonen als Verantwortungsträger ist es von sehr großer Bedeutung, dass von den Versuchen keine Gefahr für den Schüler ausgeht (vgl. Kap. 3.4.2.2, 1). Die Hinweise zu den Chemikalien befinden sich im Anhang (s. Kap. 9.5.4).

d) Nicht nur durch die Aussagen der Lehrpersonen, die interviewt wurden (s. Kap. 3.4.2.2), sondern auch durch weitere Studien wird verdeutlicht, dass Lehrer bei der Auswahl der praktischen Übungen sehr wohl die finanziellen Möglichkeiten der Schule beachten müssen [424]. Einer der von den Lehrpersonen am häufigsten genannten Gründe, der gegen die Durchführung von Schülerexperimenten spricht, ist laut der Befragung von knapp über 100 Lehrpersonen die *man-gelnde Ausstattung* [424]. Ein weiterer Aspekt, der damit einhergeht, ist die *Klassenstärke*, welche mit ähnlicher Häufigkeit als Argument angegeben wurde. Durch die qualitative Untersuchung anhand von Interviews (s. Kap. 3.4.2.2, 1) werden diese Ergebnisse durch folgende Aussage einer der Lehrpersonen bestätigt:

„Und zum anderen ist das bei uns so, dass wir **nur einen Abzug** haben, der nicht von hinten zu begehen ist. [...] Schülerexperimente, die unter dem Abzug zu machen sind, lassen sich in der Regel nicht durchführen, außer, es ist ein sehr kleiner Kurs oder man hat verschiedene Gruppen.“

Eine enorme Rolle spielt für die Lehrpersonen auch der zeitliche Faktor. Insgesamt wurden Experimente gewählt, die von Schülern ohne weitere Unterstützung von Lehrern motorisch selbstständig durchführbar sind. Zudem werden Gerätschaften verwendet, die entweder in einer üblichen Chemiensammlung der Schule zu finden sind oder bei denen es sich teilweise um Materialien handelt, die die Schüler aus ihrem Alltag kennen (s. Kap. 6.2; Kap. 6.4). Die Taschenlampe, welche für alle Experimente verwendet wird, kostet ca. 25 € (s. Tab. 33) [425], während der Preis für einen schultauglichen Teclubrenner mit Luftregulierung handelsüblich bei ca. 40 € liegt [426, 427]. Die Liste der eingesetzten Gerätschaften und Chemikalien (s. Kap. 9.5.4) mit den aktuellen Preisen und Bezugsquellen befindet sich in den Tabellen 32 und 33.

Chemikalie, Reinheit	Lieferant, CAS-Nr.	Menge, Kosten	Ungefährer Verbrauch pro Experiment pro Lerngruppe á 15 2er-Gruppen nach Arbeitsblättern (1 – 7) ¹³⁴
Ethanol, technisch	BUW ¹³⁵		60 mL (1, 6, 7)
Ethanol, ≥ 99,5 %	Carl Roth, 64-17-5	1 L, 68,50 €	
Aceton, Propanon, technisch	BUW		60 mL (1, 6, 7)
	Carl Roth, 67-64-1	2,5 L, 58,50 €	
n-Heptan, 99 %	Fisher Scientific, 142-82-5	1 L, 56 €	60 mL (1, 6, 7)
Toluol, Methylbenzol, technisch	BUW		60 mL (1, 6, 7)
Toluol, Methylbenzol, ≥ 99,5 %	Carl Roth, 108-88-3	1 L, 24,50 €	
Xylol, Dimethylbenzol (Isomere), ≥ 98 %	Carl Roth, 133-20-7	1 L, 24,50 €	60 mL (1, 6, 7)
Spiropyran, 1,3,3-Trimethylindolino-6'-Nitrobenzopyrylspiran, > 98%	TCI, 1498-88-0	1 g, 50 €	3 · 30 mg (1, 6, 7) ¹³⁶
β-Carotin, Kapseln	Drogeriemarkt	50 Kapseln, ca. 5 €	2 Kapseln (1, 7) in 60 mL Heptan
Blattgrünextrakt, Kürbiskernöl	Lebensmittelgeschäft	250 mL, ca. 5 €	60 mL (1, 7)
Blattgrünextrakt, aus grünen Pflanzenblättern			in 60 mL (1, 7) Ethanol / Aceton und 10 mL Lebensmittelöl
Esculin Sesquihydrat, 97,5 %	Carl Roth, 66778-17-4	5 g, 19,90 €	250 mg (7)
Fluoreszein-Natrium, 98,5 % – 100,5 %	Honeywell, 518-47-8	100 g, 38,47 €	80 mg (7)
L(+)-Weinsäure	Carl Roth, 87-69-4	250 g, 23,59 €	50 g (7)

¹³⁴ Zur Orientierung wurden die Vorgaben in den Hinweisen für die Lehrpersonen berücksichtigt (s. Kap. 9.5.2 – 9.5.3).

¹³⁵ BUW: Bergische Universität Wuppertal.

¹³⁶ Die Spiropyran-Lösungen sind, wenn sie im Dunkeln gelagert werden, bis 2-3 Monate wiederverwendbar, je nach Häufigkeit des Bestrahlungsvorgangs.

Chemikalie, Reinheit	Lieferant, CAS-Nr.	Menge, Kosten	Ungefäher Verbrauch pro Experiment pro Lerngruppe á 15 2er-Gruppen nach Arbeitsblättern (1 – 7) ¹³⁴
Ethylviologen dibromid, 1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridinium dibromid	Sigma Aldrich, 53721-51-8	1 g, 44,75 €	Für 500 mL PBB-Lösung werden 561 g Ethylviologen, 1 g EDTA, 15 mg Proflavin verwendet. Im Dunkeln gelagert hält die Lösung ca. 6 Monate. Sie reicht für 2 Lerngruppen (5) bzw. 10 Lerngruppen (2, 3, 4) aus und kann wiederholt eingesetzt werden [253].
Proflavin, 3,6-Diaminoacridin hemisulfat	Sigma Aldrich, 1811-28-5	1 g, 15,90 €	
EDTA, Etylendiamintetraessigsäure Dinatriumsalz	Carl Roth, 6381-92-6	100 g, 19,90 €	

Tab. 32: Die für die in der Schule eingesetzten Experimente verwendeten Chemikalien, Ethanol, Aceton und Toluol wurden von der Bergischen Universität Wuppertal bezogen. Hier wurden weitere mögliche Bezugsquellen bei Bedarf angegeben. Die Hinweise zur Herstellung der für die Experimente nötigen Lösungen befinden sich im Anhang (s. Kap. 9.5.2 - 9.5.3).

Geräte/Material, Artikel-Nr.	Bezugsquelle	Anzahl, Kosten	Verwendungszweck, AB (1 – 7)
LED Taschenlampe mit 6 Farben, 1200021	LE. Lightning Ever	1; 23,50 €	Quelle der Lichtenergie (1 – 7)
Multimeter Peaktech 1070 DMM	reichelt elektronik	1; 11,95 €	Spannungsmesser (5)
Prisma 30 x 30 x 60 mm ³ , 573.GPR	Astromedia Verlag	1; 11,60 €	Zerlegung von Sonnenlicht (1)
Rollrand-Schnappdeckelglas 5 mL, 1200205400	Laborhandel24.de	200; 30,79 €	Halbzellenmaterial der PBB Konzentrationszelle (5)
Gewindeflaschen 4 mL, 548-0529	VWR	100; 33 €	Lösungsbehälter (3, 4, 5)
Reagenzgläser mit Schraubverschluss (Kulturröhrchen), 231751459	Lab Unlimited, Carl Stuart Group	100; 43,60 €	Lösungsbehälter (1, 6, 7)
Schrauben, T-Star plus – rostfrei 3,5 x 40 mm ² , 8157919	Obi	30; 4,99 €	Elektrodenmaterial der PBB-Konzentrationszelle (5)
Kaffeefilter			Elektrolytbrückenmaterial der PBB-Konzentrationszelle (5)

Tab. 33: Die für die in der Schule eingesetzten Experimente verwendeten Geräte und Materialien.

4.1.1.1.2 Gewählte Experimente


„Die Einbindung innovativer Inhalte und Methoden in den Unterricht ist im Fach Chemie noch mehr als in anderen Schulfächern notwendig. Curriculare Innovation muss daher auch in Zeiten von PISA und Kerncurricula permanent im Fokus didaktischer Forschung und Entwicklung stehen“ [26], so TAUSCH. Aus dieser Überzeugung heraus wurden in der Arbeitsgruppe TAUSCH im Laufe der Jahre zahlreiche photochemische Experimente für schulische Zwecke entwickelt

und optimiert [15, 56, 416], welche zudem durch mehrere Forschungsprojekte fachwissenschaftlich fundiert wurden [24, 169, 179, 248, 253]. Dies waren für den Autor ausreichende Gründe, aus jener Sammlung den im Vorhinein bestimmten Erwartungen (s. Kap. 4.1.1.1.1) entsprechende Schülerversuche auszuwählen.


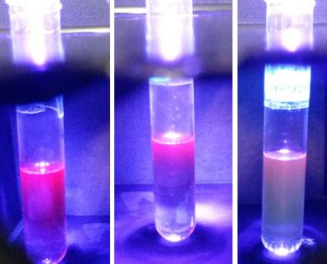

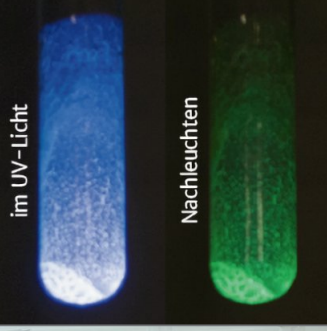
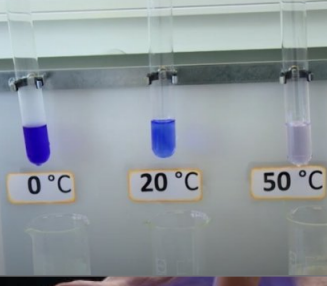

Aus den Angaben der Lehrpersonen (s. Kap. 3.4.2.2) und mit Blick auf die Lehrplaninhalte zum Thema *Energie* bzw. *Energieformen* (s. Kap. 3.1.3.2) wurden zur Orientierung und als Rahmen für die Themen der entwickelten Arbeitsblätter zwei Oberthemen gewählt:

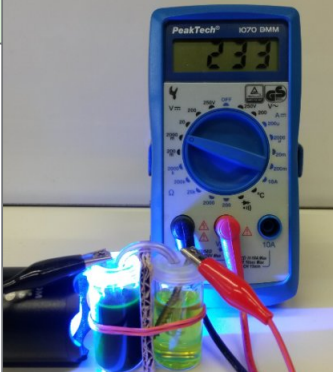
1. Farbigkeit und Lichtenergie
2. Energiekonversion und -speicherung

Die zu den beiden Oberthemen gewählten zehn Experimente a. bis k. befinden sich in Tabelle 34. Die Experimente mit den blau hinterlegten Bezeichnungen sind dem 1. und die grün hinterlegten dem 2. Oberthema zuzuordnen. Hinter der Bezeichnung des Experiments wird angegeben, in welche der Arbeitsblätter (1–7) (s. Kap. 4.1.3) diese aufgenommen wurden. Details dazu sind sowohl in den Arbeitsblättern (s. Kap. 4.1.3; Kap. 9.4) als auch in den Zusatzmaterialien (s. Kap. 9.5) für die Lehrer vorhanden.

Kurze Beschreibung der photochemischen Experimente	Bild
<p>a. Zerlegung von Licht</p> <p>Das in das Prisma einfallende Sonnenlicht wird so in das Farbspektrum zerlegt. Zusätzlich soll der Versuch mit grünem, violettem Licht und dem weißen Licht einer LED-Lampe getestet werden (s. Kap. 2.3.1.1).</p>	
<p>b. Abhängigkeit der Farbe vom Licht (1) [428 – 430]</p> <p>Eine β-Carotin-Lösung und Blattgrünextrakt werden mit einer UV-Taschenlampe¹³⁷ bestrahlt. Der Blattgrünextrakt leuchtet unter UV-Licht rot, während bei der β-Carotin-Lösung keine besondere Farbänderung auffällig ist (vgl. Kap. 2.3.3.3.1; Kap. 2.3.3.3.3).</p>	
<p>c. Weinender Kastanienzweig (1) [24, 428]</p> <p>Ein Kastanienzweig wird schräg angeschnitten in ein mit Wasser gefülltes Becherglas eingetaucht. Bei Bestrahlung der Lösung mit UV-Licht ist der unter diesem blau leuchtende Farbstoff Esculin zu erkennen, der aus den Ästen des Kastanienzweigs entrinnt (s. Kap. 2.3.3.3.1).</p>	

¹³⁷ Alle hier aufgeführten Experimente a–h können sowohl mit der angegebenen Taschenlampe (s. Kap. 4.1.1.1.1; Tab. 32), welche violettes Licht mit ca. 390-395 nm besitzt, durchgeführt werden, aber auch mit UV-Licht der Wellenlänge von ca. 365 nm. Hier wird jedoch durchgehend von UV-Licht gesprochen.

Kurze Beschreibung der photochemischen Experimente	Bild
<p>d. Solvatochromie (1, 6) [179, 241]</p> <p>Wird Spiropyran jeweils in einem der drei Lösemittel Ethanol, Aceton und Xylol gelöst und mit UV-Licht bestrahlt, so färben sich die Lösungen rot-pink, violett bzw. blau (s. Kap. 2.3.2.1). Sobald die Proben nicht mehr bestrahlt werden, entfärben sich die drei Lösungen wieder.</p>	
<p>e. Aggregationsinduzierte Lichtemission (6, 7) [179]</p> <p>Werden die drei Spiropyran-Lösungen aus d im Dunkeln unter Bestrahlung mit UV-Licht betrachtet, so lässt sich in Abhängigkeit von der Polarität der Lösemittel-Moleküle (auf dem Foto von links nach rechts fallend; Ethanol, Aceton, Xylol) die Intensität der roten Lichtemission beobachten (s. Kap. 2.3.3.3.2).</p>	
<p>f. Fluoreszenz (7) [24, 428]</p> <p>Eine β-Carotin-, Esculin- und Fluoreszein-Lösung (auf dem Foto von links nach rechts) werden im Dunkeln mit UV-Licht (ca. 365 nm) bestrahlt. Während die β-Carotin-Lösung dunkel bleibt, fluoreszieren die anderen beiden Lösungen, d. h. sie emittieren Licht (s. Kap. 2.3.3.3.1; Kap. 2.3.3.3.3).</p>	
<p>g. Phosphoreszenz (7) [24, 428]</p> <p>Einer Weinsäure-Schmelze wird Esculin hinzugefügt und durch Drehen des Reagenzglas an der Innenwand verteilt. Nach dem Erstarren der Schmelze wird sie mit UV-Licht bestrahlt. Im UV-Licht fluoresziert sie blau-weiß; unmittelbar nach dem Ausschalten ist ein Nachleuchten zu beobachten (s. Kap. 2.3.3.3.1).</p>	
<p>h. Temperaturabhängigkeit thermischer Reaktionen (7) [179, 240]</p> <p>Die Spiropyran-Xylol-Lösung färbt sich bei Bestrahlung mit UV-Licht unabhängig von der Umgebungstemperatur gleich schnell blau. Die Entfärbung der blauen Lösung ist jedoch temperaturabhängig, da zu beobachten ist, dass bei steigender Temperatur die jeweilige Lösung sich schneller entfärbt (s. Kap. 2.3.3.3.4).</p>	
<p>i. Experiment mit der Photo-Blue-Bottle-Lösung (2, 3/4, 5) [245, 251]</p> <p>Durch Bestrahlen der PBB-Lösung mit unterschiedlichen Lichtenergien wird festgestellt, dass sie sich gut mit blauem (450 – 455 nm) und weißem und schlechter mit violetter Licht blau färbt. Mit grünem (520 – 525 nm) und rotem Licht (620 – 625 nm) wird keine Veränderung erreicht. Zudem wird durch Wärmezufuhr und Wärmetzug deutlich, dass die Initiierung der Reaktionszyklen temperaturunabhängig und nur durch Lichtenergie möglich ist (s. Kap. 2.3.3.3.5). Die Entfärbung der PBB-Lösung findet durch Schütteln bzw. den Eintrag von Sauerstoff aus der Luft in die Lösung statt.</p>	

Kurze Beschreibung der photochemischen Experimente	Bild
<p>k. Photoelektrochemische Konzentrationszelle (5) [253, 268, 431]</p> <p>Die PBB-Lösung wird bei der photoelektrochemischen Konzentrationszelle als Elektrolyt-Lösung eingesetzt. Als Salzbrücke dient ein mit der gleichen Lösung angefeuchtetes Stück Kaffee-filterpapier (vgl. Kap. 6.4). Wird eine der Halbzellen bestrahlt, so baut sich durch das entstehende Konzentrationsgefälle zwischen den beiden Halbzellen eine Spannung auf.</p>	

Tab. 34: Beschreibung der für die Arbeitsblätter (1 – 7) ausgewählten Experimente. Alle Bilder (mit Ausnahmen von g [428] und h [240]) sind während der Untersuchungen entstanden.

Das Experiment *Zerlegung von Licht* (s. Tab. 34, a) ist ein zusätzliches Experiment, das für das Arbeitsblatt *Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft* (s. Kap. 4.1.3) als Basisexperiment aufgenommen wurde, um die Schüler zuerst einmal damit vertraut zu machen, woraus Sonnenlicht besteht und dass Licht abhängig von seiner Farbe unterschiedlich viel Energie trägt, d. h. dass energiereiches und energiearmes Licht unterschieden werden. Sie sollen mit diesem im Physikunterricht typischen Experiment für das Thema *Licht* im Allgemeinen sensibilisiert werden (vgl. Kap. 3.2.3.2, 4; Kap. 3.4.2.2, 4; Kap. 3.4.2.3, 10, Tab. 23).

Die Besonderheiten der Experimente mit der PBB-Lösung (s. Tab. 32) werden in Kap. 4.1.3.2 näher erläutert.

4.1.2 Didaktisch-methodische Überlegungen zum Entwurf

Zu jeder Unterrichtsplanung gehört die Klärung der zu fördernden Kompetenzen aus den Kompetenzlisten in den KLPen (s. Kap. 4.1.3.1; Kap. 4.1.3.2). Das wiederum wirkt sich unmittelbar auf die Wahl und Formulierung der Arbeitsaufträge für die Lernenden aus. Grundsätzlich wurde dabei zum einen mithilfe der konzipierten Arbeitsmaterialien auf *schüleraktiven Unterricht* gezielt. Dieser Ausdruck steht nach HAGSTEDT und HILDEBRAND-NILSHON für „einen Prozess, in dessen Verlauf Schüler und Lehrer gemeinsam die unterrichtlichen Handlungsmuster so ändern, dass ein zunehmend größeres Ausmaß an Selbstständigkeit und Mitverantwortung für das eigene Lernen möglich wird“ [432]. Zum anderen wurde nach dem Ansatz von WIATER zur Stärkung der Lernmotivation *schülerorientiert* vorgegangen (vgl. Kap. 4). „Schülerorientiert meint [...] [dabei], die Lehrerzentriertheit zugunsten eines Unterrichts aufzugeben, der vom Schüler her, mit dem Schüler zusammen und auf den Schüler hin geplant und gestaltet ist [433]. Zwar werden diese beiden Herangehensweisen in erster Linie im Zusammenhang mit der Strukturierung des Unterrichts selbst und der Methodenwahl gesehen, jedoch steht auch die Gestaltung der Arbeitsblätter unter deren direktem Einfluss.

So wurden letztendlich „aktuelle Kenntnisse aus der Forschung über Unterrichtsentwicklung sowie schulpolitische Grundlagen und Entscheidungen des Landes Nordrhein-Westfalen berücksichtigt“ [434], welche als allgemeingültig und im praktischen Bildungswesen als sinnvoll erachtet wurden. Bei der Gestaltung der Arbeitsmaterialien wurden, aufgrund der Stichprobenzusammensetzung aus einer hohen Anzahl an unterschiedlichsten Lerngruppen (s. Kap. 5.2.2), nicht speziell ausgewählte Lerngruppen betrachtet. Es wurde also unabhängig von ausgewählten Lerngruppen nach den den dafür aufgestellten allgemeinen Kriterien vorgegangen (s. unten). Dabei wird aus dem letztgenannten Grund vorausgesetzt, dass die Arbeitsblätter durch ihren Aufbau und die Konstellation der Aufgaben und Schülerversuche den an der Feldstudie teilnehmenden Lehrpersonen, im Hinblick auf ihren eigenen Unterricht und ihre Lerngruppe, Flexibilität anbieten. Konkret bedeutet dies, dass sie die Aufgaben und Experimente ohne große Umstände an ihre Schüler anpassen können sollten, indem sie beispielsweise nur ausgewählte Aufgaben oder in der Formulierung leicht veränderte Aufgaben daraus einsetzen. So konnten die Arbeitsblätter im Grunde als eine Art *Arbeitsapparat* bzw. *Aufgabenpool* zur Thematisierung bzw. Auswertung der in ihren Unterricht integrierten photochemischen Experimente genutzt werden.

Bei der Formulierung oder Auswahl der Aufgaben wurde konkret auf folgende Aspekte geachtet:

- a. Die Aufgaben orientieren sich an den Vorgaben des Landes NRW für den Chemieunterricht (vgl. Kap. 3.2.2; Kap. 3.2.3). Zur Formulierung der Aufgaben wurden die vorgeschlagenen *Operatoren* für das Fach Chemie [435] beachtet. Die Operatoren wurden so gewählt, dass innerhalb der Aufgaben eines Arbeitsblatts verschiedene *Anforderungsbereiche* [14] für die Schüler erfüllbar sein sollten.

Motivations- und handlungstheoretischen Ansätzen nach lösen mangelnde Handlungsreize und Unterforderung Langeweile aus [436]. „Charakteristisch für die kognitive Komponente von Langeweile ist der Verlust subjektiver Ziele. Die Situation wird als uninteressant und wenig fordernd angesehen, der eigene Zustand als unbefriedigend eingeschätzt“ [436]. Auch deshalb ist eine ausgewogene Konstellation aus den unterschiedlichen Aufgabentypen und Schwierigkeitsgraden der Aufgaben im Hinblick auf die Motivation der Schüler mit recht unterschiedlichen Leistungsniveaus besonders wichtig. Durch die passende Wahl der Aufgaben für die jeweiligen Schülergruppen in dem Chemiekurs sollten Unterforderung und Langeweile vermieden werden. Denn „[g]eringe Anforderungen des Chemielehrers bewirken zwangsläufig keine positiven Einstellungen. Im Gegenteil deutet sich für ältere Schüler hohe Wertschätzung bei durchaus gegebenen Leistungsanforderungen an“ [405].

- b. Durch die unterschiedlichen Schwierigkeitsgrade der Aufgaben hat der Lehrer, beispielsweise durch eine arbeitsteilige Gruppenarbeitsphase, eine weitere Möglichkeit in seinem Unterricht zu *binnendifferenzieren* [437,

438]. Mit den Arbeitsblättern zum Oberthema *Farbigkeit und Lichtenergie* (s. Kap. 4.1.3.1) bietet es sich bei Bedarf auch an, „innere Differenzierung durch arbeitsteiliges Experimentieren“ zu realisieren (vgl. [439]). Um den "Leerlauf" (vgl. [440, 441]) in den kognitiven Anstrengungen der Schüler während der Erarbeitungsphasen zu verhindern, wäre ein weiterer Vorteil der, dass Schülergruppen oder einzelne Schüler, die mit den eigenen Aufträgen bereits fertig geworden sind, sich mit den Aufgaben einer weiteren Gruppe auseinandersetzen könnten.

c. Aufgrund der Tatsache, so das Ministerium für Schule und Bildung NRW, dass

„Bildung [...] der entscheidende Schlüssel [ist], um alle Heranwachsenden an den Chancen des digitalen Wandels teilhaben zu lassen [, sollen] Jugendlichen [...] die erforderlichen Schlüsselqualifikationen [...] vermittelt und so eine gesellschaftliche Partizipation sowie ein selbstbestimmtes Leben ermöglicht werden.“ [442]

So wurde nach der KMK-Strategie *Bildung in der digitalen Welt* von 2016 der *Medienkompetenzrahmen NRW* entwickelt. In diesem Sinne ist dieser

„auch eine verbindliche Grundlage für die sukzessive Überarbeitung aller Lehrpläne und aller Schulformen der Primarstufe und der Sekundarstufe I mit dem Ziel, dass das Lehren und Lernen mit digitalen Medien zur Selbstverständlichkeit im Unterricht aller Fächer werden kann und alle Fächer ihren spezifischen Beitrag zur Entwicklung der geforderten Kompetenzen beitragen werden.“ [442]

Außerdem ist es nach TAUSCH „[z]eitgemäß und von großem Vorteil, wenn die gedruckten und die elektronischen Medien miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig ergänzen“ [15]. Damit begründet wurden in die Arbeitsblätter digitale Medien integriert, wie Flash-Animationen und Lehrfilme¹³⁸. Die Arbeitsblätter (s. Kap. 9.4), das Glossar (s. Kap. 9.5.5) und die Erwartungshorizonte (s. Kap. 9.5.1)¹³⁹ und weitere Zusatzmaterialien (s. Kap. 9.5) zu diesen sind für Lehrer und für Schulen mit entsprechender technischer Ausstattung auch in digitaler Form auf der Homepage *Chemie mit Licht* zu erhalten [443]. Zudem gibt es noch weitere Online Tutorials [444] passend zu den ausgewählten photochemischen Experimenten [236, 445], die in Kombination mit den eben genannten elektronischen Medien eventuell unter anderem im Sinne des Konzepts *Flipped Classroom* [446] eingesetzt werden können.¹³⁸ „The fundamental idea behind flipping the classroom is that more classroom time should be dedicated to active learning where the teacher can provide immediate feedback and assistance“ (nach [447]).

¹³⁸ Dies darf jedoch nicht zulasten des Experimentierens gehen. Die enorme Bedeutung davon wurde bereits ausreichend thematisiert (s. Kap. 4.1.1.1).

¹³⁹ Exemplarisch befinden sich im Anhang die Musterlösungen zu den Arbeitsblättern 1, 6 und 7. Alle Musterlösungen befinden sich auf der Homepage *Chemie mit Licht* [443].

Wichtig ist der von dem Lehrer durchdachte sinnvolle Einsatz der digitalen Medien; sie sollten nicht bloß um ihrer selbst Willen eingesetzt werden.

- d. Von besonderer Notwendigkeit ist bei der Erstellung der Arbeitsmaterialien die Beachtung der verschiedenen Ebenen der chemischen Fachsprache [448]. Zum Umgang mit Schülervorstellungen entwickelte JOHNSTONE nach kognitionspsychologischem Ansatz ein *Chemical Triangle* (s. Abb. 68) [449]. Damit wird aufgezeigt, dass chemische Inhalte auf drei unterschiedlichen Ebenen betrachtet werden können:

„My second model has to do with the nature of chemistry. I believe that it exists in three forms which can be thought of as corners of a triangle. No one form is superior to another, but each one complements the other. These forms of the subject are

(a) *the macro* and tangible: what can be seen, touched and smelt;

(b) *the submicro*: atoms, molecules, ions and structures; and

(c) *the representational*: symbols, formulae, equations, molarity, mathematical manipulation and graphs.“ [450]

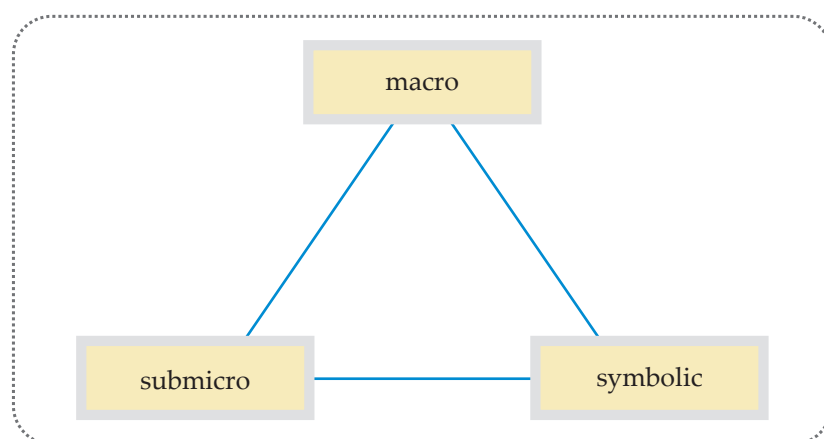


Abb. 68: Das *Chemical Triangle* nach JOHNSTONE (nach [448, 449]).¹⁴⁰

Dabei muss die Lehrperson darauf achten, dass Schüler die Ebenen nicht durcheinanderbringen und nicht es zur Bildung von Fehlvorstellungen kommt.

„A common component of chemistry introduction is the inclusion of practical or laboratory work. As indicated by JOHNSTONE, one reason why students find chemistry difficult is that in the laboratory, they make observations at the macroscopic level, but instructors expect them to interpret their findings at the microscopic level.“ [453]

Das Training der Unterscheidung der drei Zugangsweisen zur Vermeidung von Fehlvorstellungen und Schwierigkeiten im Chemie-

¹⁴⁰ Recht ähnlich ist dies BRUNERS EIS-Prinzip, das häufig in der Mathematikdidaktik vorkommt [451] (vgl. [452]). Dabei handelt es sich um folgende drei Repräsentationsebenen bzw. Zugangsweisen: Enaktiv, Ikonisch, Symbolisch.

unterricht bedingt die Integration von unterschiedlichen Darstellungsformen fachlicher Inhalte in die Arbeitsblätter bzw. deren Einsatz [414]. Besonders beim Konzipieren der Arbeitsblätter für die Oberstufe war es möglich, auf den drei nach JOHNSTONE beschriebenen Ebenen die Schüler mit dem Sachverhalt zu konfrontieren. LEISEN dagegen gibt folgende fünf Darstellungsformen an, die anhand des Arbeitsblatts zum Thema *Solvatochromie* (s. Kap. 4.1.3.2) mit Beispielen ausgestattet wurden (s. Abb. 69). Von der ersten Darstellungsform bis zur Letzten steigt der Abstraktionsgrad.

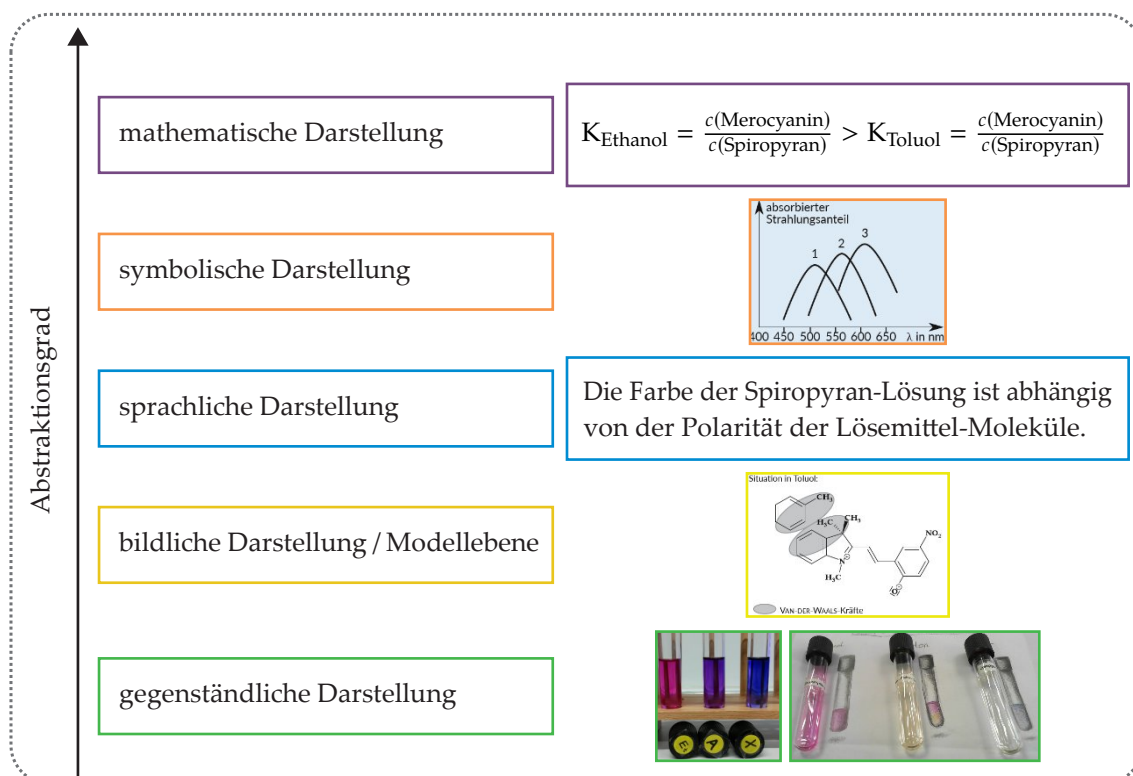


Abb. 69: Darstellungsformen nach LEISEN am Beispiel vom Arbeitsblatt zum Thema *Solvatochromie* (s. Kap. 4.1.3.2) (nach [454, 455]).

„Die angemessene Verwendung der Darstellungsformen und der Wechsel zwischen den Darstellungsformen stellen wichtige Instrumente für einen sprachsensiblen Chemieunterricht dar [...]. Die reflektierte Auseinandersetzung [der Schüler] mit den Darstellungsformen leistet gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zum fachlichen Lernen.“ [449]

LEISEN legitimiert den Einsatz verschiedener Darstellungsformen auf mehreren Wegen, indem er fachliche, didaktische, methodische, lernpsychologische und pädagogische Vorteile aufzeigt [456]. Eine allgemeine und zusammenfassende Erklärung dafür lautet wie folgt:

„Dadurch, dass Lerner einzelne Darstellungsformen in eine andere übertragen, eröffnen sich zusätzliche und didaktisch fruchtbare Chancen. Denn was ein Lerner in der einen Darstellungsform nicht

versteht, erschließt sich ihm vielleicht in einer anderen Darstellungsform besser oder überhaupt erst. Somit arbeiten die Darstellungsformen einander wechselseitig zu; häufig erweist sich sogar deren Wechsel als didaktischer Schlüssel zum fachlichen Verstehen. Zudem bietet jeder Wechsel einen Anlass zur fachlichen Kommunikation, denn immer dann, wenn eine Darstellungsform in eine andere überführt wird, eröffnen sich Gelegenheiten zum Sprechen, Schreiben und Lesen.“ [451]

Jedoch wird von JOHNSTONE von einem häufigen Wechsel abgeraten, da die Schüler möglicherweise nicht auf Anhieb in der Lage seien, diese drei Ebenen korrekt zu unterscheiden [449, 450].

- e. Aufgrund der gewählten didaktischen Lernprinzipien nach SCHMIDKUNZ und LINDEMANN (s. Kap. 4.1.1.1, b), und somit um das bloße "Experimentieren nach Kochrezept", „ohne nachzudenken bzw. ohne auf kognitive Strategien zurückzugreifen“ [406, 457] (vgl. [458]), zu vermeiden, wurde bei der Gestaltung der Versuchsvorschriften zu den in die Arbeitsblätter integrierten photochemischen Schülerexperimenten (s. Kap. 4.1.1.2) an dem Ansatz des forschenden Experimentierens angeknüpft [423, 459]. So werden in diesem Sinne den Schülern durch die kurzen – jedoch für die sichere Durchführung und in der Regel auch für die Gewinnung von phänomenologischen Erkenntnissen ausreichend langen Versuchsvorschriften gewisse Freiheiten und Möglichkeiten eingeräumt, eigene Ideen während der Experimentierphasen umzusetzen (s. Kap. 5.4.4.1). Schülern soll nicht „jede Möglichkeit der selbstständigen Auseinandersetzung mit dem Problem [bzw. dem Experiment] genommen werden“ [413]. Erst dadurch kann es innerhalb der Gruppe viel intensiver zur Kommunikation, Kooperation und Diskussion über das Thema kommen. Zu diesem Zweck wurden die Chemikalien und Gerätschaften in den Arbeitsblättern zwar innerhalb der Beschreibung der Versuchsvorschrift angegeben, jedoch nicht separat aufgeführt. Die Schüler sollen die Materialien bewusst und überlegt beispielsweise vom Lehrerpult abholen, sodass sie schon von Anfang an aufmerksam arbeiteten und für den Einsatz der Gerätschaften sensibilisiert werden konnten. Nach ROSSA ist zudem „prinzipiell abzulehnen, die Versuche schon vor der Stunde bis in alle Einzelheiten auf dem Experimentiertisch aufzubauen oder bei Schülerübungen das Material so bereitzustellen, dass die Schüler mitunter den Versuch nur in Gang setzen brauchen“ [413]. Außerdem wurden in Anlehnung an WIRTH et al.

„die Schülerexperimente nicht mit operationalen oder Problemlösezielen¹⁴¹, sondern mit Lernzielen [...] verknüpf[t]. Lernziele sind Ziele, die als zu erreichendes Ergebnis ein verändertes Wissen über einen bestimmten Inhaltsbereich vorgeben. Insofern regen sie Schülerinnen und Schüler dazu

¹⁴¹ „Operationale Ziele verlangen von Schülerinnen und Schülern, dass sie eine bestimmte Handlungsanweisung möglichst fehlerfrei umsetzen. Problemlöseziele geben ein ganz bestimmtes experimentelles Ergebnis vor, das Schülerinnen und Schüler herstellen sollen. Bei Experimenten dieser Art von Zielvorgaben konzentrieren sich Schülerinnen und Schüler darauf, vorgegebene Schritte auszuführen.“ [404]

an, ihr Vorwissen zu aktivieren [(s. Kap. 5.4.4.1)] und experimentelle Ergebnisse so zu interpretieren und zu verarbeiten, dass sie ihr Wissen weiter ausbauen, korrigieren oder ausdifferenzieren können.“ [404]

- f. Von vornherein stand fest, dass durch den mithilfe der Arbeitsmaterialien zu photochemischen Inhalten gestalteten Unterricht soziale Kompetenzen gefördert werden sollten. Laut dem KLP des Faches Chemie heißt es:

„Der Unterricht in den Fächern Chemie, Biologie und Physik unterstützt gleichzeitig auch die Entwicklung [...] sozialer Kompetenzen [...]. Schülerinnen und Schüler sollen deshalb im Unterricht insbesondere Verantwortung für das eigene Lernen übernehmen, bewusst Lernstrategien einsetzen und gemeinsam mit anderen [sic!] chemische, biologische und physikalische Phänomene erkunden [...].“ [317]

So betrachtet WAHL als soziale Kompetenzen folgende Fähigkeiten:

„Zu sozialen Kompetenzen gehören Kooperationsfähigkeit, also z. B. andere als Arbeitspartner akzeptieren und gemeinsam Entscheidungen treffen, ebenso wie Regelverhalten und Konfliktfähigkeit, also z. B. sachlich-konstruktiv Kritik üben. Eng damit verbunden sind kommunikative Kompetenzen, die unter der Überschrift ‚miteinander reden‘ zusammengefasst werden können, also z. B. gezielte Fragen stellen und aktiv zuhören können.“ [434]

Deshalb wurde bei der Gestaltung der Arbeitsblätter darauf geachtet, dass durch das Layout das *kooperative Lernen*¹⁴² bzw. *kooperatives Experimentieren* (vgl. [461]) impliziert bzw. unterstützt wird, sodass die Lehrperson problemlos im Klassenverband beispielsweise *arbeitsteilige Gruppenarbeit* [462] umsetzen kann. JOHNSON und JOHNSON definieren das kooperative Lernen wie folgt:

„Cooperation means working together to accomplish shared goals. Within cooperative activities individuals seek outcomes that are beneficial to themselves and beneficial to all other group members. Cooperative learning is the instructional use of small groups that allows students to work together to maximize their own and each other's learning“ [463, 464].

Im Laufe 30-jähriger Begleitung des kooperativen Lernens durch die Forschung wurden unter anderem folgende elf für den Unterricht und die daran Beteiligten vorteilhafte Forschungserkenntnisse nach GREEN und GREEN erreicht [465]:

¹⁴² Der Ausdruck *kooperatives Lernen* ist zwar der etablierte Ausdruck eines Konzepts, jedoch sei laut KREMERS dieser kritisch zu betrachten, „da Lernen als individueller Aneignungsprozess im Individuum konstruiert wird“, sodass der Ausdruck *Lernen in kooperativen Strukturen* sinnvoller erscheint [460].

- Entwicklung von Denkfähigkeiten auf höherem Niveau
- Förderung der Schüler-Lehrer-Interaktion und der Vertrauensbasis
- Steigerung der Schülerbeteiligung
- Erweiterung des Selbstwertgefühls
- Stärkung der Lernzufriedenheit
- Unterstützung einer positiven Haltung
- Entwicklung von Kommunikationskompetenz
- Förderung positiver interkultureller Beziehungen
- Teambildung bei Problemlösungen, bei gleichzeitiger individueller Verantwortung
- Entwicklung gegenseitiger Verantwortung
- Förderung der Lernverantwortung bei Schülern

SAUM, als bekannter Vertreter des *kooperativen Lernens*, argumentiert im Hinblick auf den Lernerfolg wie folgt:

„Zahlreiche Studien haben gezeigt, dass professionell angeleitetes Kooperatives Lernen im Vergleich mit anderen Unterrichtsmethoden zu deutlich besseren Lernergebnissen führen kann. So hat SLAVIN bereits 1983 in einer Metaanalyse festgestellt: In 88 % des untersuchten Unterrichts führt das Kooperative Lernen zu höheren Leistungen als traditioneller Unterricht“ [466].

WEINERT begründet zudem die Bedeutung des kooperativen Lernens, indem er auf die Erwartungen des Arbeitgebers eingeht: „Wenn man in deutschen Unternehmen nach den wichtigsten schulischen Bildungszielen fragt, wird Teamfähigkeit und kooperative Kompetenz nach dem Lernen lernen an zweiter Stelle genannt“ [467]. Auch nach konstruktivistischen Ansätzen wird die Gewährleistung von Lernarrangements zur Erhöhung der aktiven Beteiligung der Schüler am Unterrichtsgeschehen befürwortet [468]. „Es muss [jedoch] betont werden, dass die Befürworter des Kooperativen Lernens dieses komplexe Konzept nicht zum Allheilmittel erklären“, so KREMERS [460].

- g. Die Arbeitsblätter bieten bereits durch ihr Layout (s. Kap. 4.1.3.1; Kap. 4.1.3.2) Ideen und Möglichkeiten der strukturellen Gestaltung des Unterrichts an, da das Arbeitsblatt zum jeweiligen Thema aus Teilbereichen an Aufgaben bzw. Unterthemen zusammengesetzt ist. Diese sind zudem mit verschiedenen Farben hinterlegt, sodass sie unmittelbar erkannt werden. Einer der Teilbereiche ist so konzipiert, dass dieser von allen Schülergruppen zum Aufbau von Basiswissen für die darauffolgenden arbeitsteiligen Aufgaben aufgabengleich bearbeitet werden kann.

Ein weiterer Bestandteil der Arbeitsblätter ist die Angabe des zur Bearbeitung der Aufgaben benötigten Vorwissens in Anlehnung an die Feststellungen von AUSUBEL et al.:

„Wenn wir die ganze Psychologie des Unterrichts auf ein einziges Prinzip reduzieren müssten, würden wir dies sagen: Der wichtigste Faktor, der das Lernen beeinflusst, ist das, was der Lernende bereits weiß. Dies ermitteln Sie, und danach unterrichten Sie Ihren Schüler. [...] Hauptfunktion der Organisationshilfen [ist es], die Kluft zwischen dem, was der Lernende schon weiß, und dem, was er wissen muss, zu überbrücken, bevor er die jeweilige Aufgabe sinnvoll lernen kann.“ [469] (vgl. [470])

Diese befindet sich jeweils in der Kopfzeile, positioniert unter der Überschrift des Arbeitsblatts. Dort werden orientiert an dem Inhalt des KLPs stichpunktartig Fachbegriffe als Themen aufgeführt, zu denen die Schüler Fachwissen mitbringen sollten, da diese zur Erarbeitung der Aufgaben vorausgesetzt werden. Außerdem soll den Schülern dadurch die thematische Einordnung des aktuellen Themas des Arbeitsblatts erleichtert werden und zur Orientierung dienen. Nach JAHNKE ist es zur Beibehaltung eines auf die Lernbereitschaft sich positiv auswirkenden Lernklimas von Bedeutung und „selbstverständlich, dass Schüler immer wissen sollten, worum es gerade geht“ [471]. Auch für den Lehrer sind diese Angaben ein wichtiger Anhaltspunkt zur eventuell nötigen Vorbereitung oder für eine Wiederholung der für das entsprechende Thema als Vorwissen wichtigen Fachinhalte.

- h. Die Wahl und Konstellation der Aufgaben aus den Arbeitsblättern können die Lehrpersonen in Abhängigkeit von dem für ihren Unterricht passenden Kontext realisieren. Dies ist möglich, da das Thema der Arbeitsblätter eine ausreichende spezifische Kontextualisierung zulässt.

4.1.3 Curriculare Einordnung photochemischer Inhalte

TAUSCH stellt fest, dass „auf die didaktische Intention und die Einbettung [neu entwickelter] Versuche ins Curriculum [...] nur wenig eingegangen“ wird [75]. Gerade dies soll hier verhindert werden. So wurden in diesem Kapitel die entwickelten Arbeitsblätter explizit thematisch den in den KLPen für den CU obligatorischen Inhaltsfeldern zugeordnet. Anhand der folgenden Abb. 70 wird die Einordnung der Inhalte der Arbeitsblätter in die Inhaltsfelder für die Sekundarstufe 1 und 2 dargestellt. Hierfür wurden zudem schon veröffentlichte Vorschläge aus der didaktischen Forschung herangezogen [179, 253, 416, 472, 473]. Folgende Themen können durch die entwickelten Arbeitsblätter im Unterricht vermittelt werden:

1. Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft?!
2. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment für Stoff- und Energieumsätze
3. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur
4. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zur Energieumwandlung und -speicherung in einer lichtgetriebenen Konzentrationszelle

5. Solvatochromie – Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Farbstoffs in unterschiedlichen Lösemitteln
6. Photolumineszenz – Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

Die einzelnen Aspekte aus den KLPen, die mithilfe der Arbeitsblätter im Unterricht thematisiert werden könnten, wurden im grünen Bereich der Abb. 70 mit den Nummern der Arbeitsblätter versehen. Die Arbeitsblätter sind dort in Kleinformat in deutscher Sprache abgebildet.¹⁴³ Diese befinden sich zum Teil in größerer Form im Anhang (s. Kap. 9.4). Der Aufbau der Darstellung stellt eine Priorisierung dar: Dadurch sollte aufgezeigt werden, wie photochemische Inhalte in KLP-Inhalte integriert werden können; nicht umgekehrt! D. h.: Zur Orientierung für den Lehrer, der seinen Unterricht plant, liegen hier im Zentrum die Vorgaben der Lehrpläne des Landes und nicht die Photochemie. Dies soll keine Abwertung der Photochemie sein, sondern lediglich die Achtung der Bedeutung der KLPen für den Chemieunterricht unterstreichen und das Aufzeigen davon, dass unter den bereits gegebenen Vorgaben durch die KLPen, ohne jegliche Abänderung, photochemische Experimente und dazu fachwissenschaftliche Erkenntnisse in den Chemieunterricht integriert werden können. Ziel war es also nicht, die KLPen zu bemängeln oder für deren Abänderung zu plädieren. Sonst müsste fairerweise für jedes weitere innovative Thema, welches für den Chemieunterricht von großer Relevanz sein könnte, darüber nachgedacht werden, die KLPen dafür abzuändern. Jedoch würde dies suggerieren, dass die Standardisierung der Bildungsinhalte durch die Bildungsstandards und Lehrpläne in Frage gestellt werden müsste, was nicht die Absicht der vorliegenden Arbeit ist.

Zusätzlich wurden die Erwartungshorizonte der Arbeitsblätter erstellt. Hinzu kommen das Glossar mit den Fachbegriffen (s. Kap. 9.5.5), die in den Arbeitsblättern eingesetzt und mit einem Sternchen markiert wurden, und Hinweise zu den Experimenten (s. Kap. 9.5.2 – 9.5.4).

In den folgenden beiden Unterkapiteln (s. Kap. 4.1.3.1; Kap. 4.1.3.2) werden die didaktischen, methodischen sowie gestalterischen Besonderheiten zu den einzelnen Arbeitsblättern dargelegt und zusätzlich die durch den Einsatz und die Bearbeitung der Arbeitsblätter bei den Schülern zu fördernden Kompetenzen angegeben. Hierfür wurden die Kompetenzvorgaben in den KLPen des Landes NRW berücksichtigt. Da durch die bloßen Arbeitsblätter keine konkreten Phasen für die Unterrichtsstunden vorgeschrieben werden, konnten hier lediglich die Kompetenzen aufgeführt werden, die durch die Bearbeitung der einzelnen Aufgaben voraussichtlich gefördert werden. Hinzu kommen würden durch weitere Phasen der Unterrichtseinheiten wie die Einstiegs-, Erarbeitungs- oder Sicherungsphase noch zusätzliche dadurch zu fördernde Kompetenzen. Die Kompetenzen sind versehen mit den Abkürzungen für die Kompetenzbereiche **E**(rkenntnisgewinnung), **K**(ommunikation), **B**(eurteilen) und **UF** (Umgang mit Fachwissen) (s. Tab. 35; Tab. 36).

¹⁴³ Um die Arbeitsblätter auch international anbieten zu können, wurden die Materialien von dem Kollegen Rainer Brunnert ins Englische übersetzt (vgl. [236, 267]).

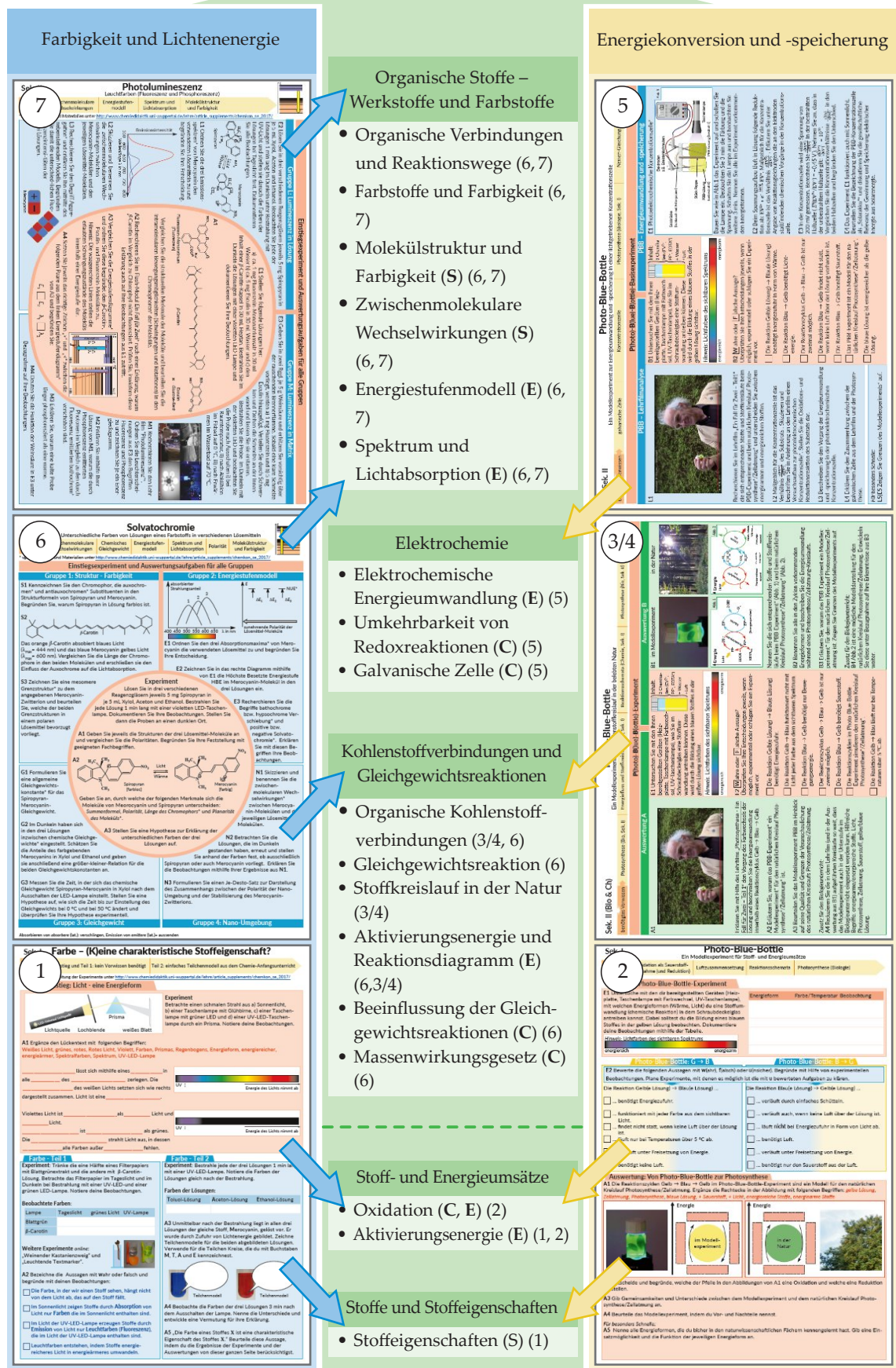


Abb. 70: Inhaltliche Einordnung der Arbeitsblätter in die KLP. Arbeitsblatt 2 wurde in zwei unterschiedlichen Versionen entwickelt (s. Kap. 9.4).

Insgesamt werden durch den Einsatz der ausgewählten photochemischen Experimente und das Ausmaß der Kompetenzförderung deutlich, dass die gewählten photochemischen Inhalte jahrgangsübergreifend mit allen Basiskonzepten verknüpft werden können (vgl. [338]). Dafür wurden in der Abb. 70 die einzelnen Aspekte aus den Inhaltsfeldern mit den für die drei Basiskonzepte stehenden Buchstaben C(hemische Reaktion), S(truktur der Materie) und E(nergie) gekennzeichnet. Außerdem zeigt sich nicht zuletzt – festzustellen durch die Angaben des *benötigten Vorwissens* auf den Arbeitsblättern (s. Kap. 4.1.3, unten) –, dass es eine beachtliche Verbindungsfläche zwischen den bereits erworbenen obligatorischen Kenntnissen und den neuen Erfahrungen der Schüler im Kontext Photochemie gibt. Insgesamt bilden deshalb die Basiskonzepte „als strukturierende Wissensbestände den Rahmen“ für all diese fachwissenschaftlichen Inhalte [317].

4.1.3.1 Arbeitsmaterialien zum Thema *Farbigkeit und Lichtenergie*

Zum Oberthema *Farbigkeit und Lichtenergie* wurden das Arbeitsblatt 1 für die Sekundarstufe 1 und die beiden Arbeitsblätter 6 und 7 für die Oberstufe entwickelt (Kap. 4.1.3, Abb. 70; Kap. 9.4). Insgesamt enthalten sie von den ausgewählten photochemischen Experimenten die Anordnung a) bis h) (Kap. 4.1.1.1.2, Tab. 33).

Mit dem **Arbeitsblatt 1** *Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft?!* wird ein Thema eröffnet, das üblicherweise im ersten Schuljahr des Chemieunterrichts höchstens als eine von vielen Eigenschaften der Stoffe nur erwähnt und auf das nicht näher eingegangen wird. Jedoch können die Schüler bereits an dieser Stelle durch die dafür vorgesehenen photochemischen Experimente darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Farbe einer Probe von dem absorbierten Licht abhängt und dies keine unveränderliche, charakteristische Eigenschaft ist. Da zudem Farbigkeit aufgrund des Inhaltsfelds 4 *Organische Produkte – Werkstoffe und Farbstoffe* ein für den Chemieunterricht in der Oberstufe relevantes Thema ist, ergibt es durchaus Sinn, auf das Thema bereits in der Sekundarstufe 1 einzugehen, beispielsweise mit passenden photochemischen Schülerversuchen. So ergebe sich für den Lernenden ein Wiedererkennungscharakter, sodass der Zugang in der Oberstufe möglicherweise vereinfacht wäre (s. Kap. 4.1.2, AUSUBEL).

Zur Bearbeitung der Einstiegsaufgaben und des *Teils 1* ist kein chemisches Vorwissen der Schüler notwendig, lediglich für *Teil 2* das Atommodell nach DEMOKRIT [474]. Das Einstiegsexperiment ist ein physikalisches Experiment und dient hier zur Aktualisierung des Wissens aus dem Physikunterricht und zur Sensibilisierung für die Energieform Licht. Durch den Lernertrag daraus können die folgenden beiden Arbeitsteile 1 und 2 von den Schülern bearbeitet werden. Durch die Integration dieser Aufgabe wird zudem bezweckt, dass die Schüler mit dem typischerweise aus dem Physikunterricht bekannten Experiment bzw.

Thema *Licht* hier auch im chemischen Kontext konfrontiert werden und zur Erkenntnis gelangen, dass die Lichtenergie nicht ausschließlich als ein physikalisches Phänomen betrachtet werden kann.

Das **Arbeitsblatt 6** *Solvatochromie* umfasst ein *Einstiegsexperiment* in der Mitte und vier weitere Teilbereiche: *Struktur-Farbigkeit*, *Energiestufenmodell*, *Gleichgewicht* und *Nano-Umgebung*. Falls Lerngruppen gebildet werden, besteht hier die Möglichkeit, dass je vier Schülergruppen das gleiche Thema aus vier unterschiedlichen komplementären Perspektiven betrachten können, d. h. die Schüler würden arbeitsteilig arbeiten und im Anschluss bei der Zusammentragung der Ergebnisse von je einer Gruppe mit einem anderen Erkenntnis-schwerpunkt das Thema aufgreifen und feststellen, dass die „Puzzlestücke“ voneinander abhängen und sich fachwissenschaftlich ergänzen.

Das **Arbeitsblatt 7** zum Thema *Photolumineszenz* hat zwei thematische Schwerpunkte. Zum einen sollen im Einstiegsexperiment fluoreszierende und nicht fluoreszierende Proben experimentell betrachtet, unterschieden und fachwissenschaftlich ausgewertet werden. Zum anderen sollen die Schüler durch die zwei Arbeitsabschnitte *Lumineszenz in Lösung* und *Lumineszenz in Matrix* feststellen, dass mit dem Ausdruck *Photolumineszenz* nicht nur das Phänomen der Fluoreszenz, sondern auch der Phosphoreszenz gemeint ist.

Im Folgenden finden sich die durch den Einsatz und die Bearbeitung der Arbeitsblätter zu fördernden Kompetenzen aus den beiden KLPen der Sekundarstufe 1 und 2.

Arbeitsblatt 1 <i>Farbe – (k)eine charakteristische Stoffeigenschaft?</i>
Schülerinnen und Schüler ...
... beobachten und beschreiben chemische Phänomene und Vorgänge und unterscheiden dabei Beobachtung und Erklärung. (E1)
... führen qualitative und einfache quantitative Experimente und Untersuchungen durch und protokollieren diese. (E4)
... argumentieren fachlich korrekt und folgerichtig. (K1)
... beschreiben, veranschaulichen oder erklären chemische Sachverhalte unter Verwendung der Fachsprache, ggf. mithilfe von Modellen und Darstellungen. (K4)
... beurteilen und bewerten an ausgewählten Beispielen Informationen kritisch auch hinsichtlich ihrer Grenzen und Tragweiten. (B1)
Die Schülerinnen und Schüler haben das Konzept zur Struktur der Materie so weit entwickelt, dass sie ...
... Stoffe aufgrund ihrer Eigenschaften identifizieren (z. B. Farbe, [...]). (UF)
... Stoffe aufgrund ihrer Zusammensetzung und Teilchenstruktur ordnen. (UF)
Arbeitsblatt 6 <i>Solvatochromie</i>
Schülerinnen und Schüler ...
... erklären vergleichend die Struktur und deren Einfluss auf die Farbigkeit ausgewählter organischer Farbstoffe. (E6)
... erläutern aus ausgewählten Reaktionen die Beeinflussung der Gleichgewichtslage. (UF3)
... formulieren für ausgewählte Gleichgewichtsreaktionen das Massenwirkungsgesetz. (UF3)
... interpretieren Gleichgewichtskonstanten in Bezug auf die Gleichgewichtslage. (UF4)

... beschreiben und erläutern den Einfluss eines Katalysators auf die Reaktionsgeschwindigkeit [...]. (UF1, UF3)
... erklären Stoffeigenschaften mit zwischenmolekularen Wechselwirkungen (u. a. Van-der-Waals-Kräfte, Dipol-Dipol-Kräfte, Wasserstoffbrücken). (UF3, UF4)
... generieren mit Bezug auf Theorien, Konzepte, Modelle und Gesetzmäßigkeiten auf deduktive Weise Hypothesen und leiten Verfahren zu ihrer Überprüfung ab. (E3)
... erläutern Zusammenhänge zwischen Lichtabsorption und Farbigkeit fachsprachlich angemessen. (K3)
... beschreiben die Struktur und Bindungsverhältnisse aromatischer Verbindungen mithilfe mesomerer Grenzstrukturen. (E6)
... analysieren Daten / Messwerte qualitativ im Hinblick auf Zusammenhänge, Regeln oder [...] Gesetzmäßigkeiten und verallgemeinern die Ergebnisse. (E5)
Arbeitsblatt 7 Photolumineszenz
Schülerinnen und Schüler ...
... erklären Stoffeigenschaften mit dem Einfluss der jeweiligen funktionellen Gruppen und sagen Stoffeigenschaften vorher. (UF1)
... erklären die Farbigkeit von vorgegebenen Stoffen durch Lichtabsorption und erläutern den Zusammenhang zwischen Farbigkeit und Molekülstruktur. (UF1, E6)
... erklären vergleichend die Struktur und deren Einfluss auf die Farbigkeit ausgewählter organischer Farbstoffe. (E6) (M2)
... erläutern Zusammenhänge zwischen Lichtabsorption und Farbigkeit fachsprachlich angemessen. (K3)
... recherchieren zu chemischen Fragestellungen relevante Informationen in verschiedenen Quellen. (K2)
... verwenden geeignete graphische Darstellung bei der Erläuterung von chemischen Sachverhalten. (K1, K3)

Tab. 35: Die durch den Einsatz der Arbeitsblätter zum Oberthema *Farbigkeit* und *Licht* zu fördernden Kompetenzen nach [20, 317].

4.1.3.2 Arbeitsmaterialien zum Thema *Energiekonversion und -speicherung*

Das Besondere an dem für dieses Oberthema gewählten P(hoto)-B(lue)-B(ottle)-Basisexperiment (s. Kap. 2.3.3.3.5) ist, dass es für den natürlichen Kreislauf Photosynthese / Zellatmung die Funktion eines Modellexperiments übernimmt (s. Kap. 4.1.3.2.1). Das bedeutet, dass der Alltagsbezug des Unterrichts mehr oder minder bereits durch die Art des Experiments impliziert wird. In dem KLP der Sekundarstufe 1 für das Fach Chemie wird der besagte natürliche Kreislauf im Zusammenhang mit der *Energieumwandlung* wie folgt betrachtet:

„Auch Energieerhaltung und Energieentwertung begegnen Schülerinnen und Schülern schon im Anfangsunterricht. Dass z.B. mehr Einstrahlung zu einer größeren Temperaturerhöhung führt, dass das Abbremsen aus höherer Geschwindigkeit die Bremsen heißer macht, dass man durch zu viel Essen an Gewicht zunimmt, bietet naheliegende Zugänge zum Konzept der Erhaltung und Bilanzierung der Energie. Im weiteren Verlauf der Sekundarstufe 1 nutzen Schülerinnen und Schüler

die energetische Betrachtungsweise in verschiedenen Zusammenhängen. Sie erkennen z. B., dass der Ablauf chemischer Reaktionen mit Energieumsätzen verbunden ist. Sie beobachten und beschreiben Energieumwandlungen in der Natur, z. B. bei der Fotosynthese oder bei der Zellatmung, und der Technik.“ [317]

Ein großer und gerade für den naturwissenschaftlichen Unterricht relevanter Nebeneffekt des PBB-Basisexperiments ist, gerade weil es ein Modellexperiment ist, dass dadurch direkt das Modellverständnis gefördert werden kann, welches nach GILBERT, GROSSLIGHT, TREAGUST und anderen „als Schlüsselaspekt eines generellen Wissenschaftsverständnisses gilt“ (nach [475]). Außerdem gehört das *Modellieren* zu einer der übergeordneten Kompetenzerwartungen im Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung.

Das **Arbeitsblatt 2** zum Thema *Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment für Stoff- und Energieumsätze* ist für den Chemieunterricht in der Sekundarstufe 1 entwickelt worden. Dabei werden die Schüler neben der Erkenntnis über Photoprozesse für Modelle und das Modelldenken sensibilisiert. Dieses Lernziel wird erreicht durch ausgewählte Aufgaben wie: ‚Gib Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modellexperiment und dem natürlichen Kreislauf *Photosynthese / Zellatmung* an‘, oder: ‚Beurteile das Modellexperiment, indem du Vor- und Nachteile nennst‘.

Da dieses Thema sowohl in der Unterstufe als auch in der Oberstufe des Biologieunterrichts laut den KLPen obligatorisch ist [147, 148], wäre der Einsatz dieses Experiments auch im Fach Biologie vorstellbar. So wurde dahingehend das **Arbeitsblatt 3 / 4** *Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur* mit zwei zusätzlichen Aufgaben im Hinblick auf die Förderung der *Modellkompetenz* des Lernenden ergänzt (vgl. [476, 477]), sodass sie sowohl im Sinne des Chemie- als auch des Biologieunterrichts sind. In erster Linie geht es dabei darum, dass Schüler die vorhandenen Modelle in ihrer konkreten kontextuellen Funktion soweit nachvollzogen haben, dass sie nun im Anschluss daran anhand dieses verinnerlichteten Wissens die Modelldarstellung zu den Reaktionszyklen des PBB-Modellexperiments ändern bzw. weiterentwickeln (s. Kap. 9.4, AB 3 / 4, Aufgaben A4, B4).

Im Rahmen des **Arbeitsblatts 5** zum Inhaltsfeld *Elektrochemie* führen die Schüler neben dem Experiment i (s. Kap. 4.1.1.1.2, Tab. 34) zusätzlich auch das Experiment k durch. Die PBB-Lösung (s. Kap. 2.3.3.3.5) dient bei der photoelektrochemischen bzw. photogalvanischen Konzentrationszelle als Elektrolytlösung. Analog zu der im Chemieunterricht üblichen Silber-Silber-Konzentrationszelle mit $(\text{Ag}/\text{Ag}^+//\text{Ag}^+/\text{Ag})$ wird in Experiment k die lichtinduzierte Konzentrationszelle mit $(\text{EV}^+/\text{EV}^{++}//\text{EV}^{++}/\text{EV}^+)$ eingesetzt (vgl. Kap. 2.3.3.3.5). Die Schüler können durch diese die Energieumwandlung beobachten. Sie bestrahlen eine der Halbzellen mit blauem Licht, sodass es dadurch zu einem Konzentrationsunterschied der Ethylviologendikationen zwischen den beiden Halbzellen kommt und eine Spannung zu messen ist.

<i>Arbeitsblatt 2 Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment für Stoff- und Energieumsätze</i>
Schülerinnen und Schüler ...
... beobachten und beschreiben chemische Phänomene und Vorgänge und unterscheiden dabei Beobachtung und Erklärung. (E1)
... führen qualitative und einfache quantitative Experimente und Untersuchungen durch und protokollieren diese. (E4)
... argumentieren fachlich korrekt und folgerichtig. (K1)
... beschreiben, veranschaulichen oder erklären chemische Sachverhalte unter Verwendung der Fachsprache, ggf. mithilfe von Modellen und Darstellungen. (K4)
... planen geeignete Untersuchungen und Experimente zur Überprüfung, führen sie unter Beachtung von Sicherheitsaspekten durch und werten Sie unter Rückbezug auf Hypothesen aus. (E7)
... stellen Zusammenhänge zwischen chemischen Sachverhalten und Alltagserscheinungen her und grenzen Alltagsbegriffe von Fachbegriffen ab. (E9)
... veranschaulichen Daten angemessen mit bildlichen Gestaltungsmitteln. (K6)
... nutzen Modelle und beurteilen die Anwendbarkeit eines Modells. (B7, B8)
Die Schülerinnen und Schüler haben das Konzept zur Struktur der Materie so weit entwickelt, dass sie ...
... Verbrennungen als Reaktionen mit Sauerstoff (Oxidation) deuten, bei denen Energie freigesetzt wird. (UF)
... Stoffumwandlungen in Verbindung mit Energieumsätzen als chemische Reaktion deuten. (UF)
... Energie gezielt einsetzen. (UF)
... erläutern, dass zur Auslösung einiger chemischer Reaktionen Aktivierungsenergie nötig ist. (UF)
... konkrete Beispiele von Oxidationen (Reaktionen mit Sauerstoff) und Reduktionen als wichtige chemische Reaktionen benennen. (UF)
<i>Arbeitsblatt 3/4 Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur</i>
Schülerinnen und Schüler ...
... führen Experimente zielbezogen unter Beachtung fachlicher Qualitätskriterien einschließlich der Sicherheitsvorschriften durch. (E4)
... entwickeln Experimente zur Überprüfung von Hypothesen. (E3)
... zeigen Grenzen von Modellen auf. (UF)
... wenden ein Modell auf einen konkreten Sachverhalt an. (UF)
... interpretieren ein Energie-Reaktionsdiagramm. (E5, K3)
... modifizieren und reorganisieren bestehendes Wissen aufgrund neuer chemischer Erfahrungen und Erkenntnisse. (UF4)
... planen unter Beachtung von Sicherheitsvorschriften zielgerichtet einfache Experimente und führen sie durch. (E4)
<i>Arbeitsblatt 5 Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zur Energieumwandlung und –speicherung in einer lichtgetriebenen Konzentrationszelle</i>
Schülerinnen und Schüler ...
... entwickeln Experimente zur Überprüfung von Hypothesen. (E3)
... führen Experimente zielbezogen unter Beachtung fachlicher Qualitätskriterien einschließlich der Sicherheitsvorschriften durch. (E4)
... wenden ein Modell auf einen konkreten Sachverhalt an. (UF)
... interpretieren ein Energie-Reaktionsdiagramm. (E5, K3)
... modifizieren und reorganisieren bestehendes Wissen aufgrund neuer chemischer Erfahrungen und Erkenntnisse. (UF4)

... können unter Beachtung von Sicherheitsvorschriften einfache Experimente zielgerichtet planen und durchführen. (E4)
... berechnen Potentialdifferenzen unter Nutzung der Standardelektrodenpotentiale und schließen auf die möglichen Redoxreaktionen. (UF2, UF3)
... erläutern die Umwandlung von [Lichtenergie] [...] in elektrische Energie und deren Umkehrung. (E6)
... stellen Oxidation und Reduktion als Teilreaktionen und die Redoxreaktion als Gesamtreaktion übersichtlich dar und beschreiben und erläutern die Reaktionen fachsprachlich korrekt. (K3)
... diskutieren die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung der Gewinnung, Speicherung und Nutzung elektrischer Energie in der Chemie. (B4)
... zeigen Grenzen von Modellen auf. (UF)

Tab. 36: Die durch den Einsatz der Arbeitsblätter zum Oberthema *Energiekonversion und -speicherung* zu fördernden Kompetenzen nach [20, 317].

4.1.3.2.1 Modellexperimente

„Indeed, modelling – the production and revision of models – has been seen as the essence of the dynamic and non-linear processes involved in the development of scientific knowledge.“ [478]

— R. S. JUSTI & J. K. GILBERT

Nach der folgenden Definition und Ausführung ist das PBB-Basisexperiment mit all den Analogien (s. Kap. 2.3.3.3.5), aber auch Unterschieden (s. Tab. 37) zum natürlichen Kreislauf *Photosynthese / Zellatmung* ein Modell:

„Ein Modell ist allgemein eine strukturierte Menge, die Elemente und Strukturen eines Originals teilweise abbildet. [...] Aus der oben angenommenen Definition des Modellbegriffs folgt zwingend, dass jedes Modell gleichzeitig unwahr und falsch ist. Die Güte eines Modells ist daran zu messen, inwiefern es dem, der damit umgeht, die Möglichkeit gibt, das Original zu erklären und für eine beschränkte Zahl potenzieller Eigenschaften des Originals wahre Voraussagen zu treffen.“ [479]

Dass das Photo-Blue-Bottle-Basisexperiment zudem als ein *Modellexperiment* identifiziert wird, zeigt sich unter anderem durch die Erfüllung der bei allen Modellexperimenten geltenden drei Kriterien nach SOMMER et al. [480, 481]: So muss es sich um ein *Experiment* handeln, das über einen *organären Zielbereich* verfügt, und dabei darf das Original *nicht das Objekt im Modellexperiment* selbst sein. Das Original muss also materiell modelliert werden. Diese drei Kriterien werden vom PBB-Basisexperiment erfüllt, da der Bezug zum *Experiment*, zum *Original* und zum *Modell* vorliegen. Anhand des Vergleichs des PBB-Modellexperiments mit der Wirklichkeit bzw. dem Original wird diese Feststellung bestätigt (s. Tab. 35; vgl. Kap. 2.3.3.3.5).

Modellexperiment Photo-Blue-Bottle	Natur Photosynthese / Zellatmung
Analogien	
Stoffkreisläufe	
<ul style="list-style-type: none"> Ethylviologen-Kreislauf ($EV^{2+} \rightarrow EV^+ \rightarrow EV^{2+}$) Kreislauf des zyklisch arbeitenden Photokatalysators Proflavin PF^+ 	<ul style="list-style-type: none"> Kreislauf der Kohlenstoffatome ($CO_2 \rightarrow C_m(H_2O)_n \rightarrow CO_2$) Kreisläufe der zyklisch arbeitenden Photokatalysatoren (Chlorophylle u. a.)
Energieumwandlung	
<ul style="list-style-type: none"> Lichtenergie wird in chemische umgewandelt, gespeichert und als andere Energieform verfügbar. Für die Lichtreaktion ist ein farbiger Photokatalysator (Proflavin) nötig. Die Reaktionen laufen in wässriger Lösung und an der Phasengrenze flüssig-gasförmig ab. 	<ul style="list-style-type: none"> Lichtenergie wird chemisch umgewandelt, gespeichert und in anderer Energieform verfügbar. Für die Photosynthese sind farbige Photokatalysatoren (Chlorophylle u. a.) notwendig. Die Reaktionen laufen in wässriger Lösung und an Membranoberflächen ab.
Reaktionstypen	
<ul style="list-style-type: none"> Der Kreislauf des Ethylviologens setzt sich aus einer endergonischen Reduktion ($\Delta G > 0$) und einer exergonischen Oxidation ($\Delta G < 0$) mit Sauerstoff zusammen. Der Kreislauf beginnt mit der Absorption von (blauem und violetter) Licht. Der Lichtabsorption folgt eine Elektronenübertragung. 	<ul style="list-style-type: none"> Der Kreislauf des Kohlenstoffs setzt sich aus einer endergonischen Reduktion ($\Delta G > 0$) und einer exergonischen Oxidation ($\Delta G < 0$) mit Sauerstoff zusammen. Der Kreislauf beginnt mit der Absorption von (blauem und rotem) Licht. Nach der Lichtabsorption folgen Elektronenübertragungen.
Unterschiede	
<ul style="list-style-type: none"> Durch die Bestrahlung der PBB-Lösung entsteht kein Sauerstoff, wie bei der Photosynthese es der Fall ist. Bei den Reaktionszyklen der PBB-Lösung werden außer dem Sauerstoff andere Stoffe benötigt, als in der Natur es der Fall ist. Bei dem natürlichen Kreislauf laufen mehr chemische Reaktionen ab, als von den Reaktionszyklen des PBB-Modellexperiments überhaupt modelliert werden können. Die beim PBB-Experiment gebildete reduzierte Spezies ist nicht als energetischer Langzeitspeicher verwertbar im Gegensatz zur Glucose (vgl. [482]). Die chemischen Phänomene im Modellexperiment finden im geschlossenen System statt (in einem 4 mL fassenden Schraubdeckelglas), wohingegen sowohl die Photosynthese als auch die Zellatmung in einem offenen System ablaufen. 	

Tab. 37: Vergleich Modellexperiment – Original. Die tabellarische Auflistung der Analogien wurden nach der Literatur [251, 472] dargestellt.

„Den Umgang mit Modellvorstellungen und Modellen zu lehren, ist zweifellos eine der zentralen Aufgaben des Chemieunterrichts. ‚Chemie lernen‘ bedeutet somit chemische Modellbildung und Modellanwendung durch die Lernenden“ [483]. Jedoch zeigen wissenschaftliche Befunde, dass sowohl bei Schülern als auch bei Lehrern Mangel an Modellwissen bzw. Modellverständnis herrscht. Einer Studie von VAN DRIEL und VERLOP zufolge erwies sich

das inhaltliche Wissen der Lehrer über Modelle und Modellierung als begrenzt und enthält Inkonsistenzen [484]. Oft sehen Schüler Modelle als eine "exact copy of reality" [475, 484, 485]. So erfolgt auch keine „Spezifizierung von Modellen als prozessbegleitende Instrumente originärer Erkenntnisprozesse“ [475]. Dass Modelle veränderbar sind oder verworfen werden können, ist den Schülern häufig nicht klar. Folglich sollten über Modelle eingeübte fachwissenschaftliche Konzepte zwangsläufig bei dem einen oder anderen Schüler zu einem erschwerten Konzeptwechsel führen, wenn dieser mit dem Ersetzen des gegenwärtigen Modells durch ein (für den Schüler) neues Modell einhergeht:

„In der Mittelstufe der allgemeinbildenden Schulen müssen die Schülerinnen und Schüler eine Reihe von Atommodellvorstellungen im Chemieunterricht kennenlernen. Aus eigenen Erfahrungen und denen von Kolleginnen und Kollegen führt die Behandlung der geschichtlichen Modellentwicklung häufig zu der Frage ‚Was ist denn jetzt das richtige Modell?‘ oder ‚Warum haben Sie uns nicht sofort gesagt, dass das das richtige Modell ist?‘ Die Fragen selbst bzw. der Begriff richtiges Modell verdeutlichen, dass die Schülerinnen und Schüler sich über die Funktion und Bedeutung von Modellen überhaupt nicht bewusst sind. Sie vollziehen im günstigen Fall die geschichtliche Entwicklung der Atommodellvorstellungen nach, verstehen aber selten den Grund für die Veränderung der Modelle oder warum man überhaupt Modelle verwendet. Bei einer Befragung von Schülerinnen und Schülern der 12. Klasse eines Gymnasiums nach Eigenschaften und Funktion (Bedeutung) von Modellen verfügten sie praktisch über keine Kenntnisse und Vorstellungen.“ [486]

Das Modellverständnis ist dabei so naiv, dass die Schüler nicht bedenken oder sich nicht vorstellen können, dass der Modellierer über den Modellierungsprozess entscheidet und er diesen somit beeinflusst [475]. Für Schüler sind Modelle ein Medium und weniger ein Mittel zur Erkenntnisgewinnung [476].

„Im Zuge der stärkeren Fokussierung auf prozedurale Kompetenzen hat das Verständnis für Modellarbeit als Arbeitsweise stärkere Beachtung gefunden und wird entsprechend in den nationalen Bildungsstandards im Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung ausgewiesen.“ [475]

Nach JUSTI und GILBERT sehen auch Lehrpersonen den Bedarf an Modellarbeit im naturwissenschaftlichen Unterricht [478]. Schüler könnten dabei auf drei unterschiedlichen Levels über die *Bildung, Natur* und *Nutzung von Modellen* denken, so GILBERT und BOULTER:

„At Level 1, models were thought of as either toys or copies of reality which could be incomplete because the producer of them wished it to be so. At Level 2, models of reality being omitted, suppressed or enhanced. The emphasis is still on reality and its modelling rather than

in the ideas portrayed. At Level 3, a model is seen as being constructed to service and develop ideas, rather than being a copy of and testing it in order to develop ideas, rather than being a copy of reality. The modeller plays an active role in the modelling process, manipulating and testing it in order to develop ideas. Although there was a drift from Level 1 to Level 2 with increasing age in the sample, no school student demonstrated a Level 3 appreciation of models, which is the exclusive province of the 'experts'." [487]

Werden Modelle eingesetzt, so werden oft deren Grenzen nicht explizit thematisiert und herausgearbeitet [478]. So bietet das Modellexperiment *Photo-Blue-Bottle* neben der Tatsache, dass Schüler gerne experimentieren (4.1.1.1.1), den Lehrern die Möglichkeit an, daran die im Unterricht fehlende Umsetzung der Förderung der Modellkompetenzen auszugleichen. Durch den direkten Vergleich des Modells und des Originals anhand der Abbildungen auf den Arbeitsblättern (s. Kap. 9.4, AB 2, AB 3 / 4, AB 5) und den zugehörigen Aufgaben zum Modellverständnis erleben die Schüler unabhängig von der „Behandlung der geschichtlichen Modellentwicklung“ [486] (s.o.) hier eine andere Art des Zugangs zu Modellen. Sie lernen, dass Modelle bewertet werden, sowohl Vorteile als auch Nachteile haben können, und dass eine eindeutige Diskrepanz zwischen dem Modell und dem Original vorliegt.

Zudem konnte durch eine Recherche in den Schulbüchern aus Tab. 22 in Kapitel 3.3.1 festgestellt werden, dass mit Ausnahme des Schulbuches *Chemie 2000+* für die Einführungsphase in keinem weiteren Schulbuch ein Modellexperiment mit dem entsprechend Kontext *natürlicher Kohlenstoffkreislauf* aufgefunden werden konnte. D.h., dass mit diesem Modellexperiment somit auch eine Lücke gefüllt bzw. ein Bedarf abgedeckt wäre und es mindestens eine doppelte Bereicherung wäre: Zum einen ist es ein Modellexperiment zu einem Thema, zu dem bis dato kein weiteres Modellexperiment in den aktuellen Schulbüchern zu finden ist, und zum anderen ist es ein Modell, mit welchem die Lehrenden dadurch entsprechend den KLP-Anforderungen dies zum Thema machen könnten.

5 Hauptuntersuchung

„Radikale Innovationen haben in der Bildung kaum eine Chance.“ [38]

— G. REINMANN

Im Sinne von REINMANN wird hier gegen eine von PARCHMANN und FREIENBERG so bezeichnete „Verordnung von oben“ plädiert, die beispielsweise durch eine direkte Implementierung photochemischer Inhalte über die Kernlehrpläne in den Chemieunterricht hätte verlangt werden können. Denn diese „Vorgehensweise einer ‚Verordnung von oben‘ [...] [hat] sich schon in zahlreichen früheren Projekten [u.a. aus didaktischen Forschungen] nicht bewährt“ [340]. Dass die Hauptakteure der Schule, die Schüler und Lehrer, in einem möglichen Vorhaben einer Innovationsumsetzung nicht "übergangen" werden sollten, ist selbstverständlich. TAUSCH argumentiert wie folgt:

„Bei allen Differenzen zwischen den Vertretern der deutschen Chemiedidaktik betreffend Inhalte, Methoden und Bedeutung fachdidaktischer Forschung für die Unterrichtspraxis [ist man sich] in [...] [folgendem Punkt] einig: In der Forschung, die den Unterricht betrifft, müssen Lehrerinnen und Lehrer beteiligt sein und zwar als gleichwertige Partner. In der Tat agieren die Lehrer und Lehrerinnen **an der Basis des pädagogischen Alltags, kennen dessen Höhen und Tiefen aus eigener Erfahrung und wissen am besten, was ‚geht‘ und was nicht ‚geht‘**. Gerade in der curricularen Innovationsforschung ist eine Zusammenarbeit zwischen Schule und Hochschule unverzichtbar. Von der Problemfindung (Themen für die curriculare Innovation) über die Entwicklung und Optimierung von Lösungen (Experimente, Materialien, Evaluierung) bis zu deren Einbindung in einen Lehrgang (gedrucktes und / oder elektronisches Lehrbuch) sind nicht nur die Ideen und Vorlieben der Damen und Herren von der Uni gefragt, **sondern [viel eher] auch die Probleme, Fragen und Interessen der Lehrer/-innen und der Schüler/-innen**. Die Initialzündung für ein Forschungsvorhaben betreffend die curriculare Innovation kann aus der Uni oder aus der Schule kommen. **Bei der Durchführung des Forschungsvorhabens sollten aber in jedem Fall beide Seiten beteiligt sein.**“ [55]

Mit anderen Worten beschreibt hier TAUSCH die Voraussetzungen bzw. die Vorstufe zur erfolgreichen und effektiven Implementation von innovativen Themen in den Chemieunterricht (vgl. Kap. 2.1.2). Tatsächlich liegen jedoch bislang keine veröffentlichten Untersuchungen aus der Grundlagenforschung in dem hier vorliegenden Umfang zur potenziellen Integration von photochemischen Inhalten in den Chemieunterricht vor, sodass ein explorativer Ansatz, eine große Stichprobe, verbunden mit einer hohen Anzahl an teilnehmenden Schulen, und eine beachtliche Bandbreite an unterschiedlichen Experimenten (s. Kap. 4.1.1.1.2) zur Umsetzung der Untersuchung gewählt

wurde. So ergeben sich für die Zukunft an verschiedenen Stellen der Arbeit Möglichkeiten zur Anknüpfung und Vertiefung.

Nun gibt es unterschiedliche Wege, mit Lehrenden und auch Lernenden zu kooperieren. Eine Möglichkeit, Lehrer und indirekt über diese auch die Schüler zu erreichen, wären Workshops. Diese bieten den Lehrern die Möglichkeit, inhaltliche oder methodische Innovationen für den Chemieunterricht zu testen und intendieren zudem selbstverständlich deren Verbreitung. Auch die auf Basis dieser Neuheiten entwickelten Experimentiersets oder -koffer erfüllen dieselbe Funktion [488]. Sie werden jedoch oft „im Zusammenhang mit Projekttagen oder -wochen eingesetzt, innerhalb derer mehr Zeit am Stück für die experimentelle Auseinandersetzung [...] zur Verfügung steht“ [22, 398]. Im entscheidenden Unterschied zum Angebot von Workshops und Experimentierkoffern sollte mit dem Testen der photochemischen Experimente direkt vor Ort an den Schulen – in den räumlichen Umgebungen, die den teilnehmenden Probanden bekannt sind – zum einen gezeigt werden, dass die Experimente praktisch im Unterricht umgesetzt werden können und zum anderen sollten zur Innovationsumsetzung viel authentischere Rückmeldungen der Probanden unmittelbar nach den Interventionen unter diesen Bedingungen eingeholt werden können.

Ein weiteres übliches Vorgehen wäre gewesen, die Studie unter Laborbedingungen in den universitären Schülerlaboren durchzuführen. Jedoch ist der Besuch von diesen nach KLEES und TILLMANN durch folgenden Gedanken der Lehrer bereits vorbelastet: „Lehrende sehen Schülerlaborbesuche in erster Linie als ein Zusatzangebot zu ihrem schulischen Unterricht an, das die Unterrichtsinhalte nicht ersetzen, sondern erweitern und ergänzen [soll]“ [53]. Die Rückmeldungen der Lehrer und Schüler ließen sich aufgrund der Künstlichkeit der Laborsituation nicht ausreichend gut für den typischen Chemieunterricht generalisieren [72]. Deshalb sollte die Untersuchung im *pädagogischen Alltag* [55] stattfinden (s. o.), d. h. direkt im natürlichen Schulkontext, obwohl dadurch selbstverständlich weitere *untersuchungsbedingte Störfaktoren* [72] entstehen, wie der Lehrereffekt, schwer vergleichbare Bedingungen in den Chemieräumen der Schulen oder unterschiedliche Tageszeiten der Unterrichtsstunden. Dadurch lässt sich jedoch für jeden Lehrer und Schüler viel eher identifizieren, ob der Einsatz photochemischer Experimente bzw. die Integration photochemischer Inhalte unter den im eigenen Unterricht vorhandenen *Höhen und Tiefen* [55] (s. o.) realisierbar ist. Da ist die Realisierung außerhalb des eigenen Chemieraums in diesem Zusammenhang nicht aussagekräftig und weniger interessant im Hinblick auf das Ziel der vorliegenden Untersuchungen (s. Kap. 1.1; Kap. 5.1). Letztendlich wurde mit den konzipierten Materialien hauptsächlich auf die Einbindung photochemischer Experimente in den normal ablaufenden Chemieunterricht gezielt, statt in besondere Schultage oder Schülerlabore der Universitäten.¹⁴⁴

¹⁴⁴ An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass der Forscher nicht die Absicht hat, die Bedeutung der Schülerlabore als externes Schulangebot zu entwerfen, denn auch diese dienen Diffusionszwecken (s. Kap. 2.1.2) und haben für Schulen, die beispielsweise keine entsprechenden Materialien in der Schulsammlung haben, ein unterstützendes Angebot. In der vorliegenden Arbeit wird lediglich intendiert, aufzuzeigen, inwieweit photochemische Inhalte auch direkt in den Chemieunterricht in der Schule integriert werden könnten.

Das vorliegende Kapitel legt das Kernstück der Arbeit dar. Nach Erkundung der Theorie (s. Kap. 2), den zum größten Teil praktischen Voruntersuchungen (s. Kap. 3) und der Entwicklung der Arbeitsmaterialien (s. Kap. 4) wird nun die Umsetzung der Forderung von TAUSCH [55] (s.o.) präsentiert. Vor der Hauptstudie (s. Kap. 5.4) wurden die entwickelten Forschungsmethoden, Arbeitsblätter und weitere Materialien exemplarisch im kleinen Rahmen einer Pilotstudie (s. Kap. 5.3) getestet und teilweise optimiert.

5.1 Zielsetzung und Forschungsfragen

Aufgrund der für die tatsächliche Umsetzung und die Akzeptanz einer Bildungsinnovation im Schulwesen benötigte Zeit von 15 bis 50 Jahren [489] war die Erfassung der curricularen Implementation von photochemischen Inhalten in den Chemieunterricht bis hin zur letzten Phase der Institutionalisierung (s. Kap. 2.1.2) im Rahmen dieser Studie unrealistisch. GOLDENBERG begründet ihr Vorgehen bei *der empirischen Untersuchung zur Implementation eines sozialen Lernprogramms* aus demselben oben aufgeführten Grund wie folgt:

„[...] [V]or diesem Hintergrund wird in dieser empirischen Arbeit ein engerer Implementationsbegriff angelegt, der sich auf die Umsetzung von Innovationen konzentriert und Kennzeichen einer Institutionalisierung als Implementationsergebnis versteht [...]. Damit wird Implementation hier [nach KLEIN und SORRA [490]] verstanden als ‚the critical gateway between the decision to adopt the innovation and the routine use of the innovation‘“[41].

In Anlehnung daran wurde mit der Hauptuntersuchung, welche wohlgermerkt im Rahmen einer in erster Linie lediglich grundlagenforschenden Arbeit durchgeführt wurde, im Hintergrund das methodisch-strategische Ziel verfolgt, die Meinungen der beiden Hauptakteure von Schule – der Schüler und Lehrer – zu photochemischen Inhalten einzuholen. Wie kommen photochemische Inhalte und Experimente bei Schülern und Lehrern an?

Das inhaltliche Ziel war es, durch die Rückmeldungen der Lernenden und der Lehrenden Indikatoren¹⁴⁵ dafür zu sammeln, die, wenn man sie bündelt, ein Gesamtbild ergeben und in dem im Idealfall zu sehen sein sollte, ob Potenzial für den Erfolg der Integration photochemischer Inhalte in den

¹⁴⁵ Im Zusammenhang mit Personen wird in der Wirtschaft der Ausdruck *Potenzialindikator* verwendet: „Potenzialindikatoren sind [...] häufig Kompetenzen, die stabil und schlecht trainierbar sind und darüber hinaus die Grundlage für eine Weiterentwicklung der Person bieten“. „Potenzialeinschätzung [von z. B. Mitarbeitern] für anstehende Aufgaben und gegebenenfalls weiterführende Verantwortungsebenen [werden] durch die Beschreibung von Potenzialindikatoren unterstützt, um einen unternehmensweit möglichst ähnlichen Einschätzungsgrad zu gewährleisten“ [491]. In Anlehnung daran wird an dieser Stelle der Ausdruck Potenzialindikator im Sinne von TAUSCH wie folgt betrachtet: „Die *Potenzialindikatoren* konkretisieren jene Merkmale der Innovation, die sie beim Vergleich mit der aktuellen Praxis als erfolgsversprechenden Fortschritt kennzeichnen“ [338].

Chemieunterricht besteht. Daher wurden in Anlehnung an COBURN bereits in Kapitel 2.1.2 vier Erfolgsindikatoren der Implementation von Innovation deklariert (vgl. Kap. 5.2.3). Abgeleitet davon wurden die folgenden, dem Ziel untergeordneten Forschungsfragen¹⁴⁶, welche durch die Hauptuntersuchung beantwortet und zusätzlich zur Strukturierung der Ergebnisse vorgesehen wurden (vgl. Kap. 5.4.1):

- **F.1.** Zeigt sich eine individuelle Akzeptanz photochemischer Inhalte und die Verinnerlichung von neuem Wissen darüber? (Identifikation)
- **F.2.** Welches Ausmaß der Veränderung durch photochemische Experimente kann den Rückmeldungen der Schüler und Lehrer entnommen werden? (Tiefe)
- **F.3.** Ist potenzielle Nachhaltigkeit in der praktischen Umsetzung der Integration photochemischer Inhalte zu erkennen? (Nachhaltigkeit)
- **F.4.** Ist anhand der Rückmeldungen der Lehrer eine Befürwortung der Verbreitung der photochemischen Experimente zu erkennen? (Quantitative Verbreitung)

Zur möglichen Problembehandlung bzw. -behebung und um den realen Bedarf und die Realisierbarkeit der Integration photochemischer Experimente in den CU zu klären, dienen zusätzlich folgende Forschungsfragen als zentrale Leitfragen. Diese sollen mit Blick auf das Ziel der Arbeit (s. Kap. 1.1) einhergehend mit der sukzessiven Beantwortung der vier Forschungsfragen implizit beantwortet werden:

- Welche Schwierigkeiten bzw. Nachteile der Integration photochemischer Experimente in den Chemieunterricht lassen sich aus den Rückmeldungen der Lehrer erkennen?
- Anhand welcher Indikatoren aus den Rückmeldungen der Lehrer und Schüler lässt sich eine erfolgreiche Integration photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht prognostizieren?

5.2 Planung der Untersuchung

5.2.1 Untersuchungsdesign

Da das Design sich nicht an dem einer bereits durchgeführten Studie orientiert, handelt es sich hier um eine *Originalstudie* und um keine *Replikationsstudie* [72]. Vor allem mussten die Daten dieser empirischen Studie auf einer *Primäranalyse* [72] basieren, da bisher keine Grundlagenforschung zu dem vorliegenden Thema betrieben wurde und somit keine gesicherten Erkenntnisse existierten.

¹⁴⁶ Diese Forschungsfragen dienen lediglich zur sinnvollen Verknüpfung der mit Blick auf die schon durch die umfangreichen Forschungsschritte zu den Grundlagen und den Voruntersuchungen eingeschränkten Zeit durchaus großen Datenmenge. Außerdem sollten dadurch dem Leser eine transparente Strukturierung der entstandenen Ergebnisse gegeben werden. Diese sind hinsichtlich ihrer Generierung nicht (!) zu vergleichen mit Forschungsfragen explanativer Untersuchungen.

Die Untersuchung besteht aus zwei Teilbereichen: Zuerst wurde in *Pilotstudien* (s. Kap. 5.3) mit den ausgewählten Forschungsmethoden, den entwickelten Forschungsinstrumenten und Arbeitsmaterialien gearbeitet, um diese anschließend zu optimieren und so potenziellen Störfaktoren oder Problematiken in weiteren Anwendungen vorzubeugen. Im Anschluss daran konnte die *Hauptstudie* (s. Kap. 5.4) gestartet werden.

Die Hauptstudie ist in Anlehnung an den Vorschlag zur linearen Forschungsstrategie nach LAMNEK [69] aufgebaut, da diese im Hinblick auf die Organisation der Umsetzung der Gesamtstudie (s. Kap. 5.4.2) und die Durchführungen der Einzelstudien an den zahlreichen Schulen sich als dafür geeigneter erwies als beispielsweise die *zirkuläre Logik* [492] (s. Abb. 71). Sie „[fand] im natürlichen Umfeld statt, so dass die Untersuchungsbedingungen den Alltagsbedingungen ähnel[ten] und auf diese möglichst gut übertragbar [waren]“ [72] (vgl. Kap. 5). Studien, bei denen sich die Forscher „in die natürliche Lebensumwelt ihrer Forschungsobjekte [begeben], um sie dort zu studieren“ [373], sind *Feldstudien* wie auch in diesem Fall. Der Grund der Entscheidung für die Schulen als Untersuchungsort ist sehr plausibel:

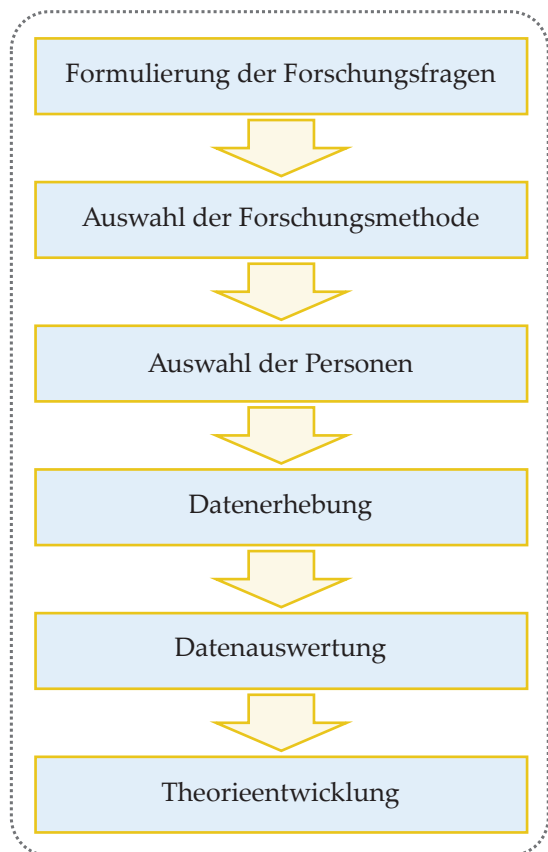


Abb. 71: Lineare Forschungsstrategie der Hauptstudie [492].

„[Z]u heftig sind Kritik und Enttäuschung seitens der Lehrenden in Schule, Hochschule und Weiterbildung, wenn man sie nach dem praktischen Nutzen der Lehr-, Lern- und Bildungsforschung fragt. [...] Menschen in der Praxis stellen – logischerweise – den Anspruch, dass man ihnen hilft, ihre Probleme zu lösen, und das sind Probleme vor Ort, bei denen lokale und personale Handlungsbedingungen berücksichtigt werden müssen; Menschen in der Praxis fordern ein, dass man mit ihnen kommuniziert und zusammenarbeitet; sie wollen Anregungen und Empfehlungen für die Praxis, auch wenn diese noch keinen unumstößlichen Wirkungsnachweis erbracht haben [...]. Mit den Ansprüchen der Scientific Community ist all dies definitiv nicht vereinbar.“ [493]

Aufgrund des Gesamtstichprobenumfangs (s. Kap. 5.2.2), welcher durch vorhandene Ressourcen (Personal, Zeit) zu bewältigen sein musste, weiterer Vorteile wie des geringen Schulungs-, Material- und Zeitaufwands oder der

hohen Durchführungsobjektivität [494] wurde die *schriftliche Befragungsmethode* mit dem Modus der *Paper-Pencil-Erhebungsvariante* gewählt [73]. Eingesetzt wurden dabei zum einen ein Feedback-Fragebogen sowohl für die Schüler als auch für die Lehrer, und zum anderen ein Lernstandserhebungsbogen, welcher nur für die Schüler gedacht war. Letzterer wurde vor und nach der Intervention bzw. des Unterrichts zum Ausfüllen den Schülern ausgeteilt. D. h.: Zur Überprüfung individueller Veränderungen des Wissensstands der Schüler wurde eine *Prä-Post-Messung* durchgeführt [72]. Der Feedbackbogen wurde ohne Messwiederholung einmalig nach der Intervention von den Probanden ausgefüllt. Später wurde die Studie um eine Follow-up-Messung ergänzt [72]: Nachdem alle teilnehmenden Lehrpersonen ihre geplanten Einzelstudien mit ihren Schülergruppen durchgeführt hatten, wurde ihre endgültige Meinung zur Einbindung photochemischer Inhalte in den eigenen Chemieunterricht eingeholt.

5.2.2 Stichprobenkonstruktion

Da eine randomisierte Zuweisung der Personen zu den Treatment-Gruppen die Bedingungen im Feld zu sehr gestört hätte und forschungsethisch nicht möglich gewesen wäre [72], erfolgte dies nicht, sodass mit vorgefundenen, d. h. mit nicht-randomisiert gebildeten Schülergruppen gearbeitet wurde.

Mit insgesamt 5 Treatment-Gruppen nahmen an der Pilotstudie $n = 50$ Probanden (s. Kap. 5.3) und an der Hauptstudie insgesamt $n = 30$ Lehrpersonen mit einer gesamten Schülergruppenanzahl von 53 teil. Im Unterschied zur Pilotstudie wurde bei der Hauptstudie die Stichprobenziehung durch *Selbstaktivierung* im Sinne von REINDERS [495] realisiert. Das bedeutet, dass jede der teilnehmenden Lehrpersonen sich selbst zur freiwilligen Teilnahme an der Studie bereit erklärt hatte (s. Kap. 5.4). Dafür wurden die entsprechenden Schulen lediglich postalisch über das Angebot zur Teilnahme informiert (s. Kap. 5.4.2.1). Da nach der offiziellen Beendigung der Studie einige der Lehrpersonen in weiteren Chemiekursen bzw. -klassen die Materialien getestet haben, aber dafür aus Gründen der begrenzten zeitlichen Ressourcen des Autors das Einreichen der Feedback-Bögen und Selbsteinschätzungsbögen der Schüler nicht mehr relevant war, konnten insgesamt die Feedbackbögen von 36 der 53 Schülergruppen bei der Auswertung berücksichtigt werden. Auch in diversen, vom Autor mitbetreuten, Workshops zu photochemischen Inhalten wurden Lehrpersonen befragt (vgl. Kap. 9.7.2). Aus mangelnder Kongruenz sind diese

Studie	Forschungsmethode	Ort	Probandengruppe
Pilotstudie	Schriftliche Befragung	Universität	5 Treatment-Gruppen; $n = 50$ (15 Schüler; 35 Lehramtsstudierende)
Hauptstudie	Schriftliche Befragung	Schulen	$n = 30$ Lehrpersonen
Hauptstudie	Schriftliche Befragung	Schulen	$n = 478$ Schüler

Tab. 38: Die Anzahlen der Probanden, die an der Hauptuntersuchung teilgenommen haben.

Daten im Folgenden bei der Auswertung nicht berücksichtigt worden. So betrug der Stichprobenumfang der Schüler-Probanden $n = 478$. Zur Übersicht befinden sich die Anzahlen in der Tab. 38.

Alle Orte der Schulen, die an dieser NRW-weiten Studie teilnahmen, sind in der folgenden NRW-Karte in Abb. 72 grün hinterlegt (vgl. Kap. 5.4.2.1), wobei in einigen der Städte mehrere Schulen daran teilnahmen. Dabei sind die Schulen insgesamt im Hinblick auf ihren *Standorttyp* heterogen gemischt [496], sodass dadurch eine ausgewogene soziodemographische Verteilung innerhalb des Stichprobenumfangs erreicht wurde.

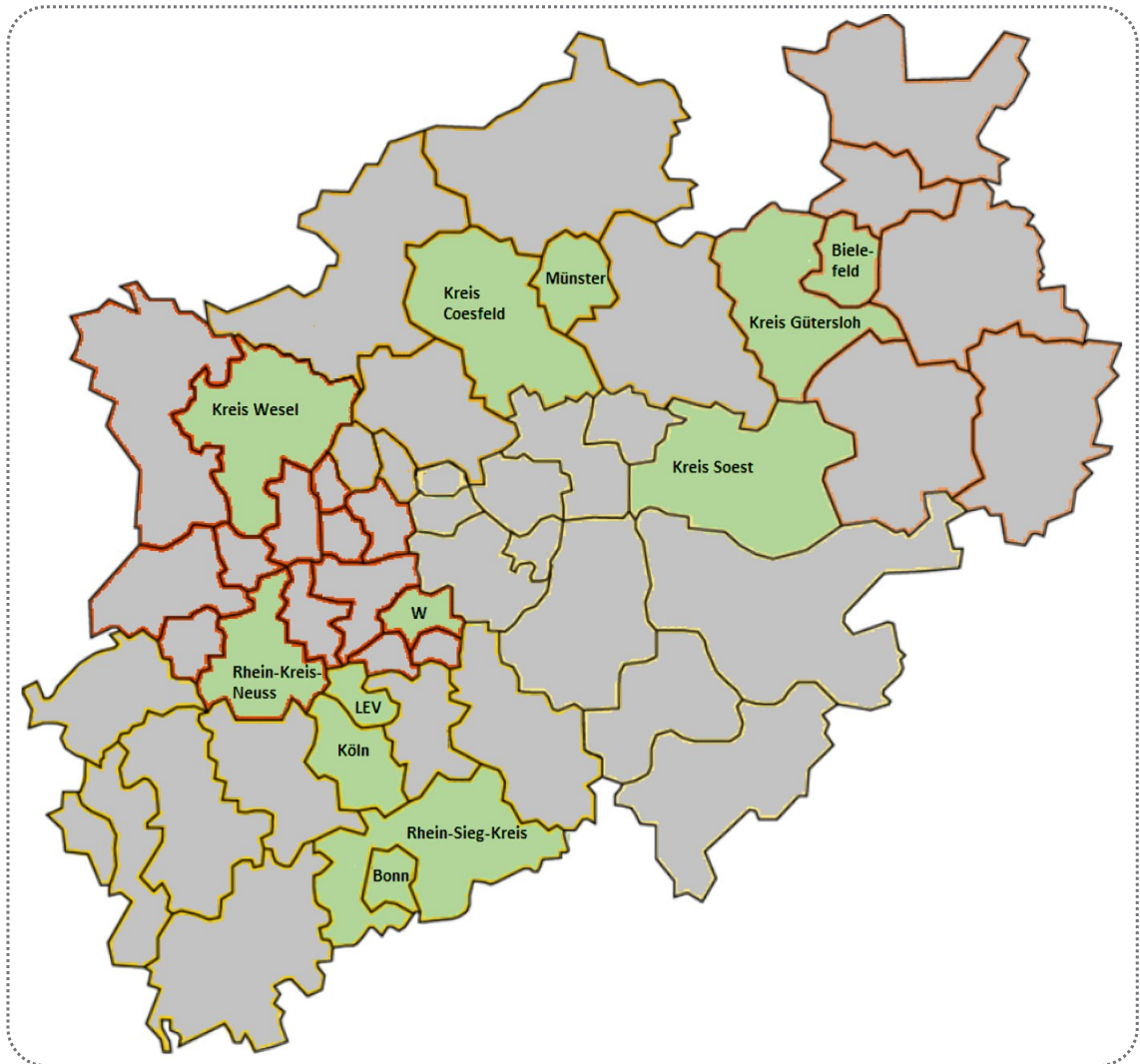


Abb. 72: Kreise der Schulen, die an der Feldstudie teilnahmen (grün hinterlegt) (Quelle der Landkarte [497]).

Die in Tabelle 39 aufgelisteten Schulen nahmen an der Hauptstudie teil. Die davon grün markierten Schulnummern weisen auf die Schulen hin, an denen entweder einige oder alle Einzelstudien von dem Autor selbst durchgeführt wurden. Insgesamt 19 der 36 zur Evaluation berücksichtigten Treatment-Gruppen betreute der Forscher¹⁴⁷ selbst.

¹⁴⁷ Für den Autor wird an den entsprechenden Stellen der Ausdruck *Forscher* verwendet.

Nr.	Name der Schule	Stadt
1	Europa Schule Bornheim	Bornheim
2	Gymnasium Wolbeck	Münster
3	Erzbischöfliche St. Anna-Schule	Wuppertal
4	Nicolaus Cusanus Gymnasium	Bonn
5	Carl-Fuhlrott-Gymnasium	Wuppertal
6	Humboldt-Gymnasium	Köln
7	Städtisches Mataré-Gymnasium	Meerbusch
8	Erzbischöfliche Ursulinen-Schule	Köln
9	Gymnasium Antonianum	Geseke
10	Erzbischöfliches Irmgardis-Gymnasium	Köln
11	Ceciliengymnasium	Bielefeld
12	Helmholtz-Gymnasium	Bonn
13	Theodor-Heuss Gymnasium	Waltrop
14	Steinhagener Gymnasium	Steinhagen
15	Lise-Meitner-Gymnasium	Leverkusen
16	Gymnasium Nepomucenum	Coesfeld
17	Andreas-Vesalius-Gymnasium	Wesel
18	Wilhelm-Dörpfeld-Gymnasium	Wuppertal

Tab. 39: Die Schulen aus NRW, die an der Hauptstudie teilnahmen.

5.2.3 Methoden der Datenerhebung

Wie bereits in Kap. 5.2.1 angeschnitten, wurden als Messinstrumente für die Lehrer a) ein Feedbackbogen, unmittelbar nach der Intervention und b) ein Feedbackbogen als Follow-up-Erhebung entwickelt, für die Schüler dagegen ein Feedbackbogen und ein Prä-Post-Lernstandserhebungsbogen. Von besonders hoher Bedeutung war es, dass die Schüler, welche letztendlich die eigentlichen Adressaten für jede Art von Innovation im Chemieunterricht sind, unabhängig vom Leistungsstand ihre Rückmeldung zur Intervention und zu photochemischen Inhalten abgeben konnten, denn „[e]ducational change, above all, is a people-related phenomenon for each and every individual. Students, even little ones, are people, too“ [49]. So gab es auch für die Schüler einen Feedbackbogen und zudem einen Prä-Post-Lernstandserhebungsbogen.

Dabei wurde auch bewusst gegen einen üblichen Wissenstest mit beispielsweise Multiple-Choice-Items entschieden, da jegliche Aufgabentypen, bei denen den Schülern die Option des Ratens gegeben wäre, vermieden werden sollten. Gezielt wurde eine authentische und korrekte Selbsteinschätzung der Schüler, um das persönliche Empfinden festzuhalten, als Indiz für den Erfolgsindikator *Identifikation* angesehen (s. Kap. 5.2.3.2; Kap. 5.4.4.1). Anderenfalls hätten weitere Maßnahmen bedacht und eingeplant werden müssen, um der Verfälschung durch Erraten richtiger Antworten entgegenzuwirken [73].

5.2.3.1 Feedbackbogen

Da es sich grundsätzlich um eine explorative Herangehensweise zu einem „bislang nur ungenügend erforschten Themengebiet“ handelt (s. Kap. 2.1.4.1) [72], werden hier erste Erkenntnisse gewonnen, aus denen wiederum Hypothesen generiert werden können. Daher liegt das Hauptaugenmerk auf den *Rückmeldungen* bzw. dem *expliziten Feedback* der Lehrenden und Lernenden durch die Feedbackbögen [498]. Mit der Begründung aus Kap. 3.4.1.3 wurden, so weit es geht, offene Fragen formuliert. Da also zur Analyse der Erfolgsindikatoren der Integration von Photoprozessen in den Chemieunterricht hauptsächlich die durch die Feedbackbögen eingeholte *Meinung* der Schüler und Lehrer entscheidend war und nicht die Qualität der Intervention, wurden hier, wie normalerweise bei quasi-experimentellen Versuchsplänen üblich, keine Gruppen verglichen, sodass *Kontrollgruppen* zu den Gruppen, in denen interveniert wurde, nicht nötig waren [499].

Alle offenen Fragen in den entwickelten Feedbackbögen wurden durch eine zusätzliche Skalierung für eine Messung „im engeren Sinne [...], d.h., [für] die aussagekräftige Zuordnung von numerischen Messwerten zu den beobachteten Ausprägungen“ ergänzt [72]. Aufgrund der aus messtheoretischer Sicht kritischen Betrachtung der *Ratingskala* als intervallskaliert, wurde zur Gleichabständigkeit der Messwerte in die Einleitung der Feedbackbögen eine graphische Unterstützung ergänzt (s. Abb. 73). Als geeignet haben sich in der Praxis 4- bis 9-stufige Ratingskalen erwiesen. Um die Urteilstendenz zur Mitte zu vermeiden, wurde für eine gerade Stufenanzahl entschieden [73]. Es wurde somit eine monopolare intervallskalierte 10-Punkte-Ratingskala mit graphischer Unterstützung genutzt [500] (vgl. [72]). Die Zahl 10 steht dabei für die höchstmögliche Zustimmung zu der zu beurteilenden Aussage, welche durch eine verbale Endpunktbeschreibung den Probanden verdeutlicht wurde. Durch die Wahl einer 10-stufigen Skala sollte zudem bei Bedarf während der Aufbereitung und Analyse der erhobenen Daten die Möglichkeit einer Skalentransformation in ein niedrigeres Skalenniveau gegeben sein [73].

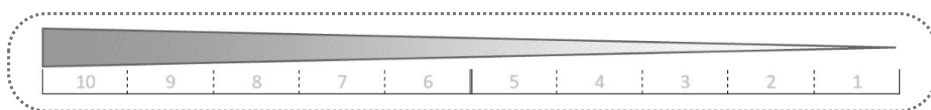


Abb. 73: Graphische Unterstützung der Skalierung in den Feedbackbögen.

Bei der Gesamtgestaltung und Konstruktion der Feedbackbögen wurden Empfehlungen bedacht, wie die Gestaltung eines Titelblatts, das Layout des Erhebungsbogens, eine sinnvolle Reihenfolge der Fragebogenelemente etc. [72, 501]. So besteht der Erhebungsbogen der Lehrpersonen ($I_{x_L}; x \in \{1, \dots, 15\}$) aus insgesamt 15, der der Oberstufenschüler aus 9 ($I_{x_{S2}}; x \in \{1, \dots, 15\} \setminus \{10, 11, 12, 14\}$) und der Feedbackbogen für die Schüler der Sekundarstufe 1 im Vergleich dazu lediglich aus 6 Items ($I_{x_{S1}}; x \in \{4, 6, 7, 8, 9, 13\}$).¹⁴⁸ Der Grund dafür ist, dass aus

¹⁴⁸ Die Arbeitsblätter 1 und 2 wurden für die Sekundarstufe 1 und die Arbeitsblätter 3/4, 5, 6 und 7 für die Sekundarstufe 2 konzipiert (s. Kap. 4.1.3).

einem übermäßig langen Feedbackbogen durch Konzentrationsnachlass und Ermüdungserscheinungen die mangelnde Vervollständigung der Erhebung resultieren könnte, da für Schüler offene Fragen durch Fließtexte zu beantworten anspruchsvoller ist, als bei geschlossenen Fragen Antwortmöglichkeiten auszuwählen [502].

Daneben sind die Items in drei thematische Blöcke zusammengefasst worden [72, 501] (s. Tab. 40). Dabei wurde eine induktive Anordnung der Fragenkomplexe gewählt. D. h.: Mit den ersten „Fragen, die auch einen erkennbaren Bezug zu dem Thema der Studie haben“ [501], wird konkret zur Intervention selbst Feedback eingeholt. Das zweite Fragenmodul beinhaltet Items zum persönlichen Empfinden in Bezug auf das Thema bzw. die Intervention. Dieses Modul ist auch gleichzeitig der Übergang zu dem letzten Fragenblock, in dem es thematisch nun allgemein um die Photochemie im Zusammenhang mit dem Chemieunterricht geht.

Daneben wurden zur Itemgenerierung in den Feedbackbögen COBURNS Erfolgsindikatoren für den Transfer von Schulreformen genutzt, die an dieser Stelle nach GOLDENBERG als „Anhaltspunkte zur Bemessung gelungener Implementierung“ bzw. erfolgreicher Einbindung photochemischer Inhalte in den CU betrachtet werden. Die meisten Items¹⁴⁹ (mit Ausnahme der Items in Block 1) lassen sich also nach den vier Erfolgsindikatoren *Verbreitung*, *Nachhaltigkeit*, *Identifikation* und *Tiefe* von COBURN (s. Kap. 2.1.2) kategorisieren. Dabei wurden die Items in Tabelle 40 und 41 mit dem jeweiligen Anfangsbuchstaben der Erfolgsindikatoren gekennzeichnet. Abgeschlossen wurden die Feedbackbögen mit Freiraum für sonstige Anmerkungen und einer Danksagung.

Block 1: Konkrete Fragen zur Intervention	
Items im Feedbackbogen der Lehrpersonen	
I1 _L	„Benötigtes Vorwissen“ auf dem Arbeitsblatt (oben) anzugeben, ist sinnvoll.
I2 _L	Dass alle Schülergruppen mit dem gleichen Einstiegsexperiment beginnen, ist sinnvoll.
I3 _L	Die Aufgaben waren für das Unterrichten des entsprechenden Themas nützlich und hilfreich.
I4 _L	Die Aufgaben sind anspruchsvoll.
I5 _L	Ordnen Sie die von Ihnen für Ihren Unterricht ausgewählten Aufgaben den drei Schwierigkeitsgraden (leicht, mittelmäßig, anspruchsvoll) zu.
Items im Feedbackbogen der Schüler der Sekundarstufe 1	
I4 _{S1}	Die Aufgaben sind anspruchsvoll / schwierig.
Items im Feedbackbogen der Schüler der Sekundarstufe 2	
I1 _{S2}	„Benötigtes Vorwissen“ auf dem Arbeitsblatt (oben) anzugeben, ist sinnvoll.
I2 _{S2}	Dass alle Schülergruppen mit dem gleichen Einstiegsexperiment beginnen, ist sinnvoll.
I4 _{S2}	Die Aufgaben sind anspruchsvoll.

¹⁴⁹ Einige ausgewählte Items wurden aus Interesse des Forschers mit Blick auf den explorativen Ansatz gestellt, da die Entdeckung möglicher für die Arbeit relevanter Informationen und Korrelationen durch die Zuhilfenahme der deskriptiven Statistik (s. Kap. 5.2.4) vermutet wurden.

Block 2: Persönliches Empfinden des thematischen Inhalts der Intervention	
Items im Feedbackbogen der Lehrpersonen	
I6 _L	Die SuS zeigten Interesse an dem ausgewählten Thema und den entsprechenden Experimenten und es machte ihnen Spaß. (I)
I7 _L	Die SuS konnten in diesem Themenbereich beim Bearbeiten der dazugehörigen Aufgaben ihr/e im Unterricht zuvor bereits erlangtes/n Wissen / Kompetenzen anwenden. (I)
I8 _L	Die SuS konnten in diesem Themenbereich beim Bearbeiten der dazugehörigen Aufgaben und Durchführen der Experimente ihr/e im Unterricht zuvor bereits erlangtes/n Wissen / Kompetenzen erweitern, d. h. einen neuen Lernertrag erzielen. (I)
Items im Feedbackbogen der Schüler der Sekundarstufe 1	
I6 _{S1}	Das ausgewählte Thema und die entsprechenden Experimente fand ich interessant und sie haben mir Spaß gemacht. (I)
I7 _{S1}	Ich konnte beim Bearbeiten der Aufgaben zu den Experimenten mein Wissen aus dem Unterricht zuvor anwenden. (I)
I8 _{S1}	Ich habe beim Bearbeiten der Aufgaben und Durchführen der Experimente Neues dazugelernt. (I)
Items im Feedbackbogen der Schüler der Sekundarstufe 2	
I6 _{S2}	Das ausgewählte Thema und die entsprechenden Experimente fand ich interessant und sie haben mir Spaß gemacht. (I)
I7 _{S2}	Ich konnte beim Bearbeiten der Aufgaben zu den Experimenten mein aus dem Unterricht zuvor bereits erlangtes Wissen anwenden. (I)
I8 _{S2}	Ich konnte beim Bearbeiten der Aufgaben und Durchführen der Experimente zusätzlich noch neues Wissen erlangen. (I)
Block 3: Allgemeine Fragen zur Photochemie im CU	
Items im Feedbackbogen der Lehrpersonen	
I9 _L	Photochemische Experimente sollten in den KLP integriert werden. (N) (T)
I10 _L	Gibt es Gründe, die gegen die Integration von photochemischen Experimenten in den Chemieunterricht sprechen? Wenn ja, welche sind das? (V)
I11 _L	Nennen Sie Vor- und Nachteile der eingesetzten photochemischen Experimente. (N) (V)
I12 _L	Die auf diesem Arbeitsblatt angegebenen Inhalte sind für den Chemieunterricht relevant. (I)
I13 _L	Vervollständigen Sie die Aussage, indem Sie entsprechend ankreuzen: „Zukünftig sollten im Chemieunterricht Experimente mit der Energieform Licht im Vergleich zu den Experimenten mit Wärme oder elektrischer Energie ... sein.“ ... etwas relevanter; weniger relevant; ebenso relevant. (N)
I14 _L	Nennen Sie alle photochemischen Experimente, welche Sie zuvor in Ihrem Chemieunterricht eingesetzt haben. (N)
I15 _L	Was fanden Sie an dem Thema und den entsprechenden photochemischen Experimenten besonders wichtig für Ihre SuS? (I)
Items im Feedbackbogen der Schüler der Sekundarstufe 1	
I9 _{S1}	Wir sollten noch mehr Experimente mit der Energieform Licht kennenlernen und im Unterricht durchführen. (N) (T)
I13 _{S1}	Vervollständige die Aussage, indem du entsprechend ankreuzt: „Zukünftig sollten im Chemieunterricht Experimente mit der Energieform Licht im Vergleich zu den Experimenten mit Wärme oder elektrischer Energie ... sein.“ ... etwas relevanter; weniger relevant; ebenso relevant. (N)
Items im Feedbackbogen der Schüler der Sekundarstufe 2	
I9 _{S2}	Wir sollten noch mehr Experimente mit der Energieform Licht kennenlernen und im Unterricht durchführen. (N) (T)

I13 _{S2}	Vervollständigen Sie die Aussage, indem Sie entsprechend ankreuzen: „Zukünftig sollten im Chemieunterricht Experimente mit der Energieform Licht im Vergleich zu den Experimenten mit Wärme oder elektrischer Energie ... sein.“ ... etwas relevanter; weniger relevant; ebenso relevant. (N)
I15 _{S2}	Was fanden Sie an dem Thema und den entsprechenden photochemischen Experimenten besonders wichtig für Sie als Schülerinnen / Schüler? (I)

Tab. 40: Items der drei Feedbackbögen für Lehrer und Schüler der Sek. 1 und Sek. 2.

Bewusst sind die Items in dem Feedbackbogen für die Schüler der Sek. 1¹⁵⁰ deckungsgleich mit einem großen Teil der Items in dem Feedbackbogen der Oberstufenschüler, da hierdurch zu den entsprechenden Items auch eine stufenunabhängige Gesamtauswertung dadurch gewährleistet sein sollte. Beim Vergleich der Fragen für die Lehrer mit denen für die Schüler wird auffallen, dass sie bis auf wenige Ausnahmen zumindest inhaltlich kongruent sind. Hierdurch soll das Feedback zu ausgewählten Themen vergleichbar sein und auf mögliche Analogien und Unterschiede hin analysiert werden können.

Die Abschluss-Feedbackbögen an die Lehrpersonen, die teilgenommen haben, als Follow-Up-Messung (s. Kap. 5.2.1, unten), welche ca. 6 Monate nach Abschluss der Hauptuntersuchung versendet wurden, entstanden nach dem Sichten der Antworten auf die Fragen des ersten Feedbackbogens und der dadurch erlangten Feststellung des weiteren Informationsbedarfs. Hier wurden direkte offene Fragen gestellt und die Skalierung diesmal eliminiert.

Block 1: Abschließende Fragen an Lehrer, die an der Hauptstudie teilgenommen haben	
I16 _L	Welche Anreize gab es für Sie, an der Feldstudie teilzunehmen? (V) (I)
I17 _L	Falls Sie der Meinung sind, dass das Thema / die Themen in den aktuellen Lehrplan (Sek. 1 oder Sek. 2) passen: An welche Inhaltsfelder / Themen würden Sie das / die von Ihnen ausgewählte/n Thema/en anbinden? (N) (T)
I18 _L	Ist der Aufwand, um das Thema / die Themen im Unterricht einzubringen, angemessen? (I)
I19 _L	Wie würden Sie den Bedarf an photochemischen Experimenten begründen? (N) (V)
I20 _L	Würden Sie die Experimente (zu den von Ihnen ausgewählten Themen) in Zukunft in Ihren Unterricht einbinden wollen? Begründen Sie bitte Ihre Antwort. (N)
I21 _L	Mit welchen Argumenten würden Sie andere Lehrpersonen davon überzeugen, diese photochemischen Experimente im Unterricht einzusetzen? (V)
I22 _L	Welche Probleme könnten Ihnen ggf. beim Einsatz der Experimente begegnen? (V) (N)
I23 _L	Hier haben Sie noch Platz für weitere Anmerkungen, Ideen zur Verbesserung oder Ergänzung. (I)

Tab. 41: Items des Abschluss-Feedbackbogens der Lehrer.

¹⁵⁰ Da alle Items bereits in diesem Kapitel dargestellt sind, ist im Anhang exemplarisch der Feedbackbogen für die Schüler der Sek. 1 zu finden (s. Kap. 9.6.1). Dazu analog ist der Feedbackbogen der Schüler der Sek. 2 und der Lehrer aufgebaut.

5.2.3.2 Lernstandserhebung

Wie bereits erwähnt (s. Kap. 2.1.4.1), wird mit dem „explorativen Zugang [...] keine Prüfung und Falsifizierung, sondern eine Einschätzung und Erweiterung bestehender Kenntnisse verfolgt“ [503]. Auf Grund dessen – und auch weil hier kein neues didaktisches Konzept o.ä. im Vergleich zu einem anderen getestet wird, um dann mithilfe des höheren Lernerfolgs auf die Qualität des neuen Konzepts aufmerksam zu machen und sich dadurch für eines der beiden zu entscheiden (vgl. Kap. 5.1) – spielt hier in erster Linie *nicht* die detaillierte Messung des Lernerfolgs der Schüler eine Rolle, sondern vielmehr die Intention, dass den Schülern durch ihre Selbsteinschätzung ihr Lernertrag sichtbar gemacht bzw. bewusst wird (vgl. [470]). Die Lernstandserhebung vor und nach der Intervention ist eine Art „Lernerfolgskontrolle [für die Schüler selbst und dient zudem auch als] selbstständige Diagnose ihres eigenen Wissensstandes“ [504]. Daher wurden zur Verdeutlichung der individuellen Progression des Wissensstands für die Post-Erhebung die von den Schülern bereits ausgefüllten Prä-Erhebungsbögen mithilfe eines von den Schülern gesetzten Codes wiederholt ausgeteilt. So ist auch die Lernstandserhebung selbst schon nutzenorientiert, weil sie nicht nur den Zweck erfüllt, eine Bestätigung für den Erfolgsindikator *Identifikation* zu sein, sondern auch weil durch diese Selbsteinschätzung Schülern ohne jegliche Beurteilung durch Noten o. ä. die Progression in ihrem Wissen aufgezeigt und ihnen die Möglichkeit der Selbstreflexion gegeben wird [503]. So kann die aktive Verarbeitung des neuen Wissens gefördert werden. Schließlich ist auch gezeigt worden, dass dieses gewählte Messinstrument somit (mindestens) zweiseitig gewinnbringend ist, sowohl für den Forscher als auch für den Schüler.

Das Deckblatt der Lernstandserhebungsbögen (s. Kap. 9.6.2) diente zur Sicherung allgemeiner Informationen wie des Schulnamens, der Stufe und des Geschlechts. Außerdem wurde, wie bereits erwähnt, ein anonymer Code von den Schülern gebildet. Dieser setzt sich aus den ersten beiden Buchstaben des Mutternamens und dem eigenen Geburtstag zusammen. Insgesamt waren vier Aufgaben zur Bearbeitung vorgesehen. Alle vier Aufgaben dienen aus Forscherperspektive zur Diagnose des Wissens. Die Aufgaben wurden mit steigendem Schwierigkeitsgrad gestellt. Zu jedem Aufgabenblatt wurde ein inhaltlich dafür spezifischer Lernstandserhebungsbogen (s. Kap. 9.6.3 - 9.6.8) entwickelt, wobei die Aufgabenstellungen in allen Aufgabenblättern übereinstimmen. Bevor die einzelnen Aufgaben bearbeitet wurden, gab der Forscher Hinweise und beantwortete Fragen zum Verständnis der Aufgabenraster.

Die erste Aufgabe A (s. Abb. 74) bestand darin, zu den in einer Liste angegebenen Fachbegriffen, die im Zusammenhang mit dem Thema des jeweiligen Arbeitsblatts bzw. des Unterrichts stehen, mithilfe einer Skalierung den individuellen Kenntnisstand subjektiv anzugeben. Die Aufgabe A ist eine

einfache Vorstufe des Aufgabentyps D (s. Abb. 77). Schüler, die nicht in der Lage sind, Aufgabe D zu bearbeiten, haben dennoch in Aufgabe A die Möglichkeit, anhand vorgegebener Fachtermini ihren Lernertrag mitzuteilen. Bei der Wahl der Fachbegriffe wurden alle aufgelistet, die innerhalb der Arbeitsblätter genutzt wurden. In Aufgabe A (sowie in C) wurde eine fünfstufige Ratingskala mit Endpunktbeschreibung gewählt (s. Abb. 74). Da es bei dieser Aufgabe wie beim Feedbackbogen um keine fixe Beurteilung von Aussagen geht und lediglich der Wissensstand vor und nach der Intervention festgehalten werden soll, ist die Urteilstendenz zur Mitte als Störfaktor an dieser Stelle bedeutungslos, weshalb eine ungerade Stufenanzahl dadurch legitim wird. Außerdem wurde zur Beschleunigung der intuitiven Festlegung der eigenen Kenntnisse über die Fachbegriffe auf eine 10-stufige Skala verzichtet. Für den Prä-Test wurde eine separate Spalte eingeführt, die die Schüler ankreuzen sollten, wenn sie sich nach der Intervention mit den Fachbegriffen besser auskannten.

Wie gut kennst du dich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	*Jetzt kenne ich mich damit besser aus.
	5	4	3	2	1	
UV Licht						
Lichtabsorption						
Fluoreszenz						

Abb. 74: Ausschnitt aus Aufgabe A der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 7.

Bei der Aufgabe B (s. Abb. 75) wurde eine Tabelle aus zum Teil falschen fachwissenschaftlichen Aussagen angegeben. Diese Aussagen sollten mit *wahr* oder *falsch* beurteilt werden. Zusätzlich bekamen die Schüler die Option *ich weiß nicht* zur Wahl gestellt, damit die Verfälschung der Ergebnisse durch Raten minimiert wurde.

	Aussage	richtig	falsch	keine Ahnung
1	Jeder Stoff hat, unabhängig davon worin er gelöst wird, immer eine einzige bestimmte Farbe.			
2	Leuchtfarben entstehen, indem Stoffe energiearmes Licht in energiereiches Licht umwandeln.			
3	Blaues Licht ist energiereicher als rotes Licht.			

Abb. 75: Ausschnitt aus Aufgabe B der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 1.

Die Aufgabe C (s. Abb. 76) besteht darin, zu beurteilen, inwieweit die Schüler über die aufgelisteten Kompetenzen verfügen. Dabei wurden die Kompetenzen in Anlehnung an die Kompetenzen aus den KLPen des Landes NRW für das Fach Chemie formuliert (s. Abb. 76). Es wurden die durch die Bearbeitung der Aufgaben aus den Aufgabenblättern entwicklungs-fähigen Kompetenzen aufgelistet. Hauptsächlich konnten inhaltsbezogene, d. h. konzeptbezogene Kompetenzen angegeben werden, da die Förderung der prozessbezogenen Kompetenzen der Schüler maßgeblich von der Unterrichtsgestaltung,

Wahl der Methoden, der Sozialformen etc. der Lehrperson abhängt. „Bei der Itemgenerierung wurde jede einzelne Frage in der ersten Person Singular [...] formuliert, womit sichergestellt werden soll, dass die Personen ihre individuelle Lernerfahrung berichten“ [505] und durch das dadurch vereinfachte Hineinversetzen in die entsprechende Situation die Aussagen zweifelsfreier bzw. sicherer beurteilen.

Nr.	Wie gut kannst du das?	sehr gut				sehr schlecht	*Jetzt kann ich das besser.
		5	4	3	2	1	
1	Ich kann Stoffumwandlungen beobachten und beschreiben.						
2	Ich kann Energieumwandlungen beschreiben und erklären.						
3	Ich kann Stoffumwandlungen in Verbindung mit						

Abb. 76: Ausschnitt aus Aufgabe C der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 2.

Bei der Aufgabe D sollten die Oberstufenschüler zum Inhalt der Intervention eine *Concept Map*¹⁵¹ und die Schüler der Sekundarstufe 1 eine *Mind Map* erstellen. Im Folgenden wird kurz die Gemeinsamkeit und der Unterschied zwischen diesen beiden Methoden aufgezeigt:

„Mindmapping-Verfahren zielen auf eine schnelle Übersicht über wichtige Aspekte, die mit einer bestimmten Thematik, einer Idee oder einem bestimmten Begriff assoziiert werden – sie visualisieren den Zusammenhang von symbolisch-sprachlich repräsentierten Vorstellungen. [...] Conceptmaps dienen nicht nur der Visualisierung von Begriffen, Zusammenhängen und begrifflichen Netzwerken – wie es beispielsweise Mindmapping-Verfahren vorsehen, sie erlauben zudem, Bezüge und Relationen zwischen den dargestellten Begriffen abzubilden.“ [506]

Beide Verfahren lassen „Spielraum für Kreativität, für überraschende Ergebnisse und stell[en] damit eine Alternative zu der üblichen, linear verlaufenden und hierarchisch organisierten Form dar, in der Wissen erworben wird“ [507]. So sind sie praktisch vom Prinzip her auch der konstruktivistischen Didaktik verbunden [507].

In der Prätest-Messung lautete die Aufgabe für die Unterstufenschüler wie folgt: *Erstelle hier eine Mind Map zum Thema Du darfst die komplette Seite benutzen.* Im Posttest sollte die erstellte Mind Map mit dem neu erlernten Wissen lediglich ergänzt werden. Durch die Feststellung der Unzufriedenheit eines Schülers mit der ersten erstellten Mind Map wurde ab dem Zeitpunkt in den Prätests den Schülern mitgeteilt, dass sie bei Bedarf eine neue Mind Map erstellen dürfen.

Im Unterschied zu der Aufgabe für die Sekundarstufe 1 wurde zur Erstellung der Concept Map den Oberstufenschülern mündlich anhand eines

¹⁵¹ Dieser Ausdruck wird abweichend von der Literatur getrennt geschrieben, da es der englischsprachigen Orthographie entspricht.

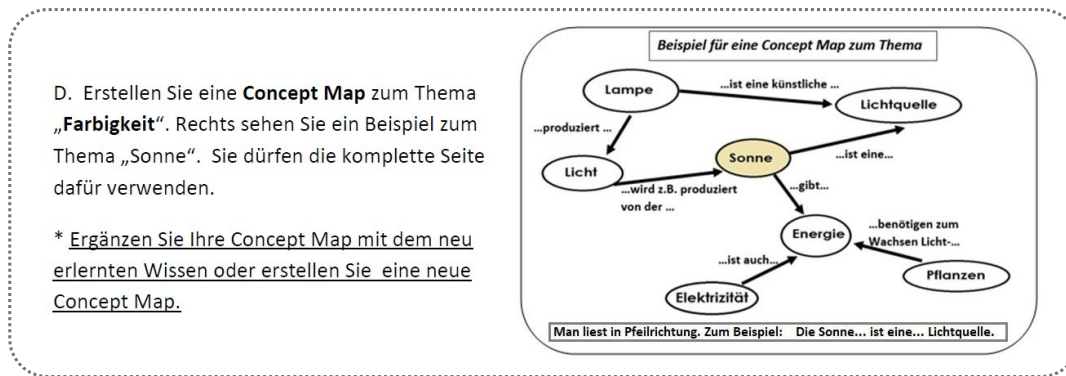


Abb. 77: Aufgabe D der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 5.

Beispiels, welches sich neben der Aufgabe auf dem Lernstandserhebungsbogen befindet, eine Anleitung zur Erstellung einer Concept Map gegeben.

Ursprünglich wurden verschiedene Aufgabentypen zum Concept Mapping erstellt. Sie sollten dazu dienen, die Auswertung der Schülerantworten zu erleichtern: Eine Möglichkeit bestand darin, die Struktur bzw. das Gerüst aus den Beziehungen zwischen den Knoten, die Knoten selbst und die Beziehungen, d.h. die Beschriftungen für die Pfeile zwischen den Knoten vorzugeben. So wäre es die Aufgabe der Schüler, die Knoten und Beziehungen an die richtigen Stellen im Gerüst zuzuordnen. Jedoch kam im Rahmen von Vortests und der Pilotstudien die Kritik auf, dass zu viele Elemente vorgegeben seien und zu stark vorstrukturiert wurde. Das Problem entstand, wenn gegen Ende der Bearbeitung der Aufgabe die Schüler feststellen mussten, dass die letzten freien Stellen und übrig gebliebenen Knoten und Pfeilbeschriftungen nicht miteinander kompatibel waren. So mussten sie Fehler suchen, was erfahrungsgemäß sehr zeitaufwendig war, da diese überhaupt erst als Fehler identifiziert werden mussten. Dies wirkte demotivierend und frustrierte die Lernenden. Außerdem entstand für die Schüler in diesem Fall die Option aus Verzweiflung, die Positionen der Knoten und Beziehungen zu raten. Daneben gab es noch einige weitere Ideen zur Gestaltung der Aufgabe C. Jedoch ging damit die Einschränkung der Kreativität und Individualität der Schüler einher. Beispielsweise wurden in einer der Pilotstudien den Schülern zur Orientierung ausgewählte Fachbegriffe vorgegeben und sie sollten die Concept Map ohne weitere Einschränkungen selbst erstellen. Die Konsequenz war, dass die meisten Schüler erst versuchten, die als Hilfestellung vorgegeben Fachtermini richtig zu kombinieren. Da sie damit die meiste Zeit verbrachten, wurden von diesen Schülern kaum eigene Ergänzungen gemacht. In all diesen Fällen konnte zudem nicht genau festgestellt werden, welche Ausdrücke den Schülern durch die Intervention viel stärker im Gedächtnis haften geblieben sind. Letztendlich wurde die Aufgabenstellung, wie sie in Abb. 77 zu sehen ist, gewählt. So wurde unter anderem eindeutig ersichtlich,

- was die Schüler für relevant genug erachteten und als Fachbegriff angaben,
- welche Fachbegriffe ihnen überhaupt bekannt waren und
- wie viele Beziehungspfeile sie selbstständig angaben und dadurch verdeutlichten, dass sie die Zusammenhänge verstanden hatten.

Zudem sollte den Schülern selbst dadurch auch bewusst werden, wie viel sie über das entsprechende Thema im Vorhinein wussten und was sie letztendlich durch die Intervention dazugelernt hatten.

5.2.4 Methoden der Datenauswertung

„Exploratory data analysis is detective work.“ [508]

— J. TUKEY

In erster Linie wurde mit Blick auf den explorativen und nutzenorientierten Charakter des Untersuchungsansatzes der Arbeit (s. Kap. 2.1.4.1; Kap. 2.1.4.2) die Intention der *Explorativen Datenanalyse* im Sinne von TUKEY verfolgt [508]. Es geht hier nämlich nicht darum, theoretisch abgeleitete Hypothesen zu überprüfen, sondern Hypothesen zu generieren, indem offen formulierte Forschungsfragen mit dem dafür erhobenen Datensatz beantwortet werden [72].¹⁵² So wird die Intention der Analyse und Auswertung der Ergebnisse der Hauptuntersuchung mit der Beschreibung jener Methode adäquat wiedergegeben:

„Die Explorative Datenanalyse (EDA) bezeichnet im engeren Sinne eine Reihe meist grafischer oder semigrafischer Verfahren, die bestimmte Informationen zu einzelnen Variablen oder zum Zusammenhang von zwei oder mehr Variablen sichtbar machen. Das können beispielsweise Kennwerte, Verteilungen, Unterschiede, Zusammenhänge oder auffällige Werte sein. Das Ziel der EDA ist es, Ihnen als ‚Datenanalytiker‘ einen schnellen Überblick über einen bestimmten Sachverhalt (z.B. die Verteilung von Daten) zu verschaffen. Daraus können Sie dann Schlussfolgerungen ziehen oder Hinweise darauf bekommen, welche Aspekte der Daten Sie genauer untersuchen sollten“ [512].

Die explorative Datenanalyse basiert somit auf deskriptiv-statistischen Methoden [72].¹⁵³ Es geht hier darum, welche relevanten Informationen der Forscher für seine Untersuchungen mithilfe der Visualisierungstechniken erlangt, um bestimmte Aussagen zu unterstreichen oder innerhalb der Daten entstandene Auffälligkeiten zu kommunizieren [512].

¹⁵² In dieser Arbeit wird im Anschluss an die explorativen Analysen keine *confirmatorische Datenanalyse* bzw. *Inferenzstatistik* durchgeführt [509, 510]. Dies wäre ein mögliches Forschungsdesiderat, welches hier aber aus zeitlichen Gründen und aufgrund des schon beträchtlichen Ausmaßes der Arbeit nicht möglich war [509]. Deshalb muss berücksichtigt werden, dass „die Resultate zunächst nur für diesen speziellen Datensatz gültig sind“ [511].

¹⁵³ *Explorative Datenanalyse* wird beispielsweise von BURKHARDT und SEDLMEIER als ein übergeordneter Ausdruck verwendet, der auch die deskriptive Datenanalyse umfasst [512].

5.2.4.1 Feedbackbogen

Da die Items der Feedbackbögen sowohl durch eine Skalierung beurteilt als auch offen beantwortet bzw. kommentiert oder begründet werden konnten (s. Kap. 5.2.3.1), musste dafür folglich auch bei der Auswertung nach dem *Mixed-Methods-Ansatz* vorgegangen werden [72]. Für die qualitativen Daten der einzelnen Items wurde zunächst induktiv jeweils ein Kategoriensystem entwickelt, sodass dieses auf die Daten angewandt werden konnte und mithilfe der Kategorien die Daten analysiert und inhaltlich strukturiert wurden (vgl. 3.4.2.2). Erst im Anschluss konnte dadurch die Häufigkeitsverteilung dazu mithilfe von Histogrammen dargestellt werden. Aus forschungsökonomischen Gründen wurde dabei computer-gestützt gearbeitet. Alle Daten wurden zunächst mithilfe des Tabellenkalkulationsprogramms *Microsoft Excel* der Version 2016 digitalisiert. Im Anschluss daran wurden als Werkzeug in *Microsoft Excel* erstellte *Pivot-Tabellen* zur Auswertung verwendet [513]. Da zu einigen der Items der Umfang der qualitativen Daten zu gering war, wurde auf die Integration der Histogramme bei der Auswertung verzichtet. Jedoch konnten die Ergebnisse als Erklärung, Unterstützung oder Begründung der Ergebnisse der quantitativen Daten sinnvoll genutzt werden.

Die statistische Datenanalyse der erhobenen quantitativen Daten aus den Feedbackbögen wurde mit dem Softwareprogrammpaket *SPSS Statistics 25.0* (*Statistical Package for the Social Science*) der Softwarefirma IBM durchgeführt [502] (vgl. [272]). Bei der Datenaufbereitung wurden die fehlenden und ungültigen Werte speziell codiert. Die Auswertung mit SPSS erfolgte in mehreren Schritten. D. h.: Es wurden sowohl *univariate* als auch *bivariate deskriptiv-statistische Analysemethoden* angewandt [514]. Dabei konnten je nach Bedarf unterschiedliche Diagrammtypen verwendet werden.

Zunächst wurden zur Visualisierung der absoluten Häufigkeiten der Antwortkategorien jedes Items Histogramme eingesetzt und jeweils der Mittelwert (M) und die Standardabweichung (SD) berechnet [272]. So konnte festgestellt werden, ob Ausreißer in den Werten vorhanden waren oder andere Arten von Auffälligkeiten. Deshalb wurden als Alternative zu allen Items zusätzlich *Boxplots* erstellt (s. Abb. 78). So konnte „[z]ur Vermeidung der Verzerrung des Mittelwerts durch Ausreißer nun das Median als alternatives Lagemaß angeschaut [werden]“ [515]. Zusätzlich dienten als Streuungsmaß beim Box-Plot die Interquartilsabstände.

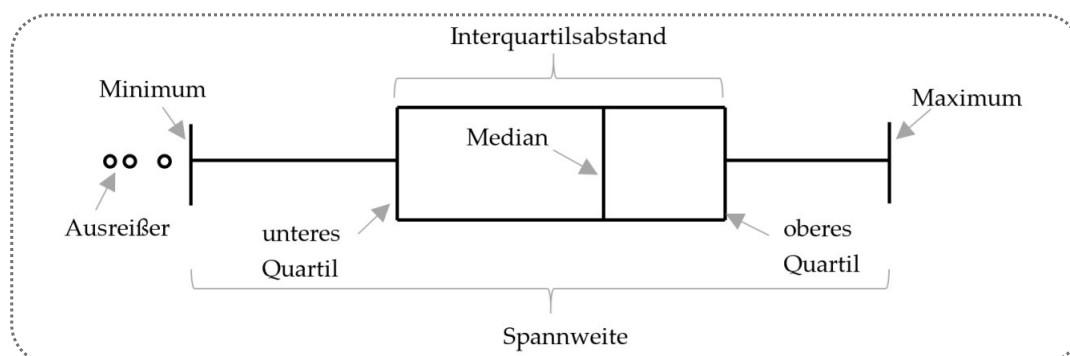


Abb. 78: Ein Box-Plot mit Beschriftung der Messdaten (nach [516]).

Zur Generierung von Erkenntnissen über mögliche Zusammenhänge von Variablen wurden im Sinne der explorativen Datenanalyse nach TUKEY die bivariate Deskriptivstatistik genutzt [508]. Für die korrelativen Untersuchungen wurden Streudiagramme verwendet und vollständigshalber der jeweilige PEARSON-Korrelationskoeffizient (r) berechnet, welcher einen Wert zwischen -1 und 1 einnehmen kann [515]. Zu der Höhe einer Korrelation wurden von COHEN [517] Richtwerte aufgestellt (s. Tab. 42) (vgl. [518]). Die Intention war jedoch nicht, eine besonders große Korrelation zwischen den ausgewählten Items festzustellen, sondern erst einmal, ob und welche Art von Korrelation vorhanden ist, sodass auf die berechneten Korrelationswerte verzichtet wurde.

PEARSON-Korrelationskoeffizient r	Interpretation des Wertes r
$r > \pm 0,1 $	„kleine“ Korrelation
$r > \pm 0,3 $	„mittlere“ Korrelation
$r > \pm 0,5 $	„große“ Korrelation

Tab. 42: Interpretation des PEARSON-Korrelationskoeffizienten nach COHEN [518].

Insgesamt stellten aufgrund von unsachgemäßen Aussagen oder *missing values* (fehlenden Werten) vier der eingegangenen Feedbackbögen einen nicht auswertbaren Befund dar, sodass diese nach Kontrolle der Feedbackbögen auf Vollständigkeit und Plausibilität aussortiert wurden (vgl. [519]).

Die berechneten Werte der Deskriptivstatistik befinden sich im Anhang der Arbeit (s. Kap. 9.7). Die Mittelwerte und Standardabweichungen unterscheiden sich höchstens in der zweiten Nachkommastelle, sodass diese auf die zweite Nachkommastelle aufgerundet wurden.

5.2.4.2 Lernstandserhebung

Bei der Auswertung des Lernstandserhebungsbogens der Schüler wurde für die Aufgaben A, B und C (s. Kap. 5.2.3.2) mit SPSS gearbeitet.¹⁵⁴ Für den Vorher-Nachher-Vergleich der Ergebnisse wurden relative Häufigkeiten der Messdaten bzw. Angaben der Schüler unabhängig vom Arbeitsblatt berechnet. Auf diese Weise konnte der Wissenszuwachs prozentual angegeben werden (vgl. [423]). Zur Visualisierung wurden Kreisdiagramme verwendet (s. Kap. 5.4.4.1).

Die Aufgabe D, bei der es um die Erstellung einer Mind Map bzw. Concept Map geht, wurde separat ausgewertet. Zuerst wurden alle angegebenen Fachbegriffe gesichtet und mit Microsoft Excel aufbereitet. Aufgrund der Tatsache, dass die Oberstufenschüler im Durchschnitt Schwierigkeiten bei der Erstellung einer Concept Map hatten und die dafür

¹⁵⁴ Eine detaillierte Analyse der Ergebnisse wie z. B. der Fehlvorstellungen u. ä. würde den vorgegebenen zeitlichen Rahmen sprengen. Darauf liegt außerdem nicht der Schwerpunkt der Arbeit.

vorgesehene Zeit deshalb entweder nicht ausreichend war oder zu lang für diejenigen, die eine Mind Map anstatt einer Concept Map erstellt hatten, wurde bei der Auswertung nicht wie geplant auf die Anzahl der richtigen Verbindungen zwischen den Ausdrücken eingegangen. Der Datensatz dafür war nicht umfangreich genug. Zur Darstellung der ersten 20 am häufigsten genannten Begriffe pro Arbeitsblatt wurde somit für den Prä-Test jeweils eine *Wortwolke* [520] erstellt, in der nach Anzahl der Benennung des jeweiligen Begriffs dessen Größe in der Wortwolke festgelegt wird: Je größer das Wort dargestellt ist, desto häufiger wurde es im Verhältnis zu den anderen Wörtern genannt. Auch für den Post-Test wurde jeweils eine Wortwolke erstellt. Hierfür wurden diesmal die nach der Intervention am häufigsten genannten 20 Begriffe aufgenommen.

Bei der Auswertung der Erhebungsbögen konnten nur diejenigen Schüler berücksichtigt werden, die sowohl vor der Intervention als auch danach an der Lernstandserhebung teilnahmen (vgl. [53]).

5.2.5 Zeitplan

Da die Arbeit in mehreren Schritten entstand, wurde zur Übersicht ein Zeitplan erstellt. Zum besseren Verständnis des Zusammenhangs zwischen diesen ist die Hauptuntersuchung innerhalb des für die Arbeit verfügbaren gesamten Zeitpensums dargestellt worden (s. Abb. 79).

Die Pilotstudie wurde so geplant, dass sie spätestens mit dem zu dem Zeitpunkt aktuellen Schuljahr 2017/2018 beendet sein musste, sodass die für die Feldstudie nötigen Arbeitsmaterialien mit den daraus geschöpften Optimierungsvorschlägen und Ideen bis Mitte der Sommerferien 2018 aktualisiert werden konnten. Dies war nötig, da die an der Teilnahme der Studie interessierten Lehrpersonen (s. Kap. 5.4.2.1) die Unterrichtsintervention in dem neuen Schuljahr umsetzen sollten. Zwar wurden sie bereits im Frühjahr 2018 schriftlich, aber auch durch zusätzliche Lehrerfortbildungen (s. Kap. 5.4.1.2) praktisch gebrieft, jedoch sollten sie dennoch gegen Ende der Sommerferien die Möglichkeit bekommen, die aktualisierten Materialien zu den ausgewählten Themen (s. Kap. 4.1.3) online zu erhalten. So konnten sie diese bei der Integration der Unterrichtsintervention in die eigenen Unterrichtsreihen rechtzeitig einplanen. Außerdem konnten durch die Erfahrung mit der Pilotstudie auch die Messinstrumente weiter optimiert werden. So wurde die Hauptstudie für das Schuljahr 2017/2018 einkalkuliert. Anfang des Schuljahres 2019/2020 folgte dann die Follow-up-Befragung der Lehrpersonen.

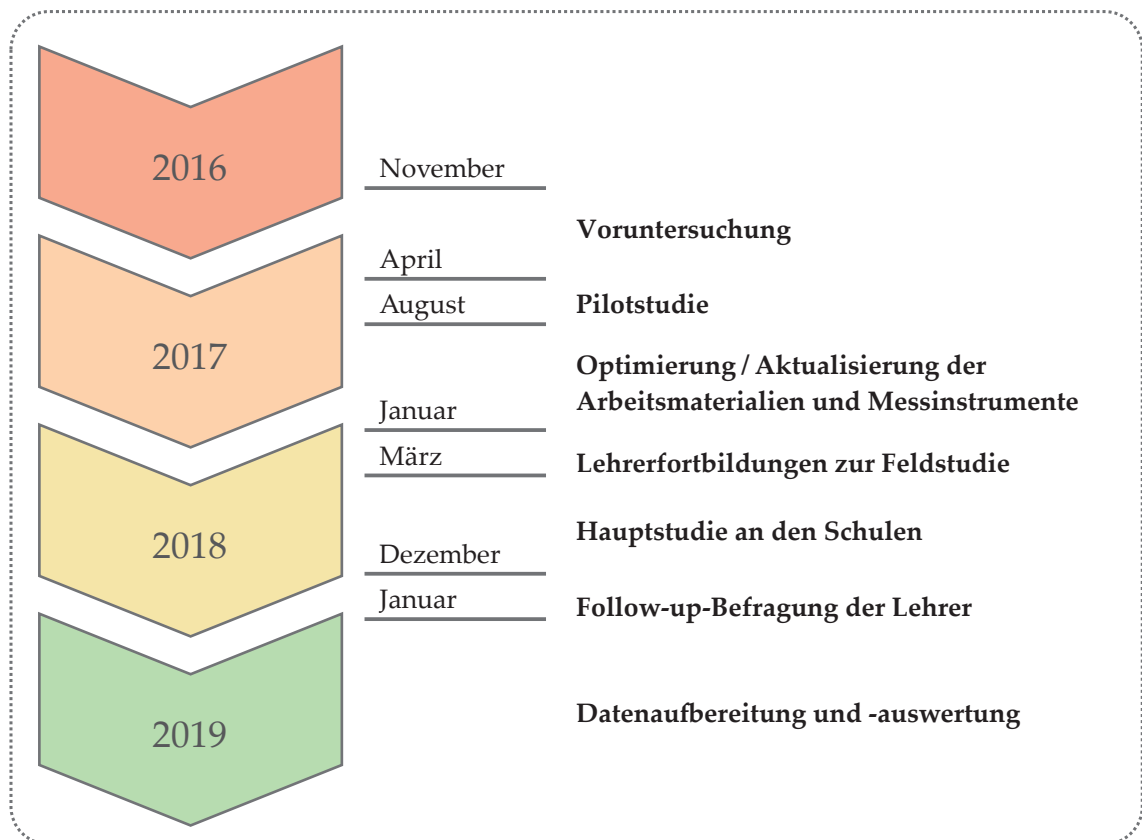


Abb. 79: Positionierung der Hauptuntersuchung im gesamten Zeitplan der Arbeit (nach [521]).

5.3 Pilotstudie

Die Pilotstudie bestand aus fünf Treatment-Gruppen: Zum einen waren es zwei Schülergruppen, die im Rahmen eines *Projektkurses* eines Wuppertaler Gymnasiums ($n = 7$) und der *SommerUni*¹⁵⁵ ($n = 8$) an der Studie teilnahmen, ausgewählte photochemische Experimente und die dazugehörigen Arbeitsmaterialien zum Thema *Farbigkeit und Lichtenergie* testeten. Zum anderen wurden alle Versuche und Materialien zum Thema *Energiekonversion und -speicherung* von drei Gruppen ($\Sigma n = 14 + 10 + 11 = 35$) aus Lehramtsstudierenden des Faches Chemie innerhalb einer Blockveranstaltung durchgeführt bzw. bearbeitet. Dabei war es wichtig, dass sich die Lehramtsstudierenden während der Bearbeitung der Arbeitsblätter in die Rolle eines Schülers versetzen sollten, um im Anschluss daran eine schülerorientierte konstruktive Kritik im Hinblick auf die Optimierung der eingesetzten Arbeitsmaterialien leisten zu können.

Die Pilotstudie fand in den Räumlichkeiten der AG *Didaktik der Chemie* der *Bergischen Universität Wuppertal* statt.

¹⁵⁵ „Die *SommerUni* ist ein Gleichstellungsprojekt der *Bergischen Universität Wuppertal* für Schülerinnen ab Klasse 10 und Abiturienten. Das Programm richtet sich speziell an junge Frauen, die sich für die Aufnahme eines Studiums in den MINT-Fächern, also in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft oder Technik, interessieren.“ [522]

5.3.1 Zielsetzung

Die Pilotstudie ist eine Art Vorstudie, in der die bis dato entwickelten Arbeitsmaterialien und Messinstrumente eingesetzt werden konnten, um sie eventuell zu optimieren und, wenn nötig, im Umfang zu reduzieren oder zu erweitern. Zudem sollten die praktischen Erfahrungen und Ergebnisse bei der Konstruktion der Interventionen für die Hauptstudie richtungsweisend sein. Dahingehend fand eine qualitative Auswertung statt, um die Frage zu klären, inwieweit die für die Hauptstudie entwickelten Materialien noch optimiert werden sollten.

5.3.2 Schlussfolgerungen für die Hauptstudie

Durch die Arbeit während der Pilotstudien mit den unterschiedlichen Treatment-Gruppen konnten im Hinblick auf zeitliche, didaktische und methodische Aspekte Optimierungen vorgenommen werden. Änderungen ergaben sich im Zusammenhang mit den Feedbackbögen, den Arbeitsmaterialien und der Planung der Intervention an den Schulen.

So wurden bereits nach den Einzelstudien mit dem Projektkurs und in der SommerUni die Umfänge der Feedbackbögen für die Schüler reduziert. Außerdem wurden die Aussagen, soweit es möglich war, in die 1. Person Singular umformuliert (vgl. Kap. 5.2.3.2). Durch diese Maßnahmen sollten die in der Pilotstudie aufgetretene vorzeitige Demotivation und das Desinteresse an dem Feedbackbogen verhindert werden, um einer hohen Anzahl von nicht beantworteten Items, dem *Halo-Effekt* oder einer *gedankenlosen Reproduktion* vorzubeugen [73]. Zudem konnte die zum Ausfüllen der Bögen nötige Zeit für die Einzelstudien der Hauptstudie genauer bestimmt werden. Weitere Optimierungen ergaben sich bezüglich der Lernstandserhebungen zu Aufgabe C (s. Kap. 5.2.4.2).

Nach den recht produktiven Diskussionen mit den Lehramtsstudierenden in der Blockveranstaltung konnten nun an den Arbeitsblättern Änderungen auf der didaktisch-methodischen Ebene vorgenommen werden. So konnte beispielsweise die Reihenfolge der Arbeitsaufträge im Hinblick auf die Anforderungsniveaus (vgl. Kap. 4.1.2) sinnvoller gestaltet werden. Zusätzlich mussten einige wenige Aufgaben aus den Arbeitsblättern für die Oberstufe (s. Kap. 4.1.3) so umformuliert werden, dass sie sowohl abiturkonform als auch für den Schüler verständlich waren. Durch die Präsentationsphase der Lösungsergebnisse zu den Arbeitsaufträgen auf den Arbeitsblättern konnten die Erwartungshorizonte zu diesen überarbeitet werden, sodass den Lehrern ausführlichere Informationen gegeben werden konnten.

Generell konnte durch die Pilotstudie die Dauer der Intervention in der Hauptstudie besser kalkuliert werden, sodass den interessierten Lehrern für

den kompletten Einsatz eines Arbeitsmaterials und der Durchführung ein Richtwert von ca. fünf Unterrichtsstunden zur Umsetzung der Studie in ihrem Unterricht angegeben werden konnte. Außerdem wurde durch die Planung und Umsetzung der Pilotstudie die Struktur bzw. wurden die einzelnen Phasen der Intervention vor Ort in den Schulen festgelegt (s. Kap. 5.4.3). So konnte dadurch die Einstiegsphase zum jeweiligen Thema der sechs Arbeitsblätter (s. Kap. 4.1.3) überdacht und schüleraktivierender gestaltet werden. Zur besseren Orientierung wurde zu allen sechs Arbeitsblättern bzw. zu jeder Unterrichtsreihe als Begleitmaterial eine Präsentation mit *Microsoft PowerPoint* erstellt. Sie umfasst unter anderem Informationen zum Umgang mit den Feedback- und den Lernstandserhebungsbögen, Abbildungen für die Einstiegsphase, Fotos von den Beobachtungen der Experimente zur Sicherheit beim Nichtgelingen der Experimente usw.¹⁵⁶

Hinzu kommt, dass Lehramtstudierende darauf hinwiesen, dass eine Erklärung zur Struktur und zum Aufbau der Arbeitsapparate nötig wäre. Dahingehend wurde für die Lehrer eine Datei mit Zusatzinformation erstellt, in der zusätzlich mögliche Unterrichtskonzeptionen beschrieben sind (s. Kap. 9.5.6).

An dieser Stelle soll zudem noch eine weitere Bemerkung, die während der Interventionen entstanden ist, Platz finden: Einige der Studierenden sahen in dem auf den Arbeitsblättern 2, 3/4 und 5 (s. Kap. 4.1.3.2) eingesetzten PBB-Experiment das Potenzial – aufgrund der Beobachtungen dazu (s. Kap. 4.1.1.1.2) und des Farbstoffs Proflavins als Bestandteil der PBB-Lösung – dieses Experiment zusätzlich in das Inhaltsfeld *Organische Werkstoffe und Farbstoffe* aus dem KLP für die Sekundarstufe 2 zu integrieren. Aus Gründen des zeitlich festgelegten Rahmens der Arbeit konnte nicht mehr praktisch weiter darauf eingegangen werden. Durchaus ist es aber eine Überlegung wert, diese Idee als ein Desiderat in den Blick zu nehmen, da auch Lehrer derselben Überzeugung waren (s. Kap. 5.4.2.2; Kap. 5.4.4.2).

5.4 Hauptstudie

Nach den ausführlichen und relativ zeitintensiven Voruntersuchungen steht die Hauptstudie in der induktiven Reihe zur Genese der gesamten explorativen Studie als das letzte praktische Glied. Gleichzeitig umfasst sie zudem den größten praktischen Anteil der Arbeit, die vor Ort an Schulen geleistet wurde. In Anlehnung an unter anderem die *partizipative Aktionsforschung* (s. Kap. 2.1.4.3) wurde dabei ein intensiver Kontakt mit den Schulen bzw. den Chemielehrern als direkte Ansprechpartner gepflegt.

Aufgrund der (mit Blick auf die Anzahl der Forschenden und die zur Verfügung stehende Zeit) relativ hohen Anzahl der teilnehmenden Schulen und Einzelstudien (s. Kap. 5.2.2) war eine ausgesprochene logistische Arbeit und zeiteffektive Koordination der Kooperationen erforderlich. Zur Teilnahme an

¹⁵⁶ Bei Bedarf können auf Nachfrage diese Begleitmaterialien vom Autor bereitgestellt werden.

der Studie wurden alle zu dem Zeitpunkt vom nationalen MINT-Excellence-Network in NRW zertifizierten 81 Schulen und vier weitere Gymnasien eingeladen (s. Kap. 5.4.2). „Dem explorativen Studiencharakter entsprechend, war das Ziehen einer repräsentativen Stichprobe aus der Grundgesamtheit der Schüler in Deutschland nicht vorgesehen“ [523]. Jedoch waren in der Hauptstudie Schüler mit unterschiedlichem Leistungsstand aus unterschiedlichen sozialen Milieus vertreten (s. Kap. 5.2.2).

Da die Hauptstudie mit umfangreicher Organisationsarbeit aus vielen Schritten verbunden war, wurde zur Gewährleistung der *intersubjektiven Nachvollziehbarkeit* in den Kapiteln 5.4.2 bis 5.4.3.1 „der Weg, wie der Forscher zu seinen Ergebnissen gekommen ist und wie Entscheidungen während des Forschungsprozesses begründet sind, transparent“ [524] gemacht.

5.4.1 Zielsetzung

Die Zielsetzung der Arbeit und daran anknüpfend auch die der Hauptstudie wurde bereits im Großen und Ganzen in Kapitel 1.1 und konkreter in Kapitel 5.1 erläutert. Demnach trägt die Hauptstudie die Aufgabe, durch praktische Arbeit vor Ort an den Schulen im Sinne der *nutzenorientierten Grundlagenforschung* (s. Kap. 2.1.4.2) jene Ziele zu erreichen. Auf diesem Weg sollen durch die Hauptstudie die aufgestellten Forschungsfragen aus Kapitel 5.1 beantwortet werden.

Besonders wichtig war im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit der Rückmeldungen der Schüler und Lehrer, dass an der Hauptstudie nicht nur die Lehrer selbst aktiv teilnahmen, sondern auch der Forscher. So war im Sinne des *Designed Based Research* (s. Kap. 2.1.4.3) der Forscher während der Hauptstudie bei etwa der Hälfte der Einzelstudien selbst an den entsprechenden Schulen, um die Unterrichtsintervention und die Befragung durchzuführen. Diese Praxis wird von TAUSCH als ein Sinn der Chemiedidaktik bezeichnet und wie folgt beschrieben:

„Am Puls des Schulalltages horchen – um den sich rasch verändernden Informations- und Kommunikationsgewohnheiten von Kindern und Jugendlichen Rechnung tragen zu können. Für Lehrende in der Fachdidaktik sind die Erfahrungen aus eigener Unterrichtspraxis unerlässlich. Ihre Aussagekraft und Zuverlässigkeit ist weitaus höher als die Ergebnisse von Umfragen. Bei empirischen Erhebungen für kognitionspsychologische [...] Forschungen sollte der direkte Umgang mit Kindern und Jugendlichen in der Schule Selbstverständlichkeit werden.“ [75]

Dabei führten die persönlichen Erfahrungen des Forschers zu unerwartet und ausgesprochen vielen Vorteilen (s. Kap. 7.2).

5.4.2 Organisation der Umsetzung der Studie

Die Absicht war es, innerhalb des zeitlich möglichen Rahmens durch die Hauptstudie eine breite Masse von Schülern und Lehrern mit photochemischen Inhalten zu konfrontieren und deren Meinung dazu einzuholen. Deshalb wurde entschieden, so viele Schulen wie möglich dafür zu gewinnen. Da es verständlicherweise nicht möglich wäre, sämtliche Schulen teilnehmen zu lassen, musste eine bewältigbare Kohorte ausgewählt werden. Da die Materialien (s. Kap. 4) orientiert an den Richtlinien dieses Bundeslandes (s. Kap. 3.2.3.1) entwickelt wurden, war das erste Kriterium, Schulen aus NRW für die Teilnahme anzufragen.¹⁵⁷ So wurde zur optimalen Eingrenzung der Probandenzahl mit Blick auf die zur Realisierung der Hauptstudie zur Verfügung stehende Zeit (vgl. Kap. 5.2.5) und die Überschaubarkeit der Datenmenge entschieden, als Kohorte die zum Netzwerk MINT-EC gehörigen Schulen¹⁵⁸ in NRW zu wählen.¹⁵⁹ Die Teilnehmer-Schulen waren ausschließlich Gymnasien, wodurch ein weiterer variabler Faktor bei der Befragung vermieden werden konnte.

Dadurch, dass die Einzelstudien der Hauptstudie von dem Forscher selbst, aber auch von den Lehrern durchgeführt wurden (s. Kap. 5.4.3), fanden insgesamt 53 Einzelstudien statt, sodass 53 Klassen bzw. Kurse mit den ausgewählten photochemischen Inhalten in Kontakt kamen (s. Kap. 5.2.2). Dabei wurde darauf geachtet, dass jedes Arbeitsblatt mindestens zweimal eingesetzt wurde und zu jenen Interventionen die Feedbackbögen verwertbar waren.

5.4.2.1 Projektausschreibung

Zur Kontaktaufnahme mit den Schulen wurde ein Projektangebot ausgeschrieben (s. Kap. 5.4.2.1). Hierfür wurde ein Brief (s. Kap. 9.8.1) mit den nötigen Informationen vorbereitet und den ausgewählten Schulen postalisch gesendet. Die ersten 20 interessierten Schulen, die sich innerhalb der festgesetzten Frist gemeldet hatten, bekamen die nötige experimentelle Ausstattung (s. Kap. 9.8.1) gratis. Die Lehrer sollten zudem angeben, zu welchen der angebotenen photochemischen Themen (s. Kap. 4.1.3, Abb. 70) sie die Studie durchführen würden. Für die Rückmeldung bekamen die Lehrer ca. einen Monat Zeit. Die Fachvorsitzenden für Chemie, die sich bis eine Woche nach Zusendung des Briefes nicht gemeldet hatten, wurde per Mail noch einmal auf

¹⁵⁷ Jedoch bedeutet dies nicht, dass die ausgewählten photochemischen Experimente zwangsläufig nur in den CU in NRW integriert werden können (vgl. Kap. 3.2.3).

¹⁵⁸ „MINT-EC ist das nationale Excellence-Netzwerk von Schulen mit Sekundarstufe 2 und ausgeprägtem Profil in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik (MINT). Das Netzwerk mit derzeit 325 zertifizierten Schulen mit rund 344.000 Schülerinnen und Schülern sowie 28.000 Lehrkräften steht seit 2009 unter der Schirmherrschaft der Kultusministerkonferenz der Länder (KMK)“ [525].

¹⁵⁹ Über *Gatekeeper* wurden zusätzlich noch vier weitere Gymnasien kontaktiert, die an der Studie teilnahmen.

das Angebot aufmerksam gemacht, sodass dadurch noch weitere Schulen für die Hauptstudie gewonnen werden konnten (s. Kap. 5.2.2). Einige Lehrpersonen meldeten sich telefonisch und informierten sich detaillierter über die konkrete Umsetzung und die Studie.

In einem zweiten Brief (s. Kap. 9.8.2) erhielten die Schulen bzw. der Ansprechpartner dann die Bestätigung zur Teilnahme, zum Erhalt der unentgeltlichen Ausstattung und zusätzliche Informationen. Zudem wurden alle in die Studie involvierten Lehrer zu einer praktischen Einführungsveranstaltung in Form einer Lehrerfortbildung eingeladen (s. Kap. 5.4.2.2). Die Lehrer meldeten sich entweder per Mail oder auch telefonisch für die Veranstaltung an. Je nach Wahl der Themen durch die Lehrer wurde ein Paket mit der nötigen Ausstattung vorbereitet und mit samt Zusatzinformationen zur Umsetzung der Studie (s. Kap. 9.8.3) versendet. Insgesamt nahmen 18 Schulen an der Studie teil. Schulen, die sich für die Teilnahme an der Studie anmeldeten und die Materialien erhielten, aber keine Rückmeldung bezüglich der durchzuführenden Befragung gaben, wurden gebeten, die ihnen ausgehändigten Experimentiermaterialien wieder der Universität zurückzusenden.

5.4.2.2 Lehrerfortbildungen zu den PHOTO-LIKE-Materialien

Zur praktischen Einführung in die Materialien, die in der Hauptstudie im Unterricht einzusetzen waren, wurden dreistündige Lehrerfortbildungen vorbereitet und angeboten. Damit so viele Lehrer wie möglich teilnehmen konnten, wurden vier Termine angeboten. So nahmen von den 18 teilnehmenden Schulen 16 Lehrer teil. Einige Lehrer meldeten sich aus Krankheitsgründen oder wegen parallel stattfindender schulischer Veranstaltungen ab. Teilnehmenden Lehrern konnte direkt vor Ort die Ausstattung (s. Kap. 9.8.1) unentgeltlich ausgehändigt werden. Den restlichen Schulen wurde sie per Post zugesendet.

Die Fortbildung bestand aus vier Abschnitten:

<p>1. Input zu den Arbeitsmaterialien</p> <p>Anhand von didaktisch-methodischen Überlegungen wurde das Layout der Arbeitsmaterialien erklärt. Zudem wurden mögliche Unterrichtskonzepte für deren Einsatz angegeben, welche verschriftlicht und den Lehrern online zur Verfügung gestellt wurden (s. Kap. 9.5.6).</p>
<p>2. Vorstellung der Ausstattung und der Online-Materialien</p> <p>Die einzelnen Materialien und Chemikalien in der Ausstattung für die photochemischen Experimente wurden vorgestellt, der Zweck und die Einsatzmöglichkeiten geklärt. Zudem wurden die Online-Materialien – wie Lehrfilme, das Glossar, die Erwartungshorizonte zu den Arbeitsblättern – gesichtet und in den Themen verortet [526].</p>
<p>3. Briefing zur Evaluation</p> <p>Den Lehrern wurden die Messinstrumente und deren Funktion zunächst vorgestellt. Im Hinblick auf deren Einsatz wurde der Ablauf einer Einzelstudie besprochen und Hinweise beim Einsatz der Feedback- und der Lernstandserhebungsbögen gegeben (s. Kap. 9.8.3).</p>

4. Input zu den Arbeitsmaterialien

Abschnitt 4 war der zeitintensivste Abschnitt. Die Experimente wurden je nach Oberthema (s. Kap. 4.1.1.1.2) aufgeteilt und in diesen zwei Blöcken thematisiert. Zuerst wurden die photochemischen Experimente zum Oberthema *Farbigkeit und Lichtenergie* und im Anschluss die zum Oberthema *Energiekonversion und -speicherung* durchgeführt und ausgewertet.

Im Anschluss an den vierten Abschnitt wurden noch Fragen seitens der Lehrer geklärt und ihre Anregungen und Anmerkungen aufgenommen:

- Beispielsweise bedankte sich eine Lehrerin in etwa wie folgt: „Ich bin dankbar dafür, weil ich jetzt nach 25 Jahren Farbstoffe im Unterricht behandeln muss und da hat sich das hier gut ergeben“. Am nächsten Tag meldete sich diese Lehrerin und teilte mit, dass sie mit der Taschenlampe aus der Ausstattung (s. Kap. 9.8.1) sehr zufrieden sei und sie direkt acht weitere von der angegebenen Quelle bestellt habe.
- Eine weitere Lehrperson merkte an, dass das Arbeitsblatt 2 zum Thema *Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment für Stoff- und Energieumsätze* (s. Kap. 4.1.3.2) auch in der 9. Klasse im Biologieunterricht zum Thema Photosynthese eingesetzt werden könnte (vgl. Kap. 7.1).
- Ein Lehrer gab an, dass bereits ein Schüler von ihm zur PBB-Konzentrationszelle (s. Kap. 4.1.1.1.2) eine Facharbeit in der Oberstufe schrieb.
- Die PBB-Konzentrationszellen gewannen so viel Aufmerksamkeit von der Lehrerschaft, dass sich einige weitere Lehrer dafür begeisterten und das entsprechende Arbeitsblatt im Unterricht einzusetzen wünschten, sodass ihnen vor Ort einige dieser Aufbauten mitgegeben wurden.
- Das Thema *Solvatochromie* (s. Kap. 4.1.1.1.2; Kap. 4.1.2.1) wurde von einem der teilnehmenden Lehrer als ein mögliches Vorabi-Klausurthema betrachtet.
- Lehrer sahen als Motivation zur Teilnahme an der Studie unter anderem die Chance, der Universität eine Rückmeldung zu ihrer Forschung für den Unterricht zu geben.



Abb. 80: Ausschnitte aus der Fortbildung zur praktischen Einführung.

5.4.2.3 Schulische Rahmenbedingungen

Die Unterrichtsinterventionen fanden mit einer Ausnahme¹⁶⁰ in allen Schulen in einem intakten Chemieraum statt. Da in den Experimenten d, e und h (s. Kap. 4.1.1.1.2) das Lösemittel Xylol verwendet wird und somit Aspirationsgefahr besteht [527], war ein funktionsfähiger Abzug dafür nötig. Für die Kältemischung, die für die Experimente h und i gebraucht wird, wurde das Eis entweder von der Lehrperson bereitgestellt oder von dem Forscher aus dem Handel in Beuteln als Crushed Ice gekauft mitgebracht.

Der Einsatz der PowerPoint-Präsentation als Begleitmaterial (s. Kap. 5.3.2) zum Unterricht bzw. zur gesamten Einzelstudie lief problemlos, da die Chemieräume mit jeweils einem Beamer und einer entsprechenden Projektionsfläche ausgestattet waren.

Materialien, die auch in der Ausstattung enthalten waren, wurden für die Einzelstudien, die der Forscher selbst an den Schulen durchführte, die nicht die Materialien gratis erhielten, von der Universität für diese Schulen bereitgestellt. Alle weiteren Materialien wie Reagenzglasständer, Teclubrenner usw., mit denen die Chemieräume üblicherweise ausgestattet sind, wurden von der Schule bereitgestellt.

5.4.3 Vorgehensweise bei der Umsetzung der Studie

Die Absicht der Hauptstudie war es, wie bereits erwähnt (s. Kap. 5.4.2), eine hohe Anzahl an Schülern zu erreichen. Jedoch wäre dies in der für die Studie zur Verfügung stehenden Zeit für einen Forscher sehr schwierig bis nicht realisierbar gewesen. Eine der Forderungen, die BURKHARDT und SCHOENFELD [81] somit an die erziehungswissenschaftliche Forschung stellen und die FISCHER et al. [77] auf Aspekte des *Forschungs-Praxis-Transfers* beziehen, ist die *geeignete Teamgröße*:

„Aufgaben wie das ‚Hochskalieren‘ von Interventionen, die im kleinen Rahmen systematisch erforscht wurden, sind klassische Doktoranden-Projekte nicht mehr gewachsen: vielmehr kann dies teilweise nur von wesentlich größeren Forschungsteams als bisher geleistet werden.“ [77]

Neben der Eigenerfahrung, die die Lehrer erlangen sollten, wurde diese Forderung schließlich ein weiterer Grund dafür, dass ein beachtlicher Anteil der Einzelstudien von den Lehrern selbst durchgeführt wurde (s. Kap. 5.2.2).

Auch die Forderung nach *robusten Mechanismen zur Übertragung von Ideen aus dem Labor in die breite Anwendung* wurde hier berücksichtigt. Demnach muss konkret „durch erfolgreiche Forschungsprojekte nachgewiesen [werden], dass diese Art der Überführung [von Photochemie]

¹⁶⁰ Da der Chemieraum von einer anderen Lehrperson für den Unterricht eingeplant war, fand die Studie in einem normalen Klassenzimmer statt. Bestimmte Substanzen wurden deshalb bereits vor der Intervention in die entsprechenden Schraubdeckelgläser gefüllt und geschlossen mit in den Unterricht genommen.

in die Anwendung gelingen kann“ [77]. Dies wiederum wäre nur dann möglich, wenn unter den realen Bedingungen des Schulunterrichts die photochemischen Experimente und Inhalte ihren Platz bekommen. Deshalb war es, wie bereits an anderer Stelle erklärt, umso wichtiger, dass die Einzelstudien in der Schule stattfanden und sogar zu den üblichen Unterrichtsstunden. Das bedeutet, dass nicht eigens Unterrichtsstunden geblockt wurden, sondern im regulären zeitlichen Ablauf des Faches Chemie die Intervention umgesetzt wurde.¹⁶¹ Eine weitere praktische Folge dieser Forderung war es, dass den Lehrern, die an der Studie teilnahmen, die Freiheit gegeben wurde, darüber zu entscheiden, welche Unterrichtsmethoden oder Sozialformen sie bei der Umsetzung der Studie nutzen und wie viel des Arbeitsblatts sie einsetzen wollten. Der Sinn war eben, eine realistische Umsetzung zu veranlassen, die Erfolg versprechen sollte, da der Lehrer seine Lerngruppe und die Bedingungen, unter denen er arbeitet, am besten kennt (s. Kap. 4). Somit haben die Arbeitsblätter lediglich einen Rahmen vorgegeben, wobei die Lehrer selber über die Umsetzung in ihrem Unterricht entscheiden durften.

5.4.3.1 Didaktisch-methodische Vorüberlegungen

Für den praktischen unterrichtlichen Einsatz bzw. die Integration photochemischer Experimente in den Unterricht bedarf es selbstverständlich mehr als des Experiments selbst. In diesem Kapitel werden die didaktisch-methodischen Überlegungen zu den Unterrichtsinterventionen der Feldstudie erläutert.

Zwar sind die Arbeitsblätter nach bestimmten bildungswissenschaftlichen Erkenntnissen konzipiert worden (s. Kap. 4.1.2), jedoch gibt deren Aufbau (s. Kap. 4.1.3, Abb. 70) auf keinen Fall eine feste Struktur für den Unterricht vor. HELMKE argumentiert wie folgt:

„Ein und derselbe Unterricht kann für einen Teil der Schülerinnen und Schüler günstig, für einen anderen Teil eher von Nachteil sein. Schüler mit geringerem Vorkenntnisniveau und geringerer Sprachkompetenz benötigen beispielsweise deutlich mehr Vorgaben und Feedback als leistungsstärkere. Letztere profitieren mehr von offenen Lernsituationen und entdeckendem Lernen. Aber grundsätzlich gilt: Der Forscher liefert keine stromlinienförmig umsetzbaren Handlungsanweisungen für den Unterricht, geschweige denn Rezepte, sondern ermöglicht eine Sensibilisierung des Lehrenden für wichtige Einflüsse auf das Unterrichtsgeschehen“ [528].

¹⁶¹ Es kam zu zwei Ausnahmen. Bei der Teilnahme von zwei Oberstufenkursen einer Schule planten die Lehrer eine Blockveranstaltung ein. Die andere Ausnahme fand statt, weil die Lehrerin die Veranstaltung als einen Projekttag in die Projektwoche der Schule legte.

In diesem Sinne soll das Layout der Arbeitsblätter allenfalls je nach Bedarf hilfreich bei der Unterrichtsplanung sein. Also wurde den Lehrpersonen kein Unterrichtskonzept bei der Umsetzung der Studie bzw. dem Einsatz der Arbeitsmaterialien vorgeschrieben (vgl. Kap. 4, Unterrichtsentwurf). Sie entschieden selbst über die Umsetzung, d.h. über die für den Unterricht und die Schüler passenden Unterrichtsmethoden und die Gestaltung im Allgemeinen. Denn es musste davon ausgegangen werden, dass jeder Lehrer selbst seine Lerngruppen mit ihren Stärken und Schwächen am besten kennt. Durch den Verzicht auf eine strikte Vorgabe eines Unterrichtskonzepts wird der Einsatz der photochemischen Experimente (s. Kap. 4.1.1.1) begünstigt, da der Lehrer somit deren Integration den eigenen schulischen Konditionen angepasst durchführen kann. Somit wäre eine "totale Umwälzung" der schulischen Bedingungen und des eigenen Chemieunterrichts (vorerst) hierfür nicht erforderlich. Das Hauptaugenmerk liegt, wie bereits erläutert (s. Kap. 4), auf dem Einsatz der photochemischen Experimente und nicht auf dem Testen einer Unterrichtskonzeption o.ä.

Jedoch hat der Forscher für alle Einzelstudien, die er selbst umgesetzt hat, orientiert an dem Aufbau der Arbeitsblätter (s. Kap. 4.1.3, Abb. 70; Kap. 4.1.2, g) einen arbeitsblattunspezifischen pragmatischen Aufbau der Unterrichtsintervention für die Einzelstudien aus sieben Phasen entwickelt (s. Abb. 81).

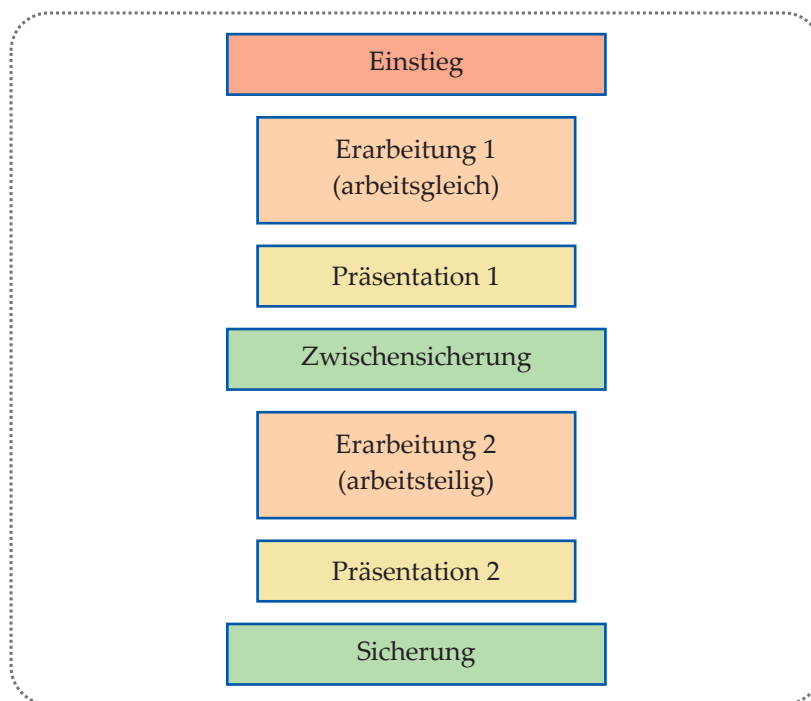


Abb. 81: Aufbau der Unterrichtsintervention für die Einzelstudien.

Im Folgenden sollen wichtige Überlegungen dazu erläutert werden:

- a. Der Einstieg (s. Abb. 81) dient zur Aktivierung des **Vorwissens** (vgl. [529]) und soll zudem **Transparenz** schaffen [466, 530]. Erstere wird dadurch gewährleistet, dass mithilfe von Abbildungen über das bereits vorhandene Vorwissen (vgl. Kap. 4.1.2, g) der Schüler das Thema der Stunde hergeleitet wird. Diese befinden sich in der für jedes Arbeitsblatt als Begleitmaterial für den Schulunterricht erstellten *PowerPoint*-Präsentation (vgl. 5.3.2). Nach der Hinführung zum Thema wurde der Ablauf der Unterrichtsintervention mit einem Tafelanschrieb den Schülern offengelegt, sodass sie jederzeit erfahren konnten, in welcher Phase des Unterrichts sie sich befinden. Dadurch sollte eine *informative Atmosphäre* begünstigt werden, da es nach JAHNKE „selbstverständlich ist, dass Schüler immer wissen sollten, worum es gerade geht“ [471] (vgl. 4.1.2, g). „Die Schüler sollten über die Lernziele und Lerninhalte aufgeklärt werden. Kaum eine Methode führt mehr zum Thema hin als die Ankündigung des Themas und des Vorgehens. Die Schüler wissen dann stets, wo sie im Thema [und in der Unterrichtsstunde] stehen und wo es hinführen soll“ [530].
- b. In beiden Erarbeitungsphasen ist die Gruppenarbeit als **Sozialform** gewählt. Die Kleingruppen bestanden in den meisten Fällen aus drei Personen; in Ausnahmen auch aus zwei oder vier Personen. Die Begründung hierfür leistet DIETRICH et al. im Zusammenhang mit der Bedeutung der Arbeitsgruppe für das **kooperative Lernen**:

„In der Arbeitsgruppe ergeben sich unmittelbare Erfahrungen über die Anzahl der Teilnehmer an einer Kooperation. Mit dreien wird jenes Verhältnis erreicht, das die Intimität einer Zweierbindung überwindet und mit dem dritten gleichzeitig das notwendige sachliche Korrektiv schafft. Wenn auch bei vier Teilnehmern die Neigung sichtbar wird, sich in zwei Paare aufzulösen, so ist doch Zusammenarbeit und Mitarbeit jedes einzelnen immer noch genügend gesichert.“ [531]

Beispielsweise wurden zur Nutzung der digitalen Materialien, wie der Lehrfilme, Animationen, des Glossars usw., die in die Aufgaben integriert waren, jeder Gruppe jeweils ein Tablet-PC mit einem Adapter für den Anschluss von mehreren Kopfhörern ausgeteilt. Unter anderem dadurch wurden somit den Schülern kooperative Lernsituationen angeboten, wodurch wegen ihrer unterschiedlichen Lernvoraussetzungen ein hohes Maß an Handlungsabstimmung gefordert wird [532]. So wird aus sozio-konstruktivistischer Perspektive beim kooperativen Unterricht „das Wissen nicht vom Lehrer an einen Lerner vermittelt, sondern von Individuen in gemeinsamen Aushandlungsprozessen aktiv konstruiert“ [533].

- c. „Entscheidend für gegenseitige Hilfestellungen zwischen den Schülern ist nicht der permanente Wechsel der Sozialform des Unterrichts (Allein-,

Partner-, Gruppenarbeit), sondern das Vorhandensein eines **offenen Lernklimas**, das es dem einzelnen Schüler erlaubt, jederzeit [...] die Hilfe seiner Nachbarin in Anspruch zu nehmen“ [534]. Zur „Förderung der Lernbereitschaft und Lernaktivität“ wurde deshalb darauf geachtet, dass insbesondere folgende zwei Charakteristika einer *günstigen Lernatmosphäre* nach JAHNKE erreicht wurden: **Unterstützende und Selbstständigkeit fördernde Atmosphäre** [471]:

„Schüler zur Selbstständigkeit und Verantwortlichkeit zu führen[,] ist ein so allgemeines Ziel, dass es sich vorzüglich für Präambeln und Schulgesetze zu eignen scheint“. „Wenn Selbstständigkeit gefördert werden soll, dann gehört dazu auch Hilfe und Unterstützung. Es wäre ein Mißverständnis, wollte man Selbstständigkeit nur darin sehen, dass der Schüler möglichst sich selbst überlassen bleibt und zusehen kann, wie er allein seine Probleme löst. Sinnvolle, motivationsfördernde Hilfe und Unterstützung muß allerdings die Grenze zur Verwöhnung und zur Gängelung sehr genau beachten.“

Gerade in offenen Arbeitsphasen tragen Schüler mehr Verantwortung für ihren Lernprozess, die zur höheren Selbstkontrolle und Selbstständigkeit führt [535]. Durch das offene Lernklima in den intensiven Erarbeitungsphasen wurde somit nach HILLE auch dem Wunsch der Schüler nach einem „Mindestmaß an Mitbestimmung“ [536] nachgegangen. Zu dessen konkreter Förderung wurden für das Experimentieren innerhalb der Erarbeitungsphase bewusst keine Experimentierkisten mit den dafür nötigen Materialien vorbereitet, sondern die Materialien wurden meist auf dem Lehrerpult¹⁶² ausgelegt, sodass die Schüler in Absprache mit ihren Gruppenmitgliedern durch Arbeitsteilung und den Informationen zum Experiment auf dem entsprechenden Arbeitsblatt die nötigen und richtigen Materialien und Chemikalien selbstständig finden und zum Arbeitsplatz bringen sollten.¹⁶³

Außerdem werden durch die Wahl der Gruppenarbeit als Sozialform bzw. der offen gestalteten Erarbeitungsphasen Lehr-Lern-Situationen zwischen Schülern im Sinne des Prinzips *Lernen durch Lehren* begünstigt (vgl. RENKL [537]), welches von COMENIUS [538] selbst wie folgt anerkannt wird:

„Denn sehr wahr ist das bekannte Wort: Wer andere lehrt, unterrichtet sich selbst; nicht nur weil er durch Wiederholung das Aufgefaßte in sich befestigt, sondern auch Gelegenheit erlangt, tiefer in die Dinge einzudringen (...) Daher bezeugt der geistreiche Joachim Fortius von sich, was er immer bloß gehört oder gelesen habe, das sei ihm schon in

¹⁶² Lösemittelhaltige Gemische wurden zum Abfüllen in kleinere Gefäße in den Abzug gestellt.

¹⁶³ Nach ROSSA ist „prinzipiell abzulehnen, die Versuche schon vor der Stunde bis in alle Einzelheiten auf dem Experimentiertisch aufzubauen oder bei Schülerübungen das Material so bereitzustellen, daß die Schüler mitunter den Versuch nur in Gang zu setzen brauchen“ [413].

Monatsfrist entfallen; was er aber andere gelehrt habe, das könne er so herzfählen wie seine Finger, und nach seiner Überzeugung könne nur der Tod es wieder entreißen. Deshalb rät er demjenigen, der in seinen Studien große Fortschritte machen wolle, sich Schüler zu suchen, um sie täglich in dem, was er lernt, zu unterrichten, und müßten sie auch mit Gold erkaufte werden.“ (zitiert nach [537])

Eine aktuelle Bestätigung dieser Vorteile geben STERN und SCHUMACHER: „Je häufiger eine Verbindung zwischen zwei Knoten aktiviert wird, desto größer wird die Assoziationsstärke zwischen den betreffenden Inhalten“ [539]. Folglich wird dadurch intelligentes Wissen gewonnen, da innerhalb der Diskussionen der Gruppenarbeit das bereits vorhandene Wissen umstrukturiert und an neue Anforderungen bzw. Kontexte angepasst werden muss, sodass Wissen vielfältig vernetzt wird und somit dessen schnellere Aktivierung gefördert wird [539].

- d. Während die erste Erarbeitungsphase arbeitsgleich verläuft, um zuerst ein gewisses Basiswissen für die Vertiefung bzw. die Spezialisierung in der zweiten Erarbeitungsphase zu sichern, werden in Letzterer den Kleingruppen unterschiedliche Unterthemen zur Erarbeitung gegeben, sodass arbeitsteilige Gruppenarbeit angelegt wird.
- e. Im Sinne des *forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens* [421] und seines didaktischen Prinzips des *Lernens aus Interesse* (s. Kap. 4.1.1.1.1) wurden die Schüler während der Erarbeitungsphase im Hinblick auf neue experimentelle Vorschläge und Ideen ihrerseits bekräftigt.
- f. In den Präsentationsphasen stellen die Kleingruppen vor der gesamten Lerngruppe ihre Ergebnisse vor. Die Schüler bekommen nun im Plenum die Gelegenheit, weitere Fragen zu stellen und Verständnisschwierigkeiten zu klären. Somit bietet die „Präsentation der Lernprodukte [...] Anknüpfungspunkte für ein Lerngespräch“ [476]. Schließlich dient die Sicherungsphase zur möglichen Korrektur und Vervollständigung der eigenen Ergebnisse.

5.4.3.2 Umsetzung durch die Lehrpersonen

Lehrern wurden mögliche Unterrichtskonzeptionen zwar als Empfehlung mitgeteilt (s. Kap. 5.3.2), jedoch waren diese nicht verpflichtend (s. Kap. 4, g; Kap. 5.4.3; Kap. 5.4.3.1). Ausgehend davon haben die Lehrer selbst über die didaktisch-methodische Art und Weise der Umsetzung des Einsatzes der Arbeitsmaterialien und dessen Ausmaß entschieden.

Alle Lehrpersonen, die die Einzelstudien selbstständig ohne die Anwesenheit des Forschers durchgeführt hatten, wurden vorher gebeten, ihre Vorgehensweise, die geplanten Unterrichtsphasen und ihre gewählten Methoden zu protokollieren (s. Kap. 9.8.1). Bei der Durchsicht dieser Protokolle wurde festgestellt, dass alle Lehrer bei der Entwicklung des Unterrichtsaufbaus sich an

dem Layout des jeweiligen Arbeitsblatts orientierten. Dies impliziert, dass somit die vorgeschlagenen Unterrichtskonzeptionen (s. Kap. 5.3.2; Kap. 9.5.6; vgl. Kap. 5.4.3.1, Abb. 81) zum größten Teil ihre Zustimmung fanden. Laut Angaben wurden von den Lehrpersonen durchschnittlich drei 45-minütige Schulstunden für das Unterrichten des Themas des jeweiligen Arbeitsblatts genutzt.

5.4.4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Ingesamt konnten die Rückmeldungen aus 36 Einzelstudien zur Generierung der Ergebnisse verwendet werden (s. Kap. 5.2.2). Die Anzahl der gewählten Themen setzt sich wie folgt aus den sechs zur Verfügung stehenden Themen (s. Kap. 4.1.3) zusammen:

Thema	1	2	3	4	5	6
Anzahl	4	5	5	8	9	5

Tab. 43: Die für die Einzelstudien durch die Lehrer entschiedenen Themen aus PHOTO-LIKE (s. Kap. 4.1.3).

Die Themen 4 und 5 (vgl. Kap. 5.4.2.2) stießen auf besonders großes Interesse. Insgesamt waren mehr Treatment-Gruppen aus der Oberstufe an der Studie beteiligt als aus der Unterstufe.

Innerhalb des Zeitraums Februar bis Juni 2018 wurden vom Forscher 34 Schulen besucht und insgesamt 84 45-minütige Schulstunden für Forschungszwecke genutzt. Es wurden bei 19 von dem Forscher selbst betreuten Treatment-Gruppen (s. Kap. 5.2.2) pro Einzelstudie, ohne die Evaluationzeit einzukalkulieren, im Durchschnitt 4 45-minütige Schulstunden unterrichtet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Hauptstudie zusammengetragen, indem die Lernstandserhebungen¹⁶⁴ der Schüler und – für das Ziel (s. Kap. 1.1) dieser explorativen Arbeit viel bedeutender – die direkten Rückmeldungen der Schüler und Lehrer durch die Feedbackbögen ausgewertet werden.¹⁶⁵ Ergänzt, bestätigt oder verglichen werden diese Auswertungen mit den Beobachtungen des Forschers während der Feldstudien. Diese Herangehensweise dient der chronologischen Beantwortung der Forschungsfragen der Hauptuntersuchung (s. Kap. 5.1). Zuvor wurden in Kapitel 5.2.3.1 alle in den Feedbackbögen vorkommenden Items den vier Erfolgsindikatoren von COBURN (s. Kap. 2.1.2) zugeordnet. Daran orientiert werden im Folgenden die Forschungsfragen beantwortet.

¹⁶⁴ Auf Nachfrage kann in alle Lernstandserhebungen und Feedbackbögen eingesehen werden.

¹⁶⁵ Alle hier zur Analyse verwendeten deskriptiven Statistiken befinden sich tabellarisch im Anhang (s. Kap. 9.7).

5.4.4.1 Lernerperspektive

19 der 36 Einzelstudien wurden von dem Forscher (ES_F) in den ihm unbekanntem Lerngruppen an neun unterschiedlichen Schulen, und die restlichen 17 Einzelstudien von unterschiedlichen Lehrpersonen (ES_L) in ihrem eigenen Chemieunterricht durchgeführt (s. Kap. 5.2.2). Zwar ist der „grundsätzliche Einfluss der Lehrperson auf das Ansehen und die Beliebtheit des Faches [...] unbestritten“ [402] (vgl. [540]), jedoch kann beim Vergleich der Beurteilung der in den Schüler-Feedbackbögen gestellten einzelnen Items ($I_{x_{S1}} \wedge I_{x_{S2}}; x \in \{1,2,4,6,7,8,9,13\}$) (s. Kap. 5.2.3.1) bzw. Aussagen festgehalten werden, dass insgesamt die durchschnittliche Beurteilung bei einer 10-stufigen Skala eine Differenz im Durchschnitt von lediglich 0,44 Skalenpunkten hat. Die Werte der ES_F ($n = 345$) und der ES_L ($n = 147$) unterscheiden sich demnach kaum (s. Tab. 44).

Item	M (ES_F)	M (ES_L)	Δ ES
I1	7,99	7,81	0,18
I2	8,78	8,32	0,46
I4	5,78	6,41	0,63
I6	7,96	7,05	0,91
I7	6,85	6,83	0,02
I8	8,01	7,13	0,88
I9	7,35	6,79	0,56
I13	2,25	2,18	0,07

Tab. 44: Mittelwerte M (ES_F) und M (ES_L) der Beurteilung von Aussagen (s. Kap. 5.2.3.1) in den Schüler-Feedbackbögen und deren Differenz Δ ES.

Genauso wurden auch die Mittelwerte der Schülerbeurteilungen in den Einzelstudien abhängig vom Arbeitsblatt ($AB_x; x \in \{1,2,3/4,5,6,7\}$) verglichen (s. Kap. 5.4.4.1) (s. Tab. 45). Auch dabei zeigte sich eine geringe durchschnittliche maximale Differenz von 1,18 Skalenpunkten, sodass auf die arbeitsblattspezifischen Analysen der Daten verzichtet wurde.

Item	M (AB1)	M (AB2)	M (AB3/4)	M (AB5)	M (AB6)	M (AB7)	Δ_{\max}
I1	—	—	7,69	8,06	8,25	7,92	0,56
I2	—	—	8,38	8,73	8,43	9,22	0,84
I4	5,49	4,76	6,63	6,68	7,34	5,08	2,58
I6	7,36	7,61	7,85	8,34	7,19	7,54	1,25
I7	5,61	6,27	7,37	7,23	7,88	7,11	2,27
I8	7,66	7,61	7,85	8,34	7,19	7,54	1,34
I9	6,69	7,06	7,53	7,81	6,69	7,28	1,12
I13	2,17	2,22	2,25	2,29	2,28	2,14	0,15

Tab. 45: Mittelwerte der Beurteilung von Aussagen (s. Kap. 5.2.3.1) in den Schüler-Feedbackbögen je AB und die maximale Differenz Δ_{\max} .

Somit konnten zur Auswertung aus den beiden oben aufgeführten Gründen alle erhobenen Daten der 478 Schüler-Feedbackbögen aus den 36 Einzelstudien sowohl unabhängig von den Personen, die die Studien durchführten (Forscher, Lehrer), als auch unabhängig vom Arbeitsblatt zusammengeführt und dementsprechend analysiert werden.¹⁶⁶

F.1. Zeigt sich eine individuelle Akzeptanz photochemischer Inhalte und die Verinnerlichung von neuem Wissen darüber? (*Identifikation*)

Zur Beantwortung dieser Frage wurden aus den Feedbackbögen folgende drei Items zum persönlichen Empfinden der Schüler herangezogen (s. Kap. 5.2.3).

I6: *Das ausgewählte Thema und die entsprechenden Experimente fand ich interessant und sie haben mir Spaß gemacht.*

I7: *Ich konnte beim Bearbeiten der Aufgaben zu den Experimenten mein Wissen aus dem Unterricht zuvor anwenden.*

I8: *Ich habe beim Bearbeiten der Aufgaben und Durchführen der Experimente Neues dazugelernt.*

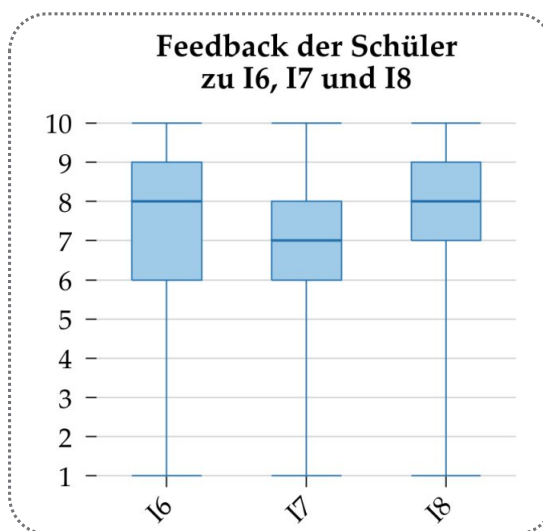


Abb. 82: Darstellung der Verteilung von Schülerbewertungen zu den Items I6, I7, I8 aus dem Feedbackbogen.

Alle drei Aussagen werden von den Schülern ($n_{I6} = 490$; $n_{I7} = 445$; $n_{I8} = 464$)¹⁶⁷ bei einer 10-stufigen Skala im Durchschnitt mit einem Wert über 6 Skaleneinheiten ($M_{I6} = 7,69$; $M_{I7} = 6,89$; $M_{I8} = 7,74$) bewertet (s. Abb. 82).

Sowohl die Auswertung als auch die Beobachtungen während der Einzelstudien zeigten, dass es den Lernenden „Spaß“ machte, sich mit den vorgesehenen Inhalten praktisch zu beschäftigen. Außerdem setzten sie aus dieser Motivation heraus die Lernhandlung durch die Verschriftlichung ihrer Beobachtungen (s. Abb. 83) fort, sowie durch die Bearbeitungen der Aufgaben (s. Abb. 84) und auch konkreter Fragestellungen zu photochemischen Inhalten (vgl. [541]). Nach MANDL und FRIEDRICH heißt es: „Diese Form von Motivation ist optimal, da Lerner positive Emotionen beim Lernen erleben und sich gern erneut und auf längere Zeit mit dem Unterrichtsmaterial beschäftigen. Sie werden auch von sich aus neue, schwierigere Lernziele suchen“ [541]. Beispielsweise wurde bei den Einzelstudien zum Arbeitsblatt 5 das entsprechende Thema mit Blick auf die Inhaltsfelder in dem KLP der Oberstufe aus elektrochemischer Perspektive betrachtet (s. Kap. 4.1.3.2). Da das Inhaltsfeld *Organische Produkte – Werkstoffe und Farbstoffe* fast

¹⁶⁶ Alle im Folgenden angesprochenen, jedoch nicht näher analysierten Daten, können bei Bedarf vom Autor bereitgestellt werden.

¹⁶⁷ Hierzu wurden auch die Feedbackbögen aus der Pilotstudie ($n = 15$) berücksichtigt.

ausnahmslos nach dem Inhaltsfeld *Elektrochemie* meist in dem zweiten Jahr der Qualifikationsphase thematisiert wird, fand eine vertikale *didaktische Reduktion* [542] bzw. eine quantitative Inhalts-Reduktion im Sinne von STARY [543] statt. Somit wurde bei den Interventionen zum Arbeitsblatt 5 nicht auf die Wirkung der Lichtabsorption auf den Zusammenhang zwischen Farbigkeit und Molekülstruktur eingegangen. Jedoch wurden diesbezüglich dennoch seitens der Oberstufenschüler aufgrund der überraschenden Beobachtungen (s. Kap. 4.1.1.1.2, Tab. 31 i, k) und (der dadurch geweckten) Neugier auf deren chemische Erklärung bemerkenswerterweise auch Fragen gestellt.¹⁶⁸ Dieses Verhalten zeigte ihr Interesse an der Beschäftigung mit dem Unterrichtsmaterial. Die Beziehung zwischen Neugier und Interesse drückt SCHLAG passend zur konkreten Situation allgemein wie folgt aus:

„Neugier ist in diesem Sinne das Bestreben, sich mit Dingen und Situationen auseinanderzusetzen, die relativ unbekannt, überraschend, erstaunlich oder komplex sind. Diese Situationen binden die Aufmerksamkeit und erzeugen Lernmotivation – soweit sie den Lernenden nicht überfordern. Kognitive Konflikte oder überraschende Wendungen, selbst Widersprüche können solche intellektuellen Lernmotive anregen. Entscheidend ist hierbei der persönliche Neuigkeitsgehalt und das Interesse am Gegenstandsbereich. Interesse äußert sich als Neigung, sich frei gewählt und ausdauernd mit einem Erkenntnisbereich zu beschäftigen. Die Nutzung bestehender Interessen ist ein selbstverständliches pädagogisches Mittel – die Weckung von Interessen für bestimmte Gegenstandsbereiche ist zugleich selbst ein wichtiges pädagogisches Ziel.“ [544]

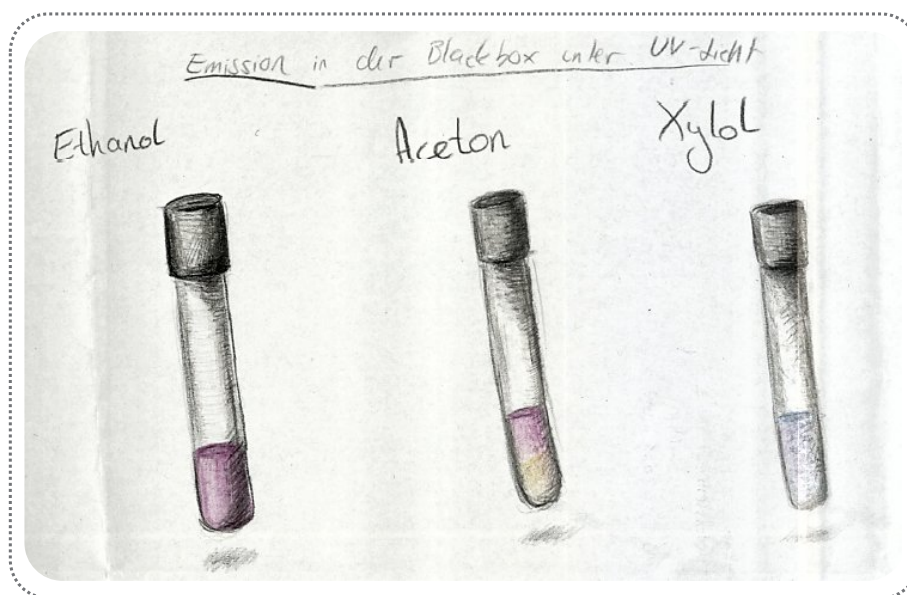


Abb. 83: Skizze eines Schülers der aggregationsinduzierten Lichtemission der Spiropyran-Lösungen (vgl. Kap. 4.1.1.1.2, Tab. 33 e; vgl. Kap. 4.1.2, Abb. 69) während der Einzelstudie zum Thema *Solvatochromie* (s. Kap. 4.1.3.2, Arbeitsblatt 6).

¹⁶⁸ Auch Lehrer merkten während der Erarbeitungsphasen der Schüler im Gespräch mit dem Forscher oder auch in den Lehrerfortbildungen (s. Kap. 5.4.2.2) an, dass die PBB-Experimente auch in die Farbstoffchemie eingeordnet werden könnten (vgl. [263]). Eventuell könnte dieses Experiment als Übergang zwischen den beiden Inhaltsfeldern genutzt werden.

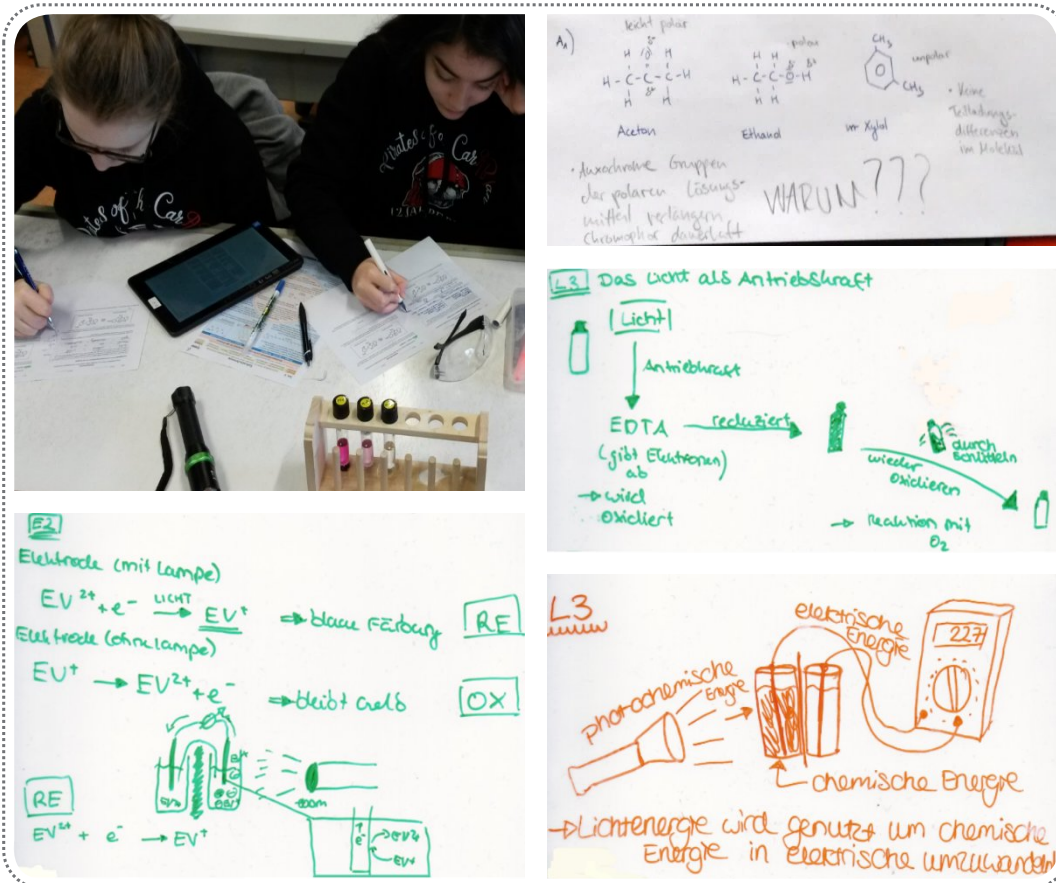


Abb. 84: Schüler in der Erarbeitungsphase; Ergebnisse einiger Aufgaben.

Vor allem wird die „individuelle Akzeptanz“, Befürwortung und somit auch ein Stück weit die *Identifikation* mit dem neuen Unterrichtsinhalt durch die Beobachtungen des Forschers während der Einzelstudien unterstützt, denn die Schüler zeigten dies insbesondere durch ihr *forschendes Lernen* (s. Kap. 4.1.2). Dabei kamen sie auf unterschiedlichste Ideen. Einige ausgewählte Situationen werden in der Tabelle (s. Tab. 46) aufgelistet, beschrieben und in einer Fotocollage dargestellt (s. Abb. 85).

Foto	AB	Idee der Schüler
1	5	Die Schüler fanden beim Bestrahlen der PBB-Lösung mit der Taschenlampe heraus, dass die Farbe der Lösung sich mit weißem Licht ändert. So kamen sie auf die Idee, die Beleuchtungsfunktion des Handys zu nutzen.
2, 6, 8	1, 7	Unbeabsichtigt stellten die Schüler fest, dass auch die Tintenkillerlösung oder auch gewisse Textmarkerfarben unter UV-Licht fluoreszieren.
3	2	Nachdem die Schüler die Energieformen separat nutzten, setzten sie diese auch gleichzeitig ein, indem sie beispielsweise die Wärme mit rotem Licht kombinierten, um herauszubekommen, ob die Wärmeenergie zur Beeinflussung der PBB-Lösung nicht ausreichend genug ist und eventuell durch rotes Licht der Prozess in Kraft treten könnte. Ein anderer Schüler stellte die Hypothese auf, dass im Eiswasser unter Bestrahlung mit blauem Licht die Blaufärbung der PBB-Lösung langsamer stattfinden könnte (s. Kap. 4.1.1.1.2, Tab. 34, i).
4	1	Während der Experimentierphase des AB 1 testete eine Schülergruppe mit den ihnen zur Verfügung stehenden Taschenlampen die aus anderen Fächern ihnen scheinbar nur theoretisch bekannte additive Farbmischung.

Foto	AB	Idee der Schüler
5, 7	1	Mit den angefeuchteten Kastanienzweigen malten einige Schüler auf Papier und bestrahlten diese mit UV-Licht. Vom Prinzip her wurde diese Anwendung mit einer Geheimschrift verglichen.
9	2	Die Schüler stellten die Hypothese auf, dass bei mehr Lichtstrahlung die PBB-Lösung schneller sich blau färben müsste. So stellten sie das Schraubdeckelgläschen mit der PBB-Lösung in die Mitte eines Kreises aus mehreren Taschenlampen.

Tab. 46: Beschreibung der Ideen der Schüler während des forschenden Experimentierens (vgl. Abb. 85).

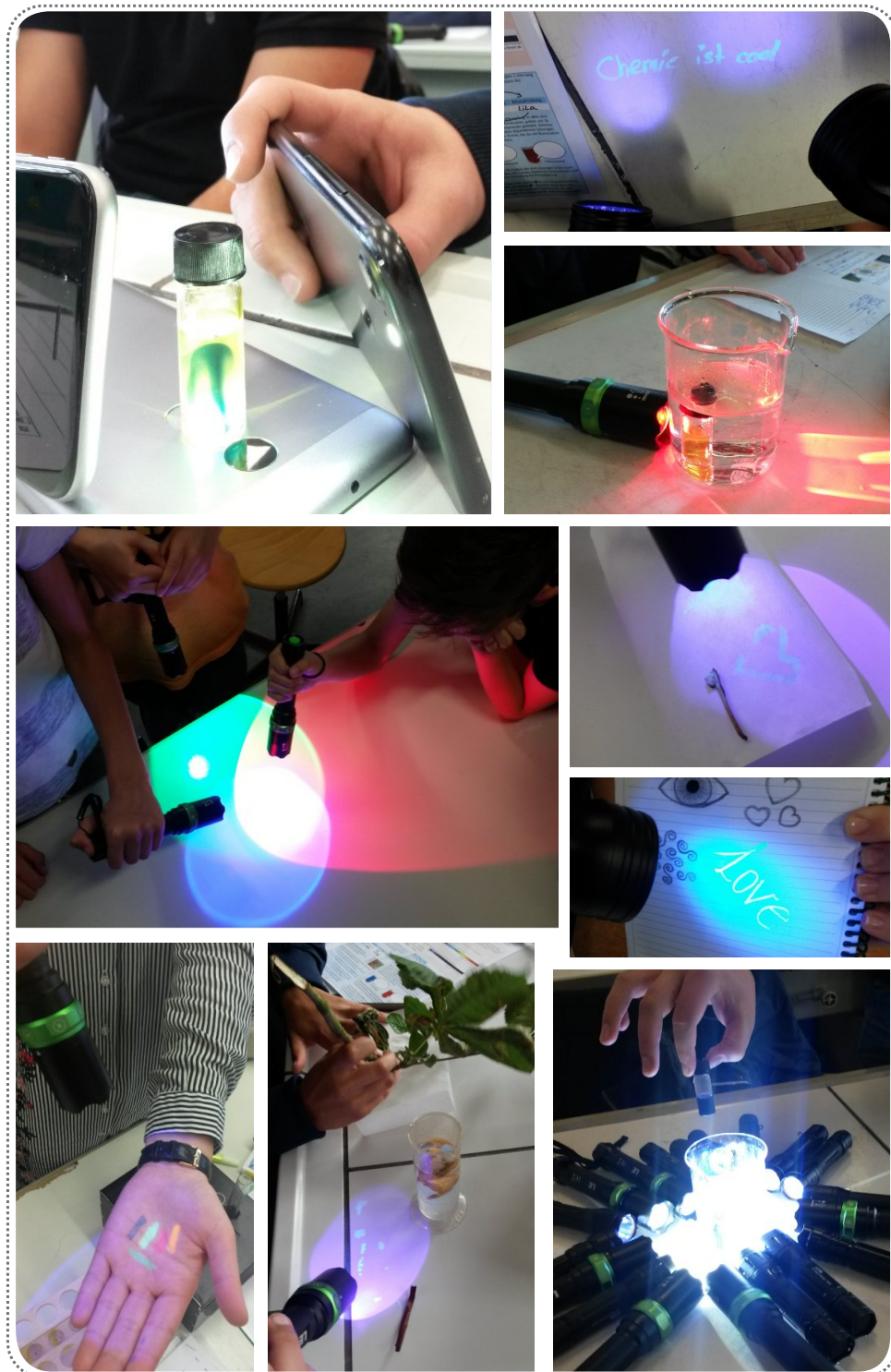


Abb. 85: Forschendes Experimentieren der Schüler in den Unterrichtsstunden mit photochemischen Experimenten und Fachinhalten (s. Tab. 46).

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass Schüler sehr häufig verblüfft davon waren, dass auch mit Lichtenergie auf phänomenologischer Ebene Substanzen unmittelbar beeinflusst werden können (s. Abb. 86). Auf erstaunte und fragende Gesichter zu stoßen, war also kein Ausnahmefall. Insbesondere bei dem Experiment mit der Photo-Blue-Bottle-Lösung (s. Kap. 4.1.1.1.2, Tab. 34, i) zeigte sich das noch nicht ausreichend ausgewachsene Energiekonzept der Schüler.¹⁶⁹ Denn häufig konnte beobachtet werden, dass Schüler zuerst mit der Wärme bzw. heißem Wasser versuchten, die PBB-Lösung zu beeinflussen. Oder oft wurde die Lichtenergie mit heißem Wasser oder dem Eiswasser kombiniert. Dass Lichtenergie allein ausreichend sein kann, um chemische Vorgänge in Gang zu setzen, war den Schülern scheinbar ausnahmslos nicht bewusst. So wollten einige Schüler die Beobachtungen während des Experimentierens mit Fotos und sogar kurzen Videoaufnahmen festhalten (s. Abb. f), um diese für sie visuell besonders ansprechenden Phänomene nach dem Chemieunterricht ihren Mitschülern, wenn nicht sogar in ihrer Freizeit ihren Eltern oder Freunden zeigen zu können. Unumstritten ist auch damit ein Zeichen der Identifikation mit dem neuen Lernertrag gesetzt.

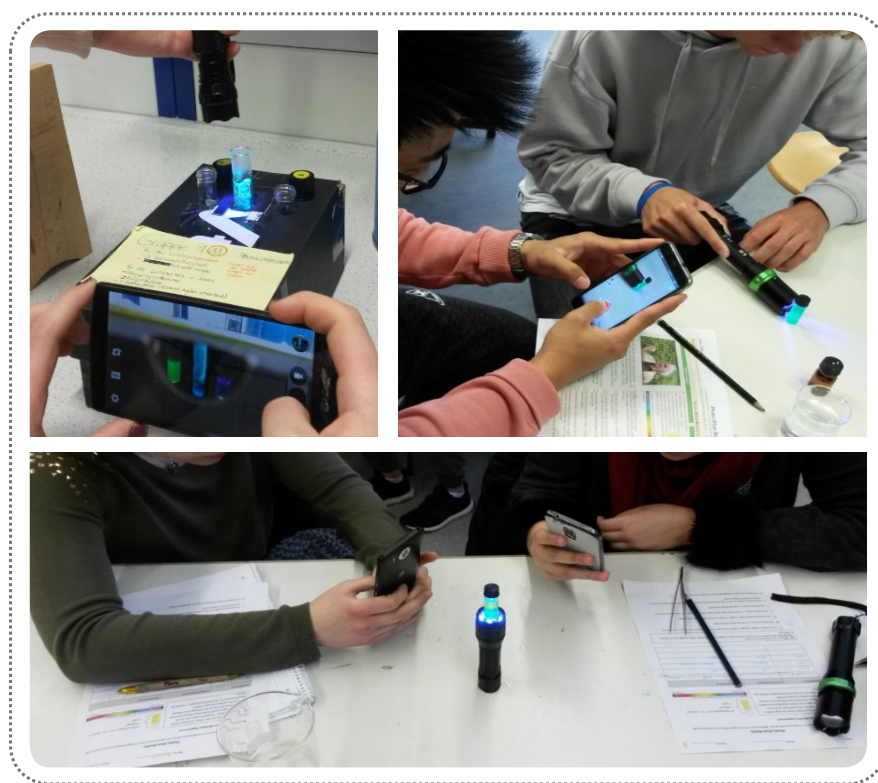


Abb. 86: Schüler halten mit ihren Handys ihre Beobachtungen während des Experimentierens fest.

¹⁶⁹ Zudem war auch auffällig, dass im Stundeneinstieg bei der Besprechung der Merkmale einer chemischen Reaktion fast ausschließlich zuerst der Stoffumsatz beschrieben wurde, und öfters erst nach Hinweisen auch der Energieumsatz von den Schülern angesprochen wurde. Bestätigt wurde die Feststellung des mangelnden Wissens zum Thema *Energie* implizit durch ein Lehrerinterview, indem es heißt: „Energie ist sowieso ein ganz spezielles Thema. Das ist von den Schülern nicht so gut fassbar [...]“. Aus den Selbsteinschätzungen stellte sich heraus, dass nach den Interventionen sich die meisten Schüler mit dem Fachbegriff *Energieumwandlung* besser auskannten. (Aus zeitlichen Gründen und da es nicht der Schwerpunkt dieser Arbeit ist, wird auf das Energiekonzept oder auch auf die Fehlvorstellungen der Schüler nicht weiter eingegangen.)

Schließlich zeigt auch die Auswertung des Items 6 abhängig vom Arbeitsblatt (s. Abb. 87), dass durchweg die Schüler mit Vergnügen gearbeitet haben und es mit Blick auf die Mittelwerte keinen besonders negativ auffallenden Ausreißer bei den unterrichteten sechs photochemischen Themen (s. Kap. 4.1.3) gab – zumal nach neurobiologischen Erkenntnissen davon ausgegangen werden muss, dass das Gehirn ständig arbeitet, „d.h. Lernen findet ganztägig (und vermutlich sogar im Schlaf) statt. Das Lernen in der Schule sollte daher [...] genauso vergnüglich sein wie Lernen außerhalb der Schule“ [545]. „Denken und Emotionen [jeglicher Art] sind untrennbar miteinander verknüpft“ [545].

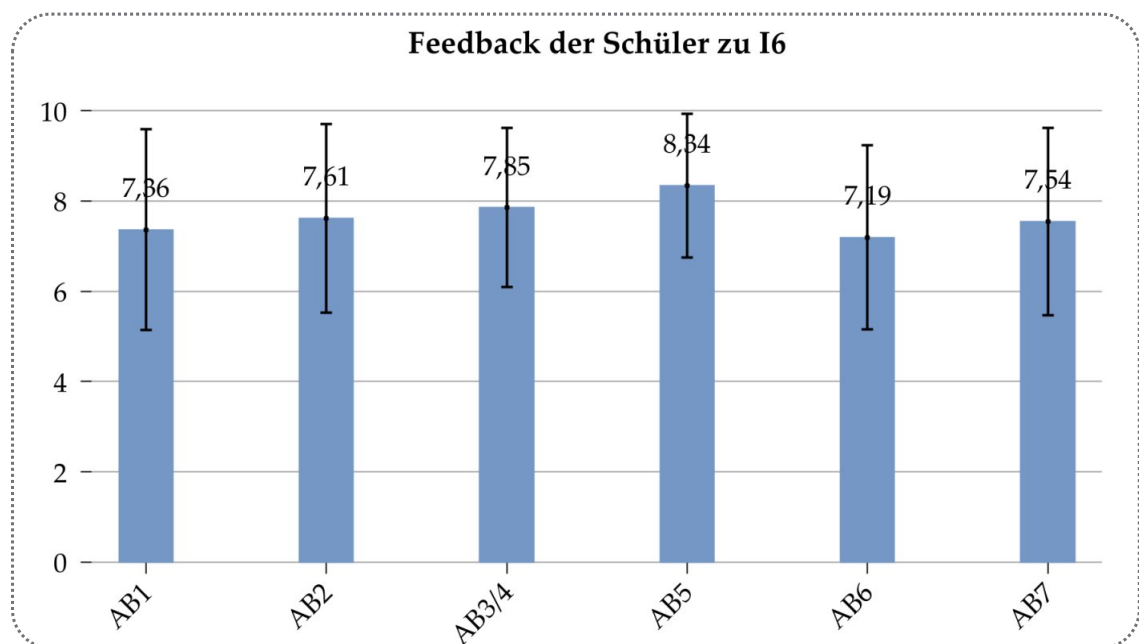


Abb. 87: Auswertung der Mittelwerte zu Item 6 aus dem Schüler-Feedback abhängig vom Arbeitsblatt.

Jedoch hatten die Schüler während der Interventionen nicht nur Spaß (I6), sondern auch Gelegenheiten, ihr Vorwissen zum Erarbeiten des neuen Inhalts einzusetzen (I7). Letzteres ist auf der einen Seite ein Zeichen dafür, dass bei den Schülern das nötige Vorwissen vorhanden gewesen ist, um die Aufgaben zum Thema erfüllen zu können (vgl. Kap. 4.1.2, g; Kap. 5.4.3.1, a). Bestätigt wird diese Beobachtung zusätzlich durch die Auswertung der Aufgaben aus dem Vor-Test der Lernstandserhebung (s. weiter unten). Außerdem wird der Vorteil des bereits vorhandenen Vorwissens zur Förderung der effektiven Verinnerlichung des neuen Lernzuwachses von STERN wie folgt beschrieben:

„Je besser die Lernenden eine eingehende Information an bestehendes Wissen anknüpfen können und je besser sie verstanden haben, was man mit dem neuen Wissen erklären, beziehungsweise welche Probleme man damit lösen kann, desto mehr bleibt haften.“ [529]

Auf der anderen Seite wird dadurch verdeutlicht, dass die thematische Verknüpfung photochemischer Inhalte an den bereits bekannten Unterrichtsstoff demzufolge möglich ist bzw. das Vorwissen aus dem üblichen Chemieunterricht sehr wohl als ausreichend betrachtet werden kann, um daran mit photochemischen Inhalten anzusetzen, ohne eine umfangreiche spezielle fachliche Vorbereitung vorzuschieben.

Hinzu kommt, dass die Schüler davon überzeugt sind, einen Lernzuwachs erzielt zu haben (I8). Auch hierfür wurden die Schüler-Rückmeldungen in Abhängigkeit vom Arbeitsblatt statistisch ausgewertet (s. Abb. 88).

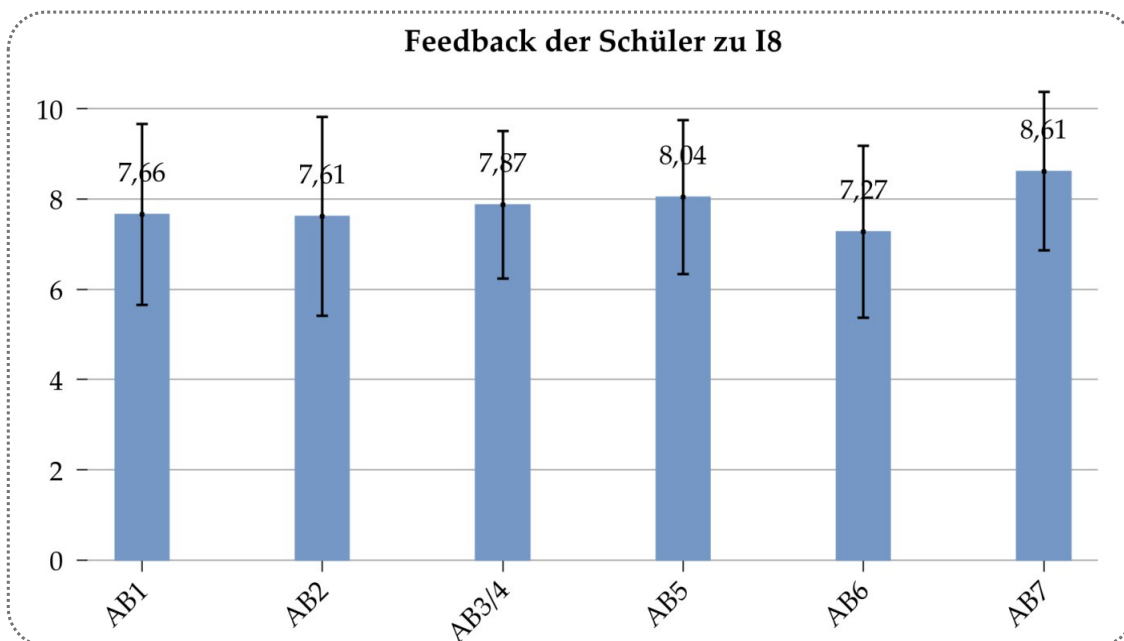


Abb. 88: Auswertung der Mittelwerte zu Item 8 aus dem Schüler-Feedback abhängig vom Arbeitsblatt.

Mithilfe eines Streudiagramms wurde graphisch der Zusammenhang zwischen den beiden statistischen Merkmalen *Spaß* (I6) bei und *Lernertrag* (I8) nach der Intervention dargestellt (s. Abb. 89). Gekoppelt an den erzielten *Lernertrag* ist zu erkennen, dass sich die meisten Wertepaare im oberen rechten Quadranten des Streudiagramms befinden (s. Abb. 89). Mit einem Wert für den Korrelationskoeffizienten $r = 0,50$ liegt eine große Korrelation vor (vgl. Kap. 5.2.4.1).

Durch die Betrachtung der Lernstandserhebungen der Schüler ($n_{\text{gesamt}} = 312^{170}$) (s. Kap. 5.2.3.2) konnte Konkretes über den Lernertrag und das bereits vorhandene Vorwissen erfahren werden. Bei Teilaufgabe A sollten die Schüler vor und nach der Intervention einschätzen, in welchem Maße sie sich mit den Fachbegriffen auskennen. Dabei kannten sich im Durchschnitt die Schüler ihrer Meinung nach mit knapp über der Hälfte der angegebenen Fachbegriffe nach der Unterrichtsreihe besser aus (s. Abb. 90).

¹⁷⁰ Es wurden die Lernstandserhebungen der Einzelstudien ausgewertet, die von dem Autor selbst durchgeführt wurden.

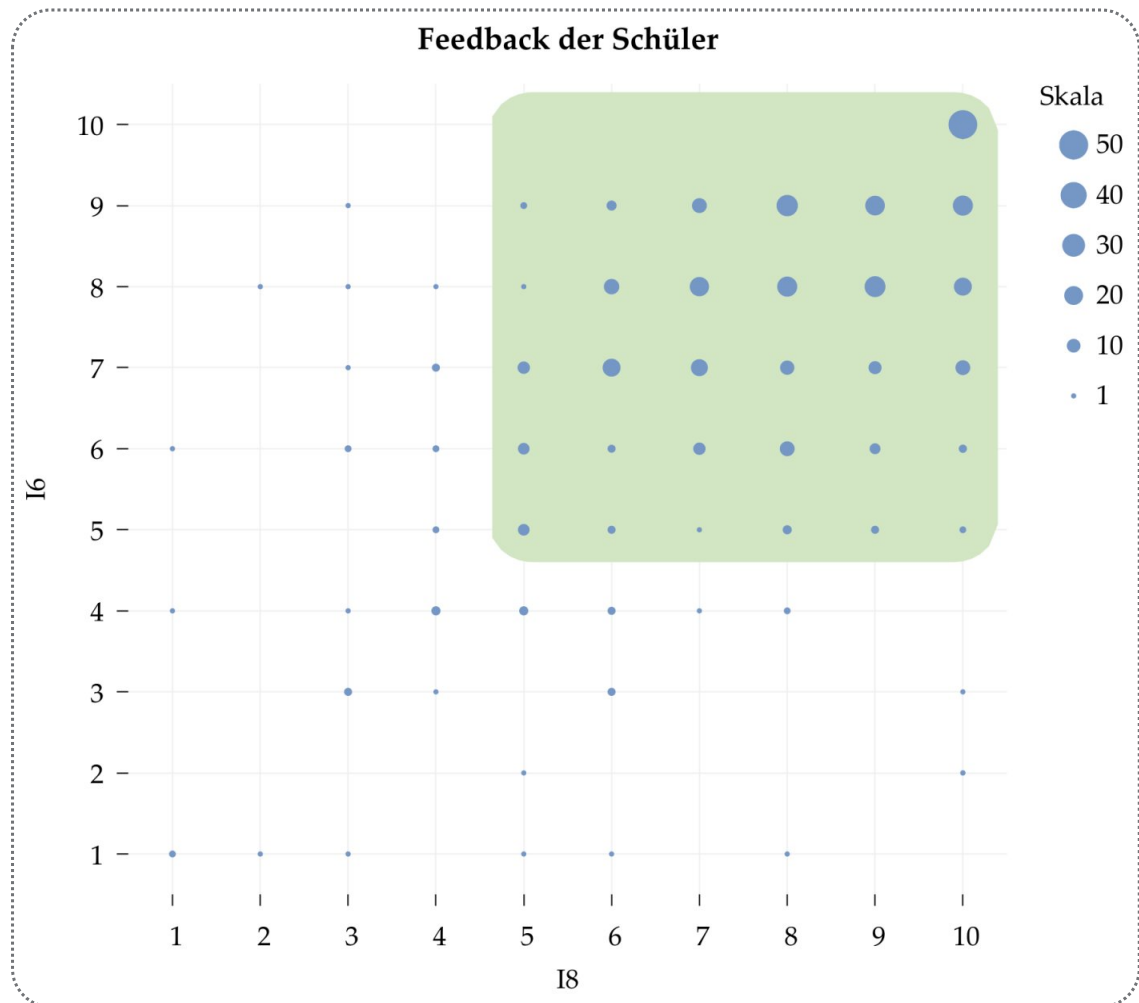


Abb. 89: Streudiagramm zur graphischen Darstellung der beiden statistischen Merkmale *Spaß (I6)* und *Lernertrag (I8)* bei der Intervention aus den Schüler-Feedbackbögen.

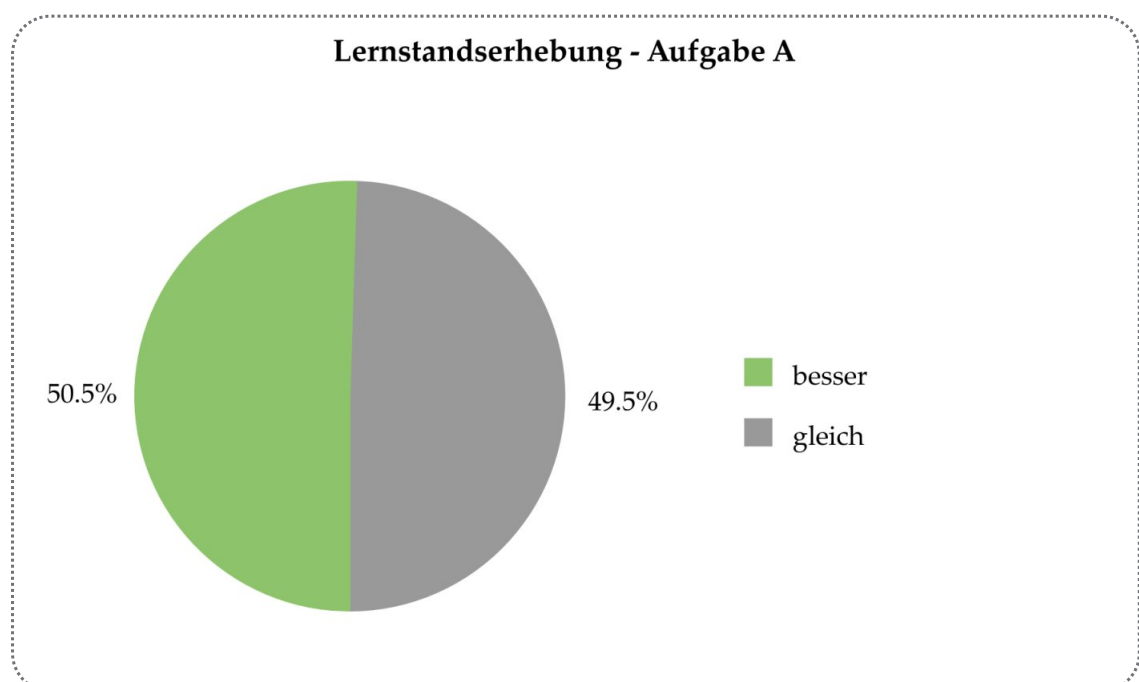


Abb. 90: Arbeitsblattunabhängige Auswertung der Aufgabe A der Lernstandserhebung.

Begriffe, bei denen sich die Schüler nach der Intervention genauso gut auskannten wie vorher, waren hauptsächlich solche wie *Oxidation*, *Elektronendonator*, *NERNST-Gleichung*, *mesomere Grenzstruktur*, *Absorptionsspektrum*, die auch im üblichen Chemieunterricht in obligatorischen Inhaltsfeldern des KLPs zu finden sind und die die Schüler scheinbar als Vorwissen bereits beherrschten. Dagegen sind diejenigen Begriffe, die sie erst durch die Intervention kennenlernten bzw. dadurch sich besser damit auskannten, hauptsächlich solche Begriffe, die unmittelbar etwas mit *Licht* oder allgemein mit *Energie* zu tun haben, wie *Energieumwandlung*, *energiearmes Licht*, *Energieform*, *Energiespeicherung*, *Leuchtfarben*, *Photolumineszenz*, *Lichtemission*, *Energiestufenmodell*. Zur Erläuterung dieses Ergebnisses sollte beachtet werden, dass die Einzelstudien nur mit den Lerngruppen durchgeführt wurden, die das nötige Vorwissen (s. Kap. 4.1.2, g; Kap. 9.4.1) aus den Unterrichtsstunden zuvor mitbrachten. Das bedeutet, dass wohlgeachtet mit den photochemischen Themen keine Einführungsstunden, sondern eher Anwendungs- und Vertiefungsstunden durchgeführt wurden. Jedoch wäre es interessant zu wissen, inwieweit oder an welchen Stellen im KLP es möglich ist, mit photochemischen Inhalten in obligatorische Themen einzuführen. Fest steht, dass die Schüler bei ausreichendem Vorwissen daran anknüpfend ihr Energiekonzept und ihr Wissen über die Lichtenergie durch die Beschäftigung mit photochemischen Inhalten erweitern können. Inhaltlich betrachtet können demnach photochemische Inhalte durchaus in den obligatorischen Chemieunterricht eingebunden werden. Da der Übergang möglich ist, sollte es den Schülern einfacher fallen, das neue Wissen zu akzeptieren und zu verinnerlichen.

Wie bei Teilaufgabe A ging es bei B auch um eine Selbsteinschätzung. Dieses Mal wurden Kompetenzen aufgelistet, wozu die Schüler vor und nach der Intervention angeben konnten, wie fit sie sich darin fühlten. Anhand dessen konnte die Verbesserung in den einzelnen Kompetenzen festgestellt werden (s. Abb. 92). Im Mittel haben sich die Schüler ihrer Meinung nach bei mehr als der Hälfte der angegebenen Kompetenzen verbessert.

Bei der Teilaufgabe C (s. Kap. 5.2.3.2) sollten fachinhaltliche Aussagen verifiziert oder falsifiziert werden. Die Auswertung (s. Abb. 91) zeigt, dass nach der Intervention mit etwa 16,3 % im Durchschnitt die Aussagen fast im gleichen Anteil wie vorher (17,6 %) falsch beurteilt werden. Jedoch nimmt gleichzeitig im Durchschnitt die Anzahl der Aussagen, die von den Schülern richtig beurteilt werden, von etwa 35 % auf eine fast doppelt so große Häufigkeit von ca. 68 % zu. Der Anteil von knapp 33 %, der hinzukam, fehlt im Post-Test beim Merkmal *keine Ahnung*. Im Durchschnitt haben die Schüler somit mehr als die Hälfte der Aussagen, über die sie vorher *keine Ahnung* hatten, richtig eingeschätzt.

Bei der letzten Teilaufgabe D sollten die Schüler Mind Maps bzw. Concept Maps erstellen (s. Kap. 5.2.3.2). Zur Auswertung wurden Wortwolken verwendet (s. Kap. 5.2.4.2). Mithilfe dieser ist im Pre-Test zu erkennen, dass die Schüler definitiv Vorwissen mitbringen; zumindest Fachbegriffe kennen, die sie

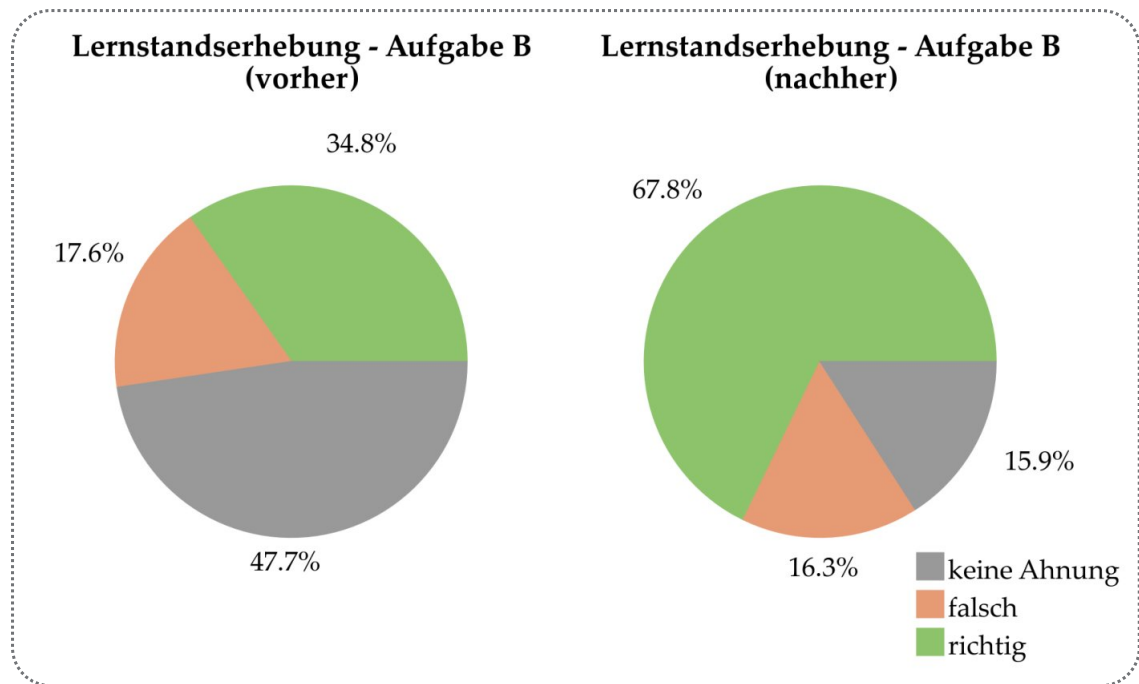


Abb. 91: Arbeitsblattunabhängige Auswertung der Aufgabe B der Lernstandserhebung

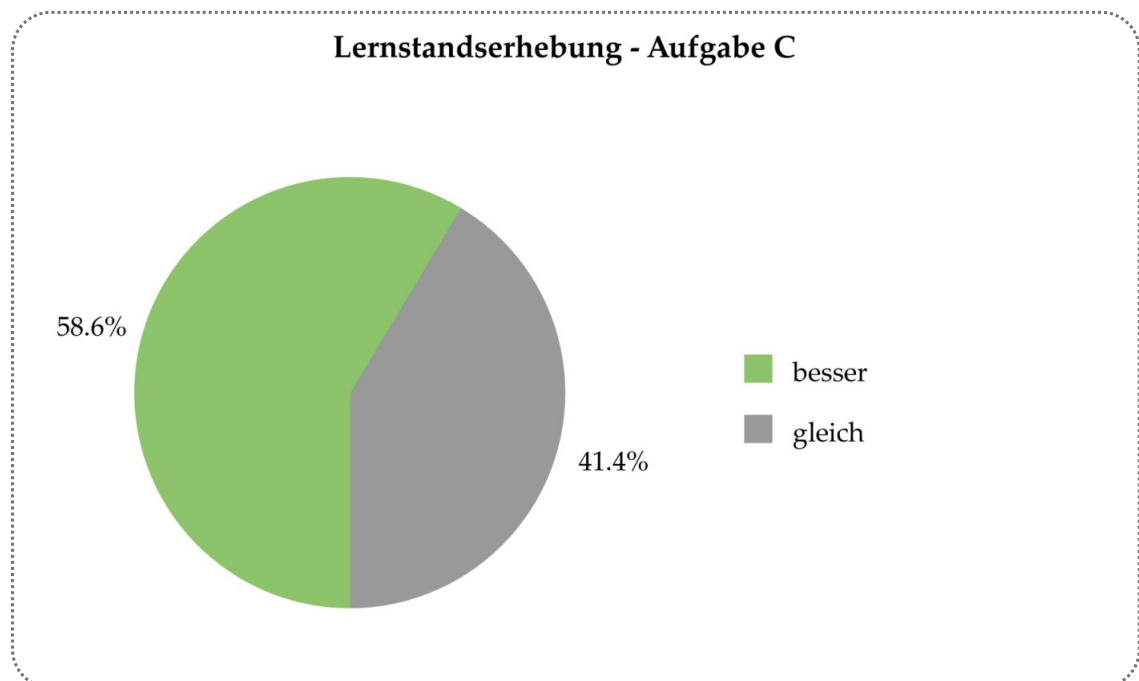


Abb. 92: Arbeitsblattunabhängige Auswertung der Aufgabe C der Lernstandserhebung

dem jeweiligen Thema zuordnen (s. Abb. 93). Außerdem zeigen die Schüler durch ihre Mind und Concept Maps, dass sie neue Fachbegriffe aus der Intervention mitnehmen. Insgesamt bestätigt dieses Ergebnis die Analysen zu Teilaufgabe A.

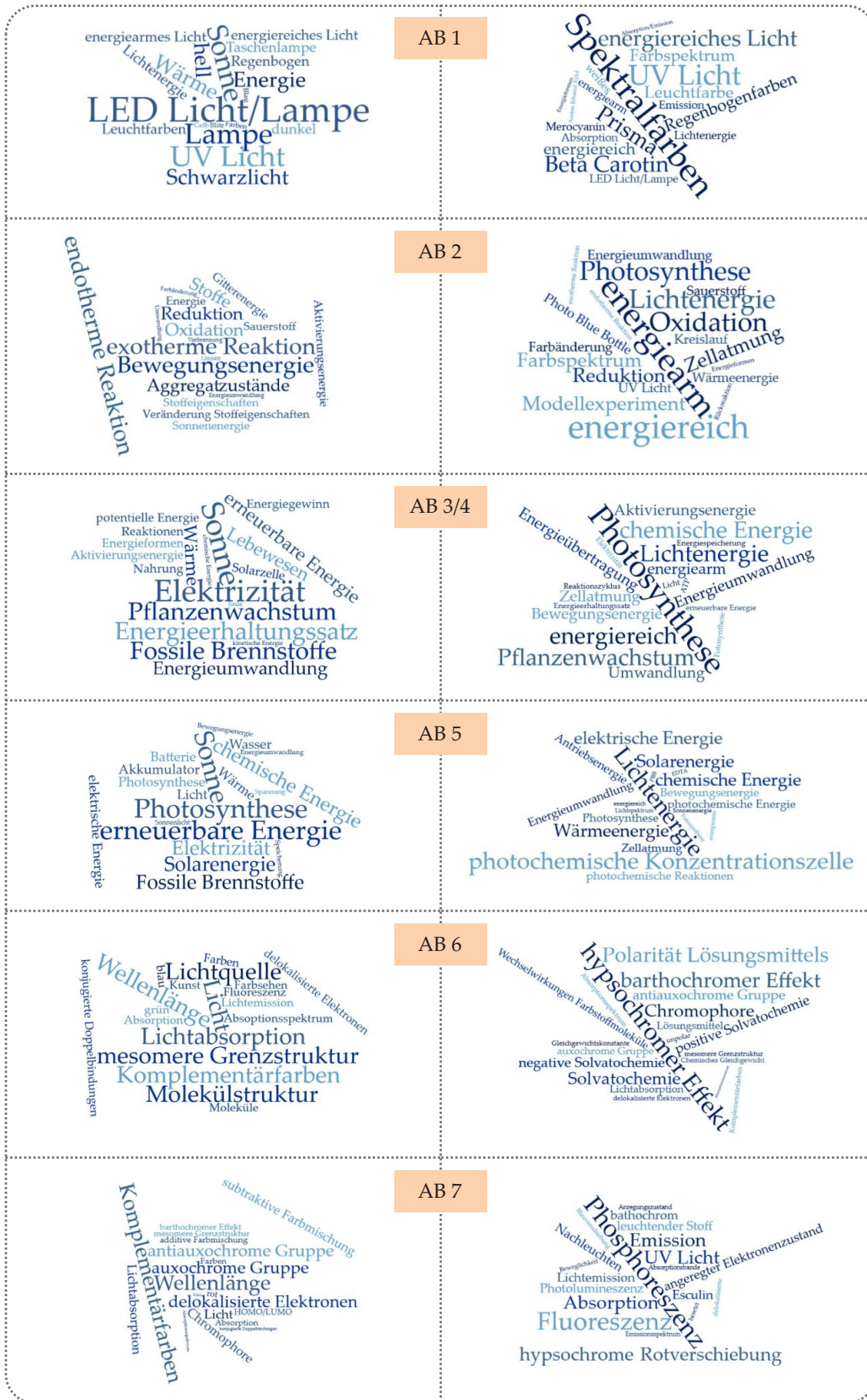


Abb. 93: Auswertung der Aufgabe D aus der Lernstandserhebung mithilfe von Wortwolken (jeweils links zum Pre- und rechts zum Post-Test).

Zusammenfassend kann sehr wohl von einer individuellen Akzeptanz photochemischer Inhalte gesprochen werden, denn nach COBURN wird unter Identifikation das Ausmaß des Zueigenmachens der Innovation verstanden [41, 52]. Auf den ersten Blick ist auch die Verinnerlichung des neuen Wissens durch die Schüler zu erkennen. Jedoch hätte ein Follow-up-Test zu einer viel gewissenhafteren Bejahung der Frage führen können.

F.2. Welches Ausmaß der Veränderung durch photochemische Experimente kann den Rückmeldungen der Schüler und Lehrer entnommen werden? (Tiefe)

Die *Implementationstiefe* umfasst „das Ausmaß der Veränderung etwa in Bezug auf Überzeugungen von Personen, soziale Interaktionen oder pädagogische Prinzipien“ [41]. Sie weist, wie auch der Erfolgsindikator *Verbreitung*, unterschiedliche Intensitätsstufen auf [41], sodass die Tiefe der Innovationsumsetzung bis hin zur expliziten Verankerung der Photochemie in die Lehrpläne führen könnte. Zwar zeigt sich eine gewisse Tiefe bereits durch das Interesse der Schüler an den photochemischen Experimenten und ihrem *forschenden Experimentieren* (s. Tab. 46, Abb. 85), jedoch wurde zusätzlich dennoch analog zum Item 9 für die Lehrer (s. Kap. 5.4.4.2) folgende Aussage den Schülern zur Beurteilung freigegeben: *Wir sollten noch mehr Experimente mit der Energieform Licht kennenlernen und im Unterricht durchführen.*

Im Durchschnitt wurde diese Aussage von den Schülern mit 7,2 Skalenpunkten bewertet. Es ist ein Anzeichen dafür, dass die Mehrheit der Schüler in Zukunft vermehrt photochemische Experimente kennenlernen und durchführen möchte. Auch der zu den Daten erstellte Boxplot bestätigt diese Folgerung. Es zeigt sich anhand des Interquartilsabstands bzw. der Box, dass bereits 50 % aller Schüler einen Skalenwert zwischen 6 und 9, und somit sogar 75 % mindestens 6 Skalenpunkte für die Aussage vergaben. Das sind 366 von insgesamt 463 Schülern, die diese Aussage bewerteten und scheinbar einverstanden damit wären, photochemische Experimente in den CU einzubinden. Das bedeutet, dass – abgesehen von der Tatsache, dass bereits durch die Auswertung der Items 6, 7 und 8 (s. F.1.) die Schüler von photochemischen Inhalten überzeugt sind – hier das Ausmaß der gewünschten Änderung deutlich wird.

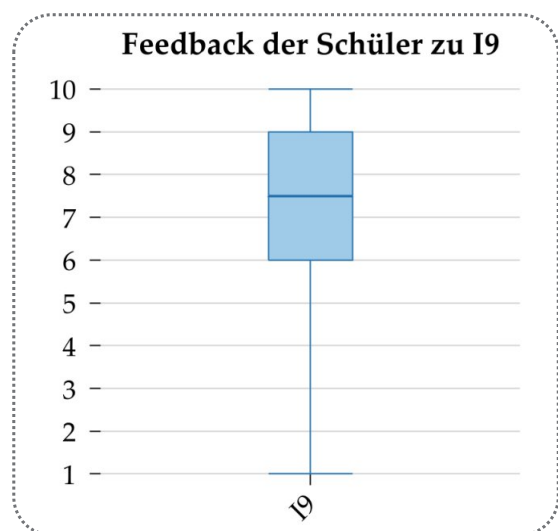


Abb. 94: Darstellung der Verteilung von Schülerbewertungen zum Items I9 aus dem Feedbackbogen.

F.3. Ist potenzielle Nachhaltigkeit in der praktischen Umsetzung der Integration photochemischer Inhalte zu erkennen? (Nachhaltigkeit)

Laut der bisherigen Auswertung bei den beiden Forschungsfragen zuvor besteht aus Schülerperspektive Potenzial für die nachhaltige Einbindung photochemischer Inhalte in den CU. Zuletzt wurde noch von allen Schülern innerhalb des Feedbackbogens die Vervollständigung folgender Aussage mit den Ausdrücken *weniger relevant*, *ebenso relevant* oder *etwas relevanter* erbeten (I13): *Zukünftig sollten im Chemieunterricht Experimente mit der Energieform Licht im Vergleich zu den Experimenten mit Wärme oder elektrischer Energie ... sein.* Dazu liegt ein eindeutiges Ergebnis vor, welches hier mithilfe eines Kreisdiagramms verdeutlicht wurde (s. Abb. 95).

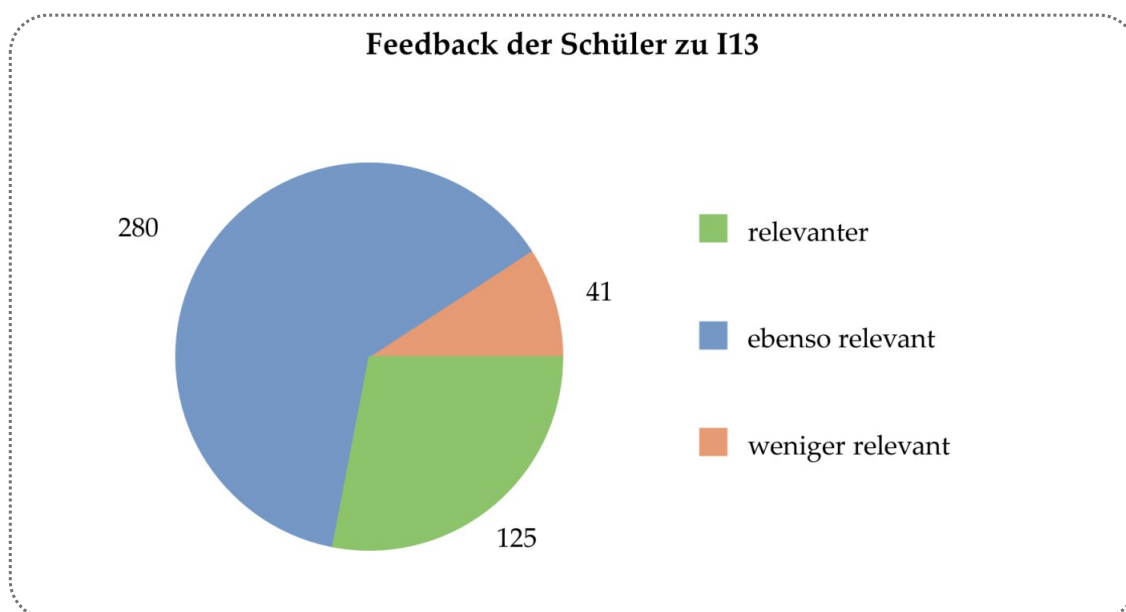


Abb. 95: Ergebnis zu Item 13 des Schüler-Feedbacks.

Insgesamt knapp über 90 % (280 + 125) der Schüler sind der Überzeugung, dass in Zukunft im CU Experimente mit der Energieform Licht mindestens genauso bedeutend sein werden wie Experimente, bei denen Wärme oder elektrische Energie verwendet wird; wenn nicht sogar relevanter. Impliziert wird dadurch, dass Schüler davon ausgehen, dass Lichtenergie momentan zwar noch nicht obligatorisch im Zusammenhang mit Experimenten thematisiert wird, jedoch rechnen sie für den CU mit der Nachhaltigkeit photochemischer Experimente.

5.4.4.2 Lehrerperspektive

„Da die Variablen, die das (außerordentlich komplexe) Unterrichtsgeschehen bestimmen, empirisch nicht ausreichend erfassbar sind, sich ständig verändern und das einzelne Individuum bei solchen Erhebungen nicht gebührend berücksichtigt werden kann, ist die Gültigkeit der Erkenntnisse aus empirischen Forschungsergebnissen stark beschränkt. Sie können niemals die Erkenntnisse aus der

alltäglichen Unterrichtserfahrung der Lehrkräfte vor Ort ersetzen, sie können sie bestenfalls unterstützen.“ [22]

— A. GOODWIN & M. W. TAUSCH

Um die „Erkenntnisse aus der alltäglichen Unterrichtserfahrung der Lehrkräfte vor Ort“ zu berücksichtigen, und da zudem der Stichprobenumfang der an den Einzelstudien teilnehmenden Lehrpersonen von $n = 30$ für quantitative Berechnungen nicht aussagekräftig genug ist, wurde den Lehrern zu allen Items zusätzlich zur Beurteilung der Aussagen mithilfe einer 10-stufigen Skala auch die Möglichkeit der schriftlichen Begründung ihrer Entscheidung gegeben. So konnten die Lehrer-Feedbacks abgesehen von der quantitativen Auswertung auch viel konkreter qualitativ bewertet werden. Zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Lehrerperspektive wurde nach Beendigung aller Einzelstudien von den Teilnehmern unter den Lehrern ein zweites Feedback eingeholt (s. Kap. 5.2.3.1). Der abschließende Fragebogen „wurde schließlich dazu genutzt, die im Laufe des Projekts gewonnenen Ergebnisse und Schlussfolgerungen abzusichern und offen gebliebene Fragen zu thematisieren“ [546].

Insgesamt ist die Herangehensweise an die Beantwortung der Forschungsfragen mithilfe der Auswertung der Lehrer-Feedbacks analog zu der der Schüler (s. Kap. 5.4.4.1). So können hier in Kapitel 5.4.4.2 Parallelen gezogen oder auch Unterschiede zusätzlich thematisiert und analysiert werden.

F.1. Zeigt sich eine individuelle Akzeptanz photochemischer Inhalte und die Verinnerlichung von neuem Wissen darüber? (*Identifikation*)

Die drei Aussagen, welche den Schülern zur Selbsteinschätzung gegeben wurden, sollten ebenso von den Lehrern zur Einschätzung ihrer Schüler aus der Lehrerperspektive bewertet werden (s. Kap. 5.2.3.1; vgl. Kap. 5.4.4.1).

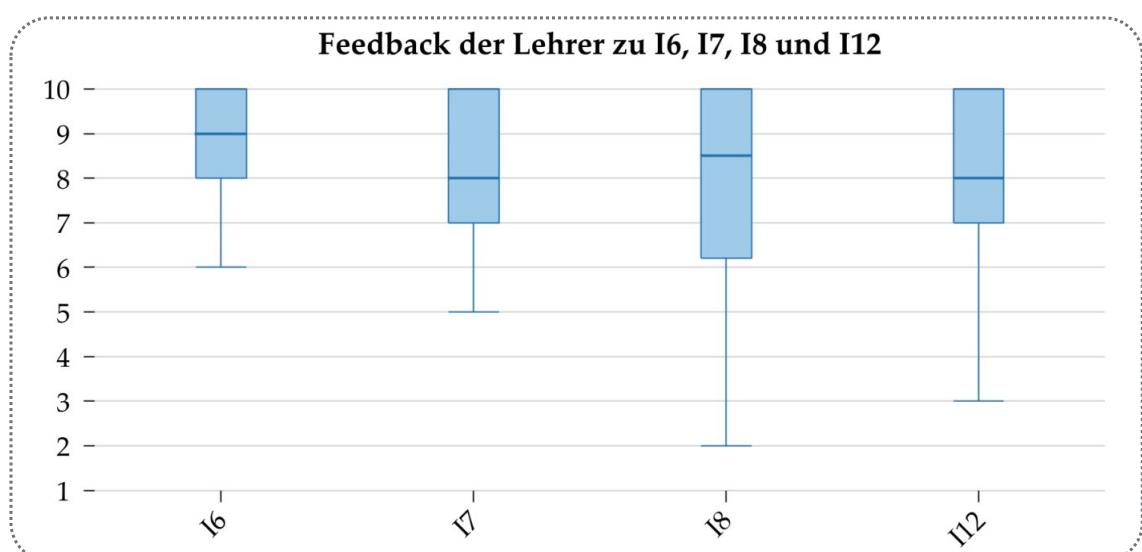


Abb. 96: Darstellung der Verteilung von Lehrerbewertungen zu den Items I6, I7, I8 und I12 aus dem Feedbackbogen.

Die Bewertung der Lehrer ($n_{16} = 29$; $n_{17} = 25$; $n_{18} = 26$) liegt durchschnittlich in einem ähnlichen Skalenbereich. Sie schätzen den Spaß am Thema (I6), den Einsatz des schon vorhandenen Wissens (I7) und den Lernertrag der Schüler (I8) mit mindestens 7 Skalenpunkten ($M_{I6} = 8,69$; $M_{I7} = 8,32$; $M_{I8} = 7,85$) etwas besser ein als die Schüler selbst (s. Abb. 96). Die Bejahung der Forschungsfrage F1 in Kapitel 5.4.4.1 wird hier durch die Sichtweise der Lehrpersonen nur noch bestätigt. Zudem sollten die Lehrer angeben, inwieweit sie den Inhalt der Intervention zur Photochemie für den Chemieunterricht als relevant empfinden (I12). Hierbei zeigt sich, dass im Mittel mit $M_{I12} = 7,97$ die Lehrer ($n_{I12} = 29$) von der Relevanz der in ihrem Unterricht thematisierten photochemischen Inhalte (s. Kap. 4.1.3) überzeugt sind. Genauer betrachtet lässt sich aufzeigen, dass 24 der 29 Lehrer mindestens 6 und 30 % der Lehrer sogar 10 Skalenpunkte für das Merkmal „Relevanz“ (I12) vergeben.

Zur Identifizierung der persönlichen Akzeptanz der Lehrer dieser innovativen photochemischen Inhalte wurden drei weitere Items in die Feedbackbögen integriert. Diese Items mussten schriftlich beurteilt werden. Deshalb werden im Folgenden ausgewählte Aussagen der Lehrer zunächst tabellarisch festgehalten (s. Tab. 47).

I15: Was fanden Sie an dem Thema und den entsprechenden photochemischen Experimenten besonders wichtig für Ihre SuS?

- Einfache Durchführbarkeit
- Lernertrag
- Schöne Beobachtungen
- Die Möglichkeit, selbstständig zu arbeiten (vgl. Kap. 4.1.1.1.1)
- Freude bei den Experimenten; das Interesse und der Lernzuwachs

I16: Welche Anreize gab es für Sie, an der Feldstudie teilzunehmen?

- Spannendes Thema
- Schöne Experimente
- Ich interessiere mich für neue Unterrichtsansätze und habe Spaß daran, Neues zu lernen und auszuprobieren.
- Neue Experimente ausprobieren
- Interesse an Modellexperimenten in kleinem Maßstab
- Kostenloses Material
- Sehr interessantes und aktuelles Thema
- Ich wollte gern andere Unterrichtsmaterialien und -versuche testen, sowie die ausgearbeiteten und erklärten Medien einsetzen. Wenn man lange in seinem Job arbeitet, wird man sonst sehr leicht "betriebsblind".
- Einen großen Anreiz stellte das Thema dar, da ich zum einen persönlich dieses Thema als wichtig empfinde und zum anderen die SuS neue Aspekte (Exkurse) zu behandelten Themen machen konnte. Ich persönlich finde, dass die Photochemie mehr in den Unterricht mit eingebaut werden sollte, da u.a. der Aspekt des Lichtes z. B. bei erneuerbaren Energien immer mehr in den Fokus unseres Alltags gelangt.

I18: Ist der Aufwand, um das Thema / die Themen im Unterricht einzubringen, angemessen?

- Ja, auf jeden Fall in einem Leistungskurs. In einem Grundkurs wird es dagegen zeitlich oft noch enger und die Motivation für schwierige Fragestellungen ist geringer.
- Ja, auf jeden Fall!
- Mit den vorhandenen Materialien und der Fortbildung als Einführung war das Ganze gut machbar. Ohne die Hilfestellungen schreckt es vielleicht die eine oder andere Lehrkraft ab.

<ul style="list-style-type: none"> • Aufwand ist angemessen und gerechtfertigt. (Hoher Mehrwert) • Da diese Themengebiete im Lehrplan vorgesehen sind und Chemieunterricht i. d. R. Experimente, also auch Schülerexperimente beinhaltet, ist der praktische Aufwand genauso groß wie bei einem anderen Experiment, dank der guten Materialien der Aufwand für die Theorie geringer. • Der Aufwand ist in Ordnung, da viele einzelne Aspekte bereits im Unterricht thematisiert wurden. Es stellt eine Transferleistung, eine Vertiefung und einen neuen Aspekt ("Photochemie als Modell z. B. für die Photosynthese") dar.
I23: Hier haben Sie noch Platz für weitere Anmerkungen, Ideen zur Verbesserung oder Ergänzung.
<ul style="list-style-type: none"> • Danke für die Ideen und Anregungen durch diese Reihe(n) und die sehr nette und konstruktive Zusammenarbeit. • Mich würden auch die Themen interessieren, die ich bisher nicht kennengelernt habe. Ich habe mich sehr über die tolle Zusammenarbeit gefreut und begrüße die neuen Impulse. • Weitere Experimente für die Jahrgangsstufe 8 oder 9 wären schön. • Bei den Photo-Blue-Bottle Experimenten funktionieren sowohl die Konzentrationszellen als auch die Tic-Tac-Zellen sehr gut mit Handy-Taschenlampen, wenn nicht genügend Taschenlampen vorhanden sind.

Tab. 47: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I15, I16, I18 und I23.

Allein die Tatsache, dass die Lehrer sich teilweise sehr ausführlich zu den Items äußerten, zeigt bereits ihr Interesse daran und somit auch einen gewissen Grad der Identifikation mit diesem Thema. Auf die Frage, was sie dabei für ihre Schüler als besonders wichtig im Zusammenhang mit den photochemischen Experimenten empfanden (I15), wurden größtenteils Aspekte angegeben, die bereits die in den Vorstudien interviewten Lehrpersonen als gewünschte Merkmale bei Schulexperimenten aufzählten (s. Kap. 3.4.2.2, 1). Zudem wurden auch die Motive zur Teilnahme an der Studie dargestellt. Die Zufriedenheit der Lehrer zeigte sich letztendlich in ihren Anmerkungen am Ende des Feedbackbogens (I23). Vor allem das Interesse an weiteren photochemischen Themen und der Wunsch nach mehr Experimenten impliziert ihre Zustimmung, welche unter anderem in den Antworten zu der Frage nach der Angemessenheit des Aufwands begründet liegt. Die meisten Lehrer, die den Aufwand zur Integration photochemischer Inhalte als angemessen erachten, positionieren sich für den zukünftigen Einsatz photochemischer Experimente. All dies sind Anzeichen dafür, dass sich die Lehrer die unterrichtliche Innovation zu eigen machen wollen und somit sich damit als Chemielehrer identifizieren können.

F.2. Welches Ausmaß der Veränderung durch photochemische Inhalte kann den Rückmeldungen der Schüler und Lehrer entnommen werden? (Tiefe)

Aus den Rückmeldungen der Lehrer ist zu entnehmen, dass die gegebenen Anknüpfungsmöglichkeiten an die im KLP vorhandenen Inhaltsfelder für die photochemischen Experimente sinnvoll zu sein scheinen. Zur Identifizierung wurden zwei Items gewählt.

Bei I9 sollten die Lehrer die folgende Aussage beurteilen: *Photochemische Experimente sollten in den KLP integriert werden.* Im Durchschnitt vergaben die Lehrer ($n_{I9} = 28$) dafür knapp über 8 Skalenpunkte (s. Abb. 97) und 75 % der Lehrer

gaben 7 oder mehr Skalenpunkte (s. Abb. 97; Abb. 98). Außerdem äußerten sie dafür sinnvolle Gründe (s. Tab. 48). Hauptsächlich argumentieren sie damit, dass durch diese photochemischen Themen die Erweiterung des Energiekonzepts möglich wäre. Somit wären laut der KLPe auch Lernprogressionen zum Basiskonzept *Energie* erreicht (s. Kap. 3.2.3.1). Auch den Lehrern ist demnach bewusst, dass durch die photochemischen Inhalte die Umsetzung der obligatorischen Vorgaben in den KLPen realisiert werden kann (vgl. Kap. 4.1.1).

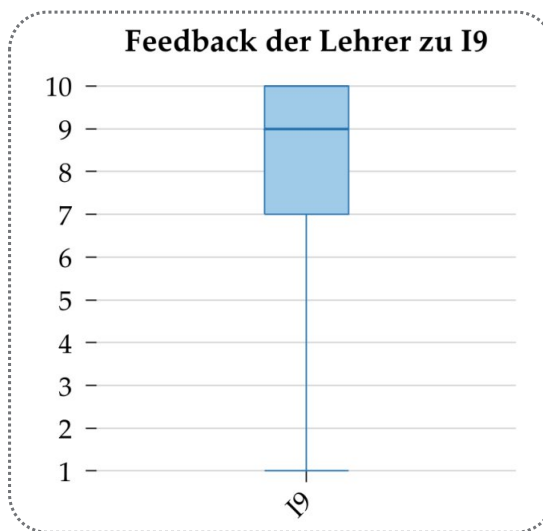


Abb. 97: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I9 mithilfe eines Boxplots.

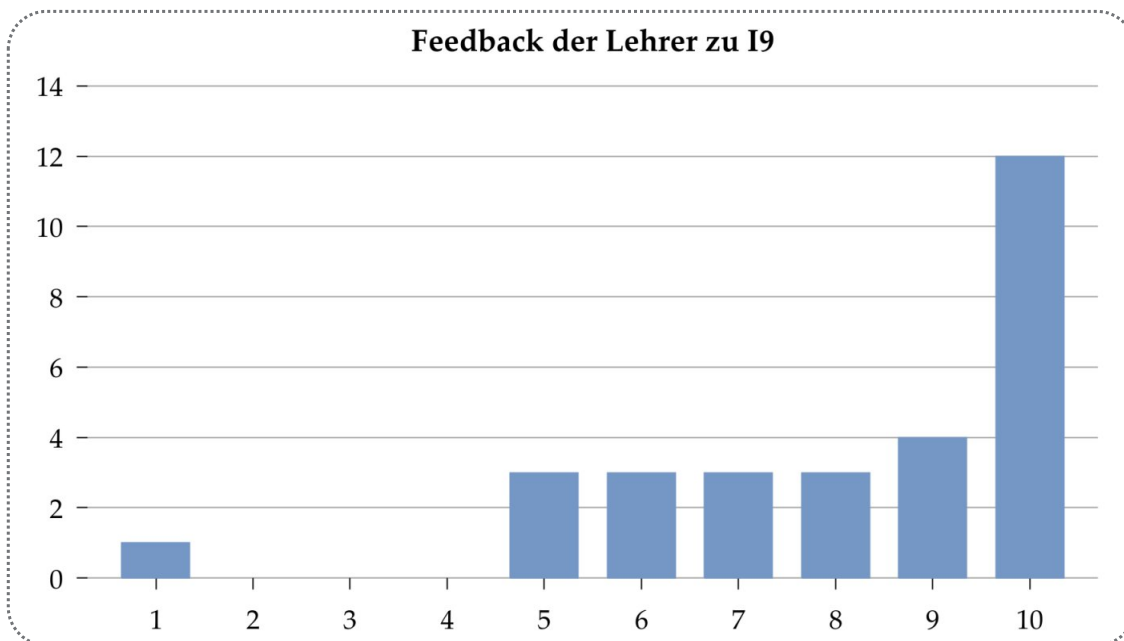


Abb. 98: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I9 mithilfe eines Säulendiagramms.

Bekräftigt wird diese Feststellung mit den Antworten auf die Frage in I17 (s. Tab. 48), in denen die Lehrer explizit die für die Feldstudie an den Schulen gewählten photochemischen Themen (s. Kap. 4.1.3) direkt in die für sie sinnvoll erscheinenden Unterrichtsreihen bzw. Inhaltsfelder einbanden. Somit kristallisiert sich hier das Einverständnis der Lehrer zur Veränderung des Unterrichts durch die Integration photochemischer Inhalte heraus.

I9: Photochemische Experimente sollten in den KLP integriert werden.
<ul style="list-style-type: none"> • alltagsrelevant • Sollte im Unterricht mehr behandelt werden. • Licht ist als Energiequelle omnipräsent, findet aber im Unterricht wenig Beachtung. • Erweiterung des Energiebegriffs • Vertiefung und Erweiterung des Energiebegriffs • Sinnvolle Erweiterung des Energiebegriffs mit der entsprechenden Veranschaulichung • Alltagsbezug • ...
I17: Falls Sie der Meinung sind, dass das Thema / die Themen in den aktuellen Lehrplan (Sek. 1 oder Sek. 2) passen: An welche Inhaltsfelder / Themen würden Sie das / die von Ihnen ausgewählte/n Thema/en anbinden?
<ul style="list-style-type: none"> • Der Lehrplan ist inhaltlich bereits sehr voll, aber grundsätzlich halte ich das Thema für alltagsrelevant und spannend. Thema 6 (s. Kap. 4.1.3) behandle ich ohnehin in der Q2, daran könnte man Thema 5 ideal anschließen. Thema 1 würde in Klasse 7 eher gesondert vorkommen müssen, ein ähnliches Themenfeld fällt mir momentan nicht ein. • Farbstoffe in der Q2 / Chemie (In der Jgst. 9 wird im Physikunterricht „Energie – Energieformen“ unterrichtet, daraus ergäbe sich ein schönes fächerübergreifendes Projekt.) • Farbstoffe in der Sek. 2 • Viele Möglichkeiten, z. B.: Farbstoffchemie (Q2), Elektrochemie (Q1), Kohlenstoffkreislauf (EF) • Bei der Sek. 1 wäre die Einbindung beim Thema <i>Stoffeigenschaften</i> gut. Bei der Sek. 2 bietet es sich auf jeden Fall im Themenfeld <i>Farbstoffchemie</i> an. • Farbe – (K)eine charakteristische Eigenschaft? (Sek. 1): Stoffeigenschaften, Jgst. 7; Photolumineszenz – Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz) (Sek.2): Farbstoffe, Q2; Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur: Kohlenstoffkreislauf, Einführungsphase • Das Thema <i>Solvatochromie</i> eignet sich am Ende der Unterrichtsreihe zum Thema <i>Farbstoffe und Farbigkeit</i>. Viele fachliche Inhalte können mit den Aufgabenstellungen (Thema 6) wiederholt werden. • Thema 1 (s. Kap. 4.1.3.): Stoffeigenschaften in der 7. Jgst.; Thema 6 und 7: Farben und Farbigkeit, Bindungslehre in der Q2; Thema 3: Stoffkreisläufe in der EF • Das Thema passt gut in den Lehrplan der Sek. 2 und könnte sowohl im Bereich der Stoffkreisläufe in der EF, in der Elektrochemie (Q1) als auch im Themenbereich Farbstoffe (Q2) verankert werden. • ...

Tab. 48: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I9 und I17.

Die Lehrer ($n_{I5} = 23$) wurden in I5 gebeten, die im Unterricht im Rahmen der photochemischen Themen eingesetzten Aufgaben den drei Schwierigkeitsgraden 1 (leicht), 2 (mittelmäßig) und 3 (anspruchsvoll) zuzuordnen. Im Mittel ordneten sie die Aufgaben ($M_{I5} = 2,02$) dem Schwierigkeitsgrad 2 zu (s. Abb. 99). Dass die Lehrer die meisten Aufgaben im Anforderungsniveau 2 sahen und zu einem geringeren Anteil jeweils im Anforderungsniveau 1 und 3, zeigt die Übereinstimmung ihrer Vorstellungen mit den Überlegungen des Forschers (s. Kap. 4.1.2). Impliziert wird dadurch, dass die gewählten photochemischen Themen durchaus auf Schulniveau mit für die jeweiligen Stufen angemessenen Aufgaben unterrichtet werden können. Außerdem zeigt die Rückmeldung der Schüler auf die Aussage in I4 *Die Aufgaben sind anspruchsvoll*, dass der Mehrheit das Anforderungsniveau weder zu niedrig noch zu hoch war

(s. Abb. 99, Abb. 100). Die Aussage wurde insgesamt durchschnittlich mit etwa 6 Skalenpunkten beurteilt. BECKER äußert sich dazu wie folgt: „Geringe Anforderungen des Chemielehrers bewirken zwangsläufig keine positiven Einstellungen. Im Gegenteil deutet sich für ältere Schüler hohe Wertschätzung bei durchaus gegebenen Leistungsanforderungen an“ [405].

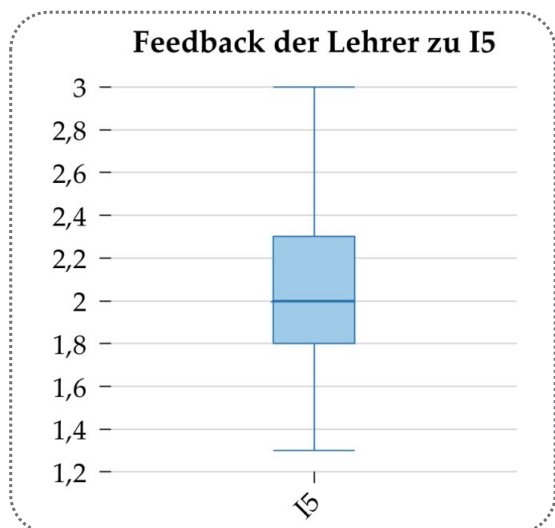


Abb. 99: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I5 mithilfe eines Boxplots.

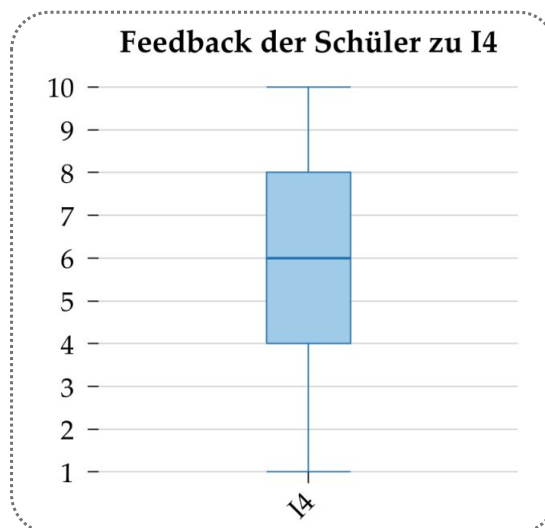


Abb. 100: Darstellung der Verteilung der Schülerbewertungen zum Item I4 mithilfe eines Boxplots.

Auch die Tatsache, dass die Lehrer unmittelbar im eigenen CU die Erfahrung mit unterrichtstauglichen Materialien mit soweit einsetzbaren Arbeitsaufträgen für die Schüler machten, könnte einen Beitrag zur positiven Resonanz der Lehrer auf die Einbindung photochemischer Inhalte erbracht haben, welche sich auf die Items 9 und 17 (s. Tab. 48) ausgewirkt haben könnte.

Werden die Werte zu I9 zusätzlich im Verhältnis zu der Beurteilung des neuen Lernertrags der Schüler (I8) betrachtet, so lässt sich aufzeigen, dass die Korrelation mit $r = 0,51$ (vgl. Kap. 5.2.4.1) groß ist (s. Abb. 101). Somit ergibt sich auch hierdurch eine Erklärung für das Interesse der Lehrer an der Integration photochemischer Inhalte in die KLPe als Gradmesser des Ausmaßes der Veränderung.

F.3. Ist potenzielle Nachhaltigkeit in der praktischen Umsetzung der Integration photochemischer Inhalte zu erkennen? (Nachhaltigkeit)

Dass zur dauerhaften Veränderung durch die Innovation, in diesem Fall die photochemischen Inhalte, Potenzial besteht, kann bereits anhand der Ergebnisse zum Merkmal *Integrierbarkeit in den KLP* (I9) (s. F.2) identifiziert werden. Der Abb. 98 (s. F.2) ist zu entnehmen, dass mit einer Ausnahme alle Lehrer die Integration photochemischer Inhalte in die KLPe erwarten bzw. für möglich halten.

Ein möglicher Bedarf nach Innovation, den Lehrer empfinden könnten, wäre ein weiterer Indikator zur nachhaltigen Integration photochemischer

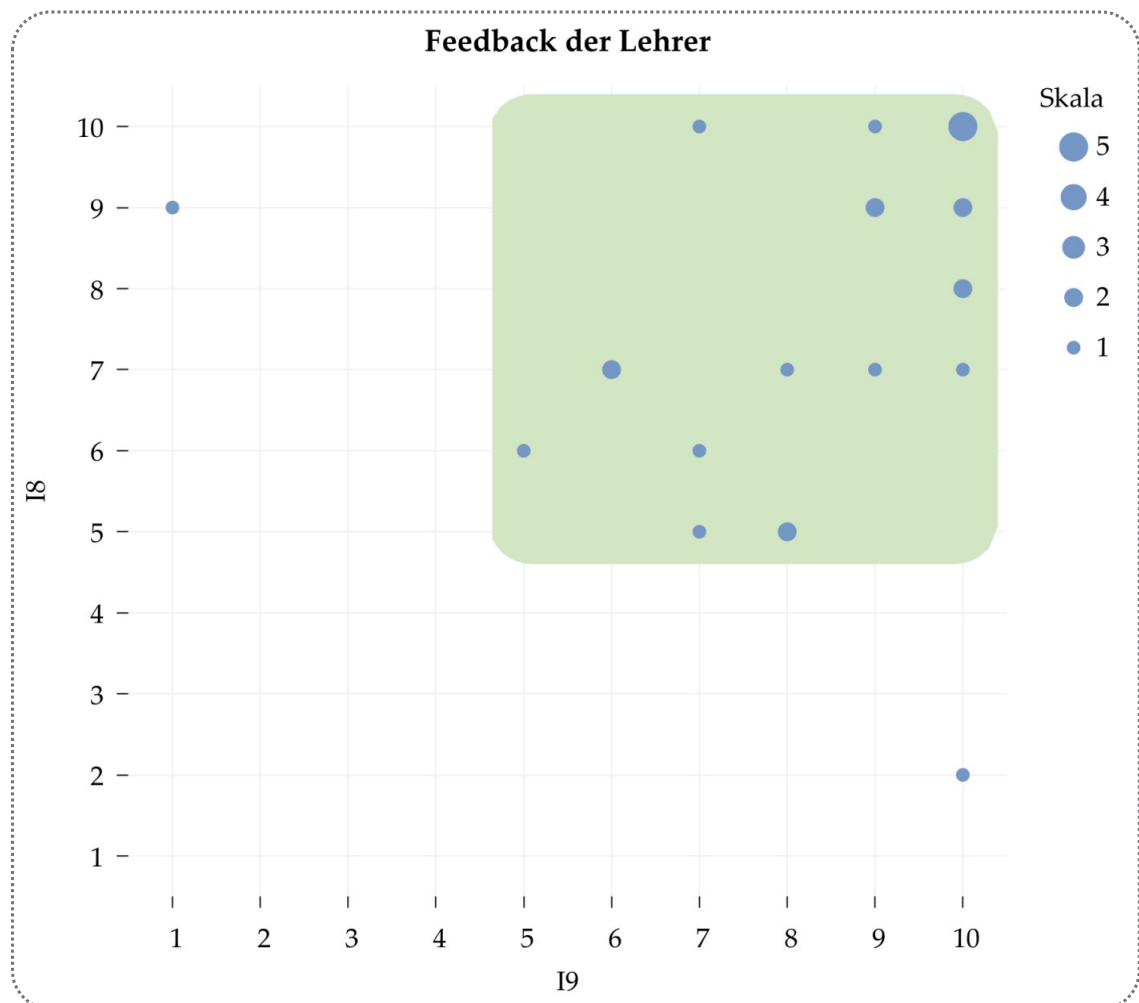


Abb. 101: Streudiagramm zur graphischen Darstellung der beiden statistischen Merkmale *Lernertrag* (I8) und *Integrierbarkeit in den KLP* (I9) bei der Intervention aus den Lehrer-Feedbackbögen.

Inhalte. Um diesen identifizieren zu können, wurde den Lehrern sowohl im ersten Anlauf als auch bei der Follow-up-Messung (s. Kap. 5.2.3.1) jeweils ein Item (I14; I19) dazu gestellt. Anhand der Antworten darauf lässt sich nicht nur der tatsächliche Bedarf feststellen, sondern zudem noch konkretisieren (s. Tab. 49, I14): Wenn davon ausgegangen werden kann, dass es sich bei den aufgezählten Experimenten nicht um *Showexperimente* [397] handelt, die unabhängig vom aktuellen Wissensstand der Schüler in einer beliebigen Jahrgangsstufe zu motivierenden Zwecken eingesetzt werden können, dann sind die von den Lehrern aufgeführten photochemischen Experimente fachinhaltlich hauptsächlich in der Oberstufe zu verorten. Dabei war das mit Abstand am meisten genannte Experiment die radikalische Substitution bzw. lichtinduzierte Halogenierung von Alkanen (vgl. Kap. 2.2.1.2; Kap. 3.4.2.3, 1). Dies impliziert, dass besonders in der Unterstufe photochemische Experimente scheinbar keine Anwendung finden oder die Lehrer keine für den Chemieunterricht in der Unterstufe kennen. Letzteres zeigt neben der Tatsache, dass auch für die Oberstufe kaum von einer Vielfalt an photochemischen Experimenten gesprochen werden kann, umso mehr den Bedarf unterrichts-

konformer photochemischer Experimente für die Unterstufe (vgl. Kap. 3.3.2). Abgesehen davon ist die Frage, inwieweit es sich bei den von den Lehrern für die Chemiekurse in der Oberstufe aufgezählten Experimente um Schülerversuche handelt. Außerdem zeigt sich die Nachfrage und somit der Bedarf auch in den Antworten zu I23 (s. Tab. 47). Explizite Argumente für ihren Bedarf danach geben die Lehrer in I19 (s. Tab. 49).

I14: Nennen Sie alle photochemischen Experimente, welche Sie zuvor in Ihrem Chemieunterricht eingesetzt haben.

- Radikalische Substitution
- Fluoreszenz / Phosphoreszenz / Chemolumineszenz
- Leider habe ich bisher keine photochemischen Versuche eingesetzt und wollte deshalb auch unbedingt an Ihrer Studie teilnehmen.
- Bisher nicht angewendet
- Bau eines solarwasserstoffbetriebenen Autos mit entsprechenden Versuchen; radikalische Substitution mit Brom; zahlreiche Experimente zur Fotosynthese
- Photo-Blue-Bottle
- Fluoreszenz-Versuche
- ...

I19: Wie würden Sie den Bedarf an photochemischen Experimenten begründen?

- Sie sind relativ einfach, sie sind schön und sie sind sinnvoll.
- Erweitert das Verständnis von chem. Reaktionen, ist wegweisend / aktuell. Vertieft den Umgang mit experimentellen Fragestellungen / Ergebnissen.
- Der Energie-Aspekt kommt im Kernlehrplan meiner Meinung nach zu kurz und über die photochemischen Experimente lässt er sich sehr gut einbringen.
- Aktuelles Thema: Energie, Klimaveränderung, Bedeutung von Lichtenergie
- Die Lichtenergie ist eine wichtige und innovative Energiequelle, welche bei vielen chemischen Reaktionen eine tragende Rolle spielt. Häufig kennen Schülerinnen und Schüler nur Wärmeenergie oder elektrische Energie.
- Hoch, da bei den SuS nur wenig Wissen / Vorwissen vorhanden ist.
- Durch die Experimente lassen sich „einfach“ die Fachinhalte wiederholen und vertiefen.
- Experimente gehören (s.o.) zum Chemieunterricht, Photochemie ist ein aktuelles Thema auch i.S. von Nachhaltigkeit, von daher ergibt sich eine zunehmende Notwendigkeit, solche Themen in einem modernen Unterricht experimentell einzubringen.
- Es stellt einen großen Alltagsbezug dar (Licht spielt eine entscheidende Rolle) und ist interdisziplinär (beispielsweise mit Biologie) anwendbar. Ferner motiviert das Thema die Schülerinnen und Schüler, da es u.a. handlungsorientiert ist und sie ihr Wissen auf einen neuen Aspekt anwenden können.
- ...

Tab. 49: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I14 und I19.

Insgesamt geben die Lehrer auf die Frage, ob sie die Experimente in Zukunft in ihren Unterricht einbinden würden, eine recht positive Rückmeldung (s. Tab. 50, I13). Zwei der Lehrpersonen verweisen jedoch auf das Hindernis der Einbindung durch einen möglichen Zeitmangel (s. Tab. 50, I20).

„Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für die Umsetzung von Innovationen im Unterricht ist [...] die Motivation der Lehrpersonen diese auch tatsächlich umzusetzen zu wollen. Dazu ist es erforderlich, dass Lehrkräfte in der Innovation einen Vorteil gegenüber der bestehenden Praxis wahrnehmen und

I13: Vervollständigung der Aussage „Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärme oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter /ebenso relevant /weniger relevant sein?“
<ul style="list-style-type: none"> • Nahezu unerschöpfliche Energiequelle • Überlebenswichtig • Da die Beobachtungen eindeutig und motivierend sind. • Zukunftsträchtig, gute fächerübergreifende Verknüpfungsmöglichkeiten (Bio / Physik). • Bewusstsein der Schulen für Licht als Energiequelle • ...
I20: Würden Sie die Experimente (zu den von Ihnen gewählten Themen) in Zukunft in Ihren Unterricht einbinden wollen? Begründen Sie bitte Ihre Antwort.
<ul style="list-style-type: none"> • Ja, da eine tolle Verknüpfung zu Physik besteht und beim Thema <i>Farbstoffe</i> ein weiterer Aspekt hinzukommt, und so das Thema mehr Tiefe bekommt. • Ja! Farben und Farbänderungen haben einen hohen schüleraktivierenden Effekt. Die Experimente sind einfach und gut durchzuführen. Das Material ist perfekt vorbereitet. Der Energieaspekt kann gut integriert werden. Wiederholung von Lösungsmitteln und Wechselwirkungen zwischen Molekülen. • Ja, da sie inhaltlich sehr gut auf den Lehrplan zugeschnitten sind; da man geringe Mengen an Chemikalien benötigt; da die Schüler viel Spaß hatten; die benötigte Chemikalienmischung hält sich lange und ist wiederverwendbar. • Teilweise. Thema 6 und 7 ja, weil es gut in den Unterricht passt. Thema 1 passt thematisch nicht gut in Klasse 7, daher würde ich es nur machen, „wenn ich noch Zeit habe“... • Wenn die Zeit es zulässt, würde ich sie einbinden, weil sie interessante, den Schülern relativ unbekannt Themen darstellen, die es lohnt, den Schülern näher zu bringen. Wir haben jetzt die Materialien, demzufolge kann und sollte man sie auch nutzen. • Ich würde „Photolumineszenz – Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz“ und „Solvatochromie – Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Feststoffs in verschiedenen Lösemitteln“ (s. Kap. 4.1.3.1) unbedingt weiterhin in den Unterricht einbinden, weil die Experimente die Theorie veranschaulichen und für die SuS sichtbar machen. • Ja, in den kommenden LKs werde ich das Thema (Solvatochromie) einbinden und habe es auch den Kollegen auf unserer Fachkonferenz empfohlen. • In den Jahrgängen 7 (AB 1) und in der Q2 (AB 6 und 7) fand ich den Einsatz sehr gewinnbringend für die SuS und binde sie daher weiterhin ein. • Ich binde die Experimente in meinen Unterricht ein zur Vertiefung und als Exkurs zu den behandelten Themen im Bereich der Stoffkreisläufe (EF - Photosynthese), der Elektrochemie (Q1 – Konzentrationszellen, erneuerbare Energien) und bei den Farbstoffen (Q2 – Licht und Farbe (Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Struktur und Farbe)), jeweils mit einem anderen Schwerpunkt. • Ja, wenn ich noch Zeit über habe. Das wird evtl. im aktuellen LK der Fall sein. Wenn in einem GK einer Abi in Chemie macht (und das ist fast immer der Fall), sehe ich keine Chance.

Tab. 50: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I13 und I20.

die Bedeutsamkeit der Innovation erkennen“ [53]. Deshalb wurden die Lehrpersonen nach den Vor- und Nachteilen der eingesetzten photochemischen Experimente gefragt, die sich für sie durch die Interventionen in ihrem Unterricht erschlossen (I11). Hierbei wurde differenziert zwischen den Antworten der Lehrer, die in der Sek. 1 und Sek. 2 die Einzelstudien durchführen ließen. Lehrer sehen in den photochemischen Experimenten

tendenziell die Aspekte als Vorteile, welche die interviewten Lehrer sich von Experimenten wünschten (s. Kap. 3.4.2.2). Gleichzeitig werden mit den genannten Vorteilen (und den Antworten auf I18 (s. Tab. 47, I18)) sowohl die Befürchtungen einiger Lehrer (s. Kap. 3.4.2.2, 3) als auch teilweise die Fehlvorstellungen der Studierenden (s. Kap. 3.4.2.3) entkräftet. Eines der Vorurteile, die von einer Lehrperson als Argument gegen den Einsatz photochemischer Experimente genannt wurde, war beispielsweise die hohe Klassenstärke. Jedoch wurden photochemische Experimente auch in Klassen mit bis zu 32 Schülern im normalen Unterricht durchgeführt.



Abb. 102: Einzelstudie in einer Klasse mit 32 Schülern.

Zwar werden insgesamt mehr Vorteile als Nachteile angegeben, jedoch fällt bei näherer Betrachtung Letzterer auf, dass hauptsächlich Schwierigkeiten genannt werden, die eventuell durch sinnvolle Binnendifferenzierung bzw. die Möglichkeit der didaktischen Reduktionen eliminiert werden könnten. Denn beispielsweise lauten die Einwände: „schwierig zu erklären“, „schwere Begriffe“, „zu komplexe Verbindungen“. Dennoch ist festzustellen, dass einige Lehrer, zumindest in bestimmten Jahrgangsstufen; Schwierigkeiten antizipieren, über die sie sich zusätzlich mit Blick auf den genauen Einsatz der Arbeitsmaterialien und ihrer didaktischen Aufarbeitung, angepasst an ihre Lerngruppen, Gedanken machen müssten. Abgesehen davon sehen die meisten Lehrer hauptsächlich ein materielles Problem, das mit dem Wunsch der Integration photochemischer Inhalte entstehen könnte: Die fehlenden, aber nötigen Chemikalien und Gerätschaften (I 22). Mit Berücksichtigung des Mehrwerts der Einbindung photochemischer Experimente (s. Tab. 47, I15; Tab. 48, I9; Tab. 50) sollten die anfallenden Kosten (vgl. 4.1.1.1.1, Tab. 32, Tab. 33) nicht als eine Last betrachtet werden, zumal Schulen jährlich Budgets für Neubeschaffungen erhalten oder Anträge auf finanzielle Förderungen beispielsweise bei dem Förderwerk des Verbandes der Chemischen Industrie, dem Fonds der Chemischen Industrie, gestellt werden können [547].¹⁷¹ Der Wunsch nach einer dauerhaften Veränderung durch die Einführung der Innovation ist bei den Lehrern zwar durchaus vorhanden, jedoch besteht die Befürchtung der Verhinderung der Innovationsumsetzung durch den Mangel an Materialien.

¹⁷¹ Diese bieten seit 1950 Fördermaßnahmen zur „Förderung von Schulen, um den experimentellen Chemieunterricht zu fördern“ [548].

I11: Nennen Sie Vor- und Nachteile der eingesetzten photochemischen Experimente. (Sek. 1)

Vorteile

- Einfache Durchführbarkeit
- Risikoarm
- Einfache und schnelle Experimente
- Sie haben den Schülern Spaß gemacht
- Ungefährlich, schnell, einfach, funktioniert

Nachteile

- Evtl. Gefährdungspotential der Stoffe
- Thema *Farbstoffe* muss aufgrund des fehlenden Vorwissens sehr black-box-artig bleiben; Zusammenhang zwischen Struktur und Farbigkeit erst in der Q2 zu leisten.
- Schwierig zu erklären

I11: Nennen Sie Vor- und Nachteile der eingesetzten photochemischen Experimente. (Sek. 2)

Vorteile

- Schöne Beobachtungen
- Schnell, einfach; klare Beobachtung
- Unglaublich faszinierendes Experiment; Modellvorstellung von Experimenten wird vertieft; Energiediagramme; Photochemie kommt bisher nicht in den KLP vor.
- Gute Durchführung
- Leicht erklärbar
- Neues, für SuS spannendes Themenfeld, abwechslungsreiches Themenfeld
- Kleine Gefäße, geringer Chemikalienaufwand, tolle Taschenlampe, geringer Aufwand, viele Erkenntnisse, aktuelles Thema
- Alltagsbezug; Vernetzung mit Physik
- Sehr einfach aufgebaut u. daher gut im Unterricht einsetzbar; Effekte sind zuverlässig; eingesetzte Chemikalien sind ungefährlich; Materialien können in kleinen Schülergruppen eingesetzt werden
- Alltagsbezug wird erhöht im Bereich von lichtgetriebenen Reaktionen; Modellexperimente helfen den SuS bei der Erweiterung ihres Fachwissens und ihrer Erkenntnisgewinnung.
- Kleine Mengen; einfache Handhabung; SuS sind nicht an Begriffe wie EDTA gewöhnt. Aber das ist kein Nachteil.

Nachteile

- Kurzes Experiment aus Sicht der Lernenden
- Zu komplexe Verbindungen; Chemikalien sind meistens nicht Bestandteil der Sammlungen
- Transfer fällt einigen SuS schwer
- Chemikalien haben für manche Jahrgangsstufen einen komplexen Aufbau, der eventuell das Verständnis stören könnte.
- Teilweise schwierige Begriffe

I22: Welche Probleme könnten Ihnen ggf. beim Einsatz der Experimente begegnen?

- Der ohnehin schon sehr volle Lehrplan und möglicherweise nicht im Bestand vorhandene Chemikalien oder Materialien.
- Es müssen zunächst die Lampen besorgt werden. Es muss ggf. stark von der Lehrkraft gelenkt werden, da das Thema recht komplex ist.
- Das wird sich in Zukunft zeigen, wenn ich es mit meinem jetzigen LK wieder durchführe. Vorab antizipiere ich eigentlich keine Probleme.
- Man benötigt mehrere (kostspielige) Taschenlampen. Ansonsten keine Probleme.
- Noch fehlt die curriculare Anbindung und der Gedanke, dass man das Pflichtprogramm nicht schafft, könnte daran hindern, die „Kür“ zu laufen.
- Fehlende Chemikalien, geringe Anzahl an Taschenlampen

- Hauptsächlich die Anschaffung der Chemikalien (Kosten)
- Ich persönlich hatte keine Probleme beim Einsatz der Experimente.
- In den Jahrgängen der Sek I haben wir teilweise Klassenstärken von über 30 SuS, das macht Experimentieren je nach Gruppenzusammensetzung manchmal schwierig.
- Bei einer geteilten Gruppenarbeit (ABs) kann es sein, dass einzelne Gruppen mit den Aufgabenstellungen überfordert sind und die Nachbesprechung zeitaufwändig wird.

Tab. 51: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I11 und I22.

F.4. Ist anhand der Rückmeldungen der Lehrer eine Befürwortung der Verbreitung der photochemischen Experimente zu erkennen? (Verbreitung)

Die Verbreitung ist im Vergleich zu den anderen drei Erfolgsindikatoren eine quantitative [41]. Die Frage nach der Verbreitung der Innovation innerhalb der Schule unter den Lehrern lässt sich zwar schon teilweise unmittelbar aus der Antwort zur Frage nach der Nachhaltigkeit erschließen, dennoch wurden diesbezüglich den Lehrern die Fragen in I10 und I21 gestellt.

Bereits in dem Feedback-Durchlauf unmittelbar nach den Einzelstudien kristallisierten sich in den Antworten auf die Frage nach Gründen (s. Tab. 52, I10), die laut der Lehrer gegen die Integration von photochemischen Experimenten sprachen, insbesondere zwei Gegenargumente heraus; zum einen mit Blick auf die obligatorischen Inhalte in den KLPen die fehlende Zeit, und zum anderen die fehlenden, aber dafür nötigen Materialien wie Taschenlampen usw. Da beide Aspekte zudem in der Follow-up-Messung angegeben wurden (s. Tab. 50, I20; Tab. 51, I22), scheinen sie für die Lehrer die Hauptargumente zu sein, die gegen die Integration der neuen Innovation sprechen, obwohl sie gleichzeitig auch den Einsatz photochemischer Experimente in Zukunft bejahen (s. Tab. 50, I20). Da die „Intensität der Verbreitung [...] direkt aus den Kommunikationsprozessen der Systemmitglieder“ resultiert [34], wurde zusätzlich gefragt, mit welchen Argumenten sie Kollegen zur Innovationsumsetzung zu überzeugen versuchen würden (s. Tab. 52, I21): Eine Verbreitung wäre somit möglich, da die Lehrpersonen einen erheblichen Mehrwert darin sehen.

Jedoch ist der angegebene Materialmangel kein zu verharmlosendes Gegenargument. Gleichzeitig ist diese Angabe ein Indikator dafür, dass Lehrende über mögliche finanzielle Fördermaßnahmen für den Chemieunterricht aufgeklärt werden sollten. Obwohl viele Aussagen der Lehrer darauf hindeuten, dass sie die photochemischen Themen als lehrplankonform ansehen, macht der von einigen Lehrern als Gegenargument genannte Zeitmangel darauf aufmerksam, dass die Integration bzw. Umsetzung neuer Experimente und Inhalte bzw. Kontexte von den Lehrern eine gewisse Flexibilität sowie aktive Teilhabe an der Innovationsumsetzung verlangt. Denn ohne diese könnte jede Innovation als ein sich nicht lohnender Zeitvertreib betrachtet werden, sodass eine Weiterempfehlung es nicht wert wäre. Jedoch befinden sich gerade diese Lehrpersonen im Angesicht der unbestrittenen Bedeutung der Lichtenergie für die technische Zivilisation (s. Kap. 1) mitten in einer Diskrepanz: Auf der einen Seite sehen sie einen Zeitmangel aufgrund der

Stofffülle der KLPe (s. Tab. 52, I10) und auf der anderen Seite kann die Bedeutung der Lichtenergie in Zukunft auch im Chemieunterricht nicht abgestritten werden (s. Tab. 50, I13). So wird auch an dieser Stelle deutlich, dass möglicherweise eine inhaltliche Aktualisierung und Anpassung der KLPe mit Berücksichtigung der Gleichberechtigung von Energieformen hilfreich für die Lehrer wäre, um aus diesem Dilemma herauszukommen. Denn grundsätzlich werden die photochemischen Experimente von den Lehrpersonen begrüßt, sodass sie eben auch Gründe darin sehen, sie ihren Kollegen weiterzuempfehlen.

I10: Gibt es Gründe, die gegen die Integration von photochemischen Experimenten in den Chemieunterricht sprechen? Wenn ja, welche sind das?

- Hohe Materialkosten
- Zeitdruck
- Allgemeine Stofffülle des KLP
- Keine Zeit, aber das darf kein Argument sein
- Farbänderung aufgrund der Molekülstruktur in der Sek I nicht zu klären.
- Unterricht ist schon inhaltlich überfrachtet
- Fehlende Materialien
- ...

I21: Mit welchen Argumenten würden Sie andere Lehrpersonen davon überzeugen, diese photochemischen Experimente im Unterricht einzusetzen?

- Licht, Farbe und Lichtenergie sind wichtige Themen unserer Zeit.
- Wenig Aufwand, da bereits ausgearbeitete Materialien vorliegen. Die SuS werden mit neuen Methoden konfrontiert und können viel selber entwickeln; Motivation.
- Einfach durchzuführen, tolles Material, Schüleraktivierung, völlig neue Sichtweise auf „bekannte“ Probleme.
- Ich würde Anderen die Materialien und insbesondere die Experimente zeigen. Dass es inhaltlich passt, ist weniger das Problem, aber dass es praktikabel ist, muss deutlich werden.
- Schnelle Umsetzung, einfache Vorbereitung, hohe "Gelingensgarantie", tolle Effekte
- Wenig Aufwand, hoher Ertrag und Freude bei den SuS.
- Durch die Experimente lassen sich „einfach“ die Fachinhalte wiederholen und vertiefen. Der experimentelle Aufwand ist außerdem gering und es lassen sich eindeutige Beobachtungen machen.
- Die photochemischen Experimente besitzen einen hohen Alltagsbezug und können gut als Modellexperimente im Unterricht verankert werden. Sie motivieren die Schülerinnen und Schüler und ermöglichen einen neuen Blickwinkel zu bereits behandelten Themen.

Tab. 52: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I10 und I21.

6 Reflexion und Optimierung der eingesetzten Unterrichtsmaterialien

Im Sinne der Aktionsforschung (s. Kap. 2.1.4.3) wurden während der Forschungsarbeiten (s. Kap. 5.2.5, Abb. 79) neue Ideen seitens des Forschers selbst, aber auch solche der Schüler und Lehrer sowie hilfreiche Empfehlungen zur Optimierung der Materialien im Hinblick auf die Unterrichtskonformität berücksichtigt. Nachdem die ursprünglichen Versionen der Arbeitsblätter (s. Kap. 6.1) und der Experimente (s. Kap. 6.3; Kap. 6.4) revidiert wurden, sind die neuen Ideen verschiedenen Tests unterzogen worden. Da sie klare Vorteile zeigten, konnten sie schließlich integriert bzw. als Optimierungen allen an der Studie teilnehmenden Lehrern mitgeteilt werden. So wurden unter anderem die im Folgenden erläuterten Optimierungsmöglichkeiten umgesetzt.

6.1 Arbeitsblätter

Nach dem Meinungsaustausch des Forschers und der Lehrer während der Pilotstudien (s. Kap. 5.3) und der Lehrerfortbildungen (s. Kap. 5.4.2.2) wurden der Aufbau und der Inhalt der Arbeitsblätter überdacht. Zwar seien sie sehr kompakt und durch ihren Aufbau bei der Strukturierung des Unterrichts behilflich, die Aufgaben ließen sich deshalb besonders einfach den Schülergruppen arbeitsteilig zuteilen; andererseits jedoch führe ihre inhaltliche Fülle auf den ersten Blick zu Verwirrung, zumal die Schüler die Arbeit mit dieser Art von Arbeitsblättern nicht gewohnt seien. So wurden aus den sogenannten *Arbeitsapparaten* (vgl. Kap. 4.1.2; Kap. 5.3.2) einzelne Arbeitsblätter entwickelt. Hierfür wurde jedes Arbeitsblatt (s. Kap. 4.1.3) aufgesplittet in die einzelnen farblich unterlegten Aufgabenblöcke (s. Abb. 103; Abb. 104). Aus dem Inhalt eines Aufgabenblocks wurde dann jeweils ein sogenanntes Einzelarbeitsblatt entwickelt. Exemplarisch befinden sich die Einzelarbeitsblätter zum Arbeitsblatt 1 und 7 im Anhang (s. Kap. 9.4.2). Zusätzlich zu den ursprünglichen Arbeitsblättern wurden auch die Einzelarbeitsblätter auf der Seite *Chemie mit Licht* online gestellt [443].

Zudem wurden zum besseren Verständnis einige Ausdrücke in den Aufgaben ausgetauscht oder die Reihenfolge der Aufgaben innerhalb einiger Aufgabenblöcke nach Anforderungsniveau geändert. Nach den ersten Einzelstudien wurde das Glossar beispielsweise um die Lösemittel Aceton und Xylol ergänzt, da deren Strukturformeln einigen Schülern, das legten ihre Nachfragen nahe, nicht bekannt zu sein schienen.

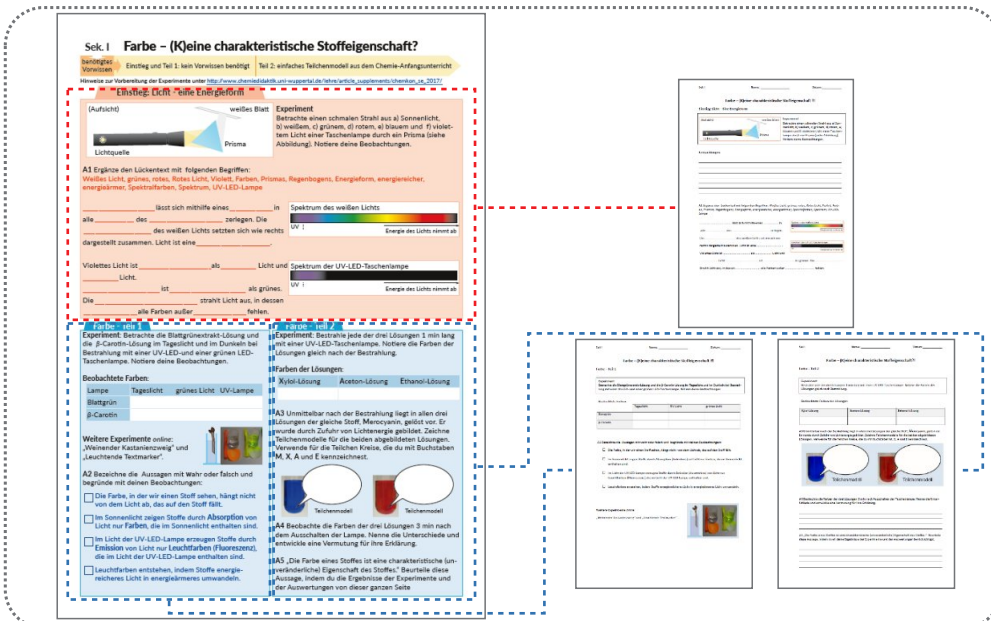


Abb. 103: Arbeitsblatt 1 (s. Kap. 4.1.3), aufgeteilt in drei Einzelarbeitsblätter.

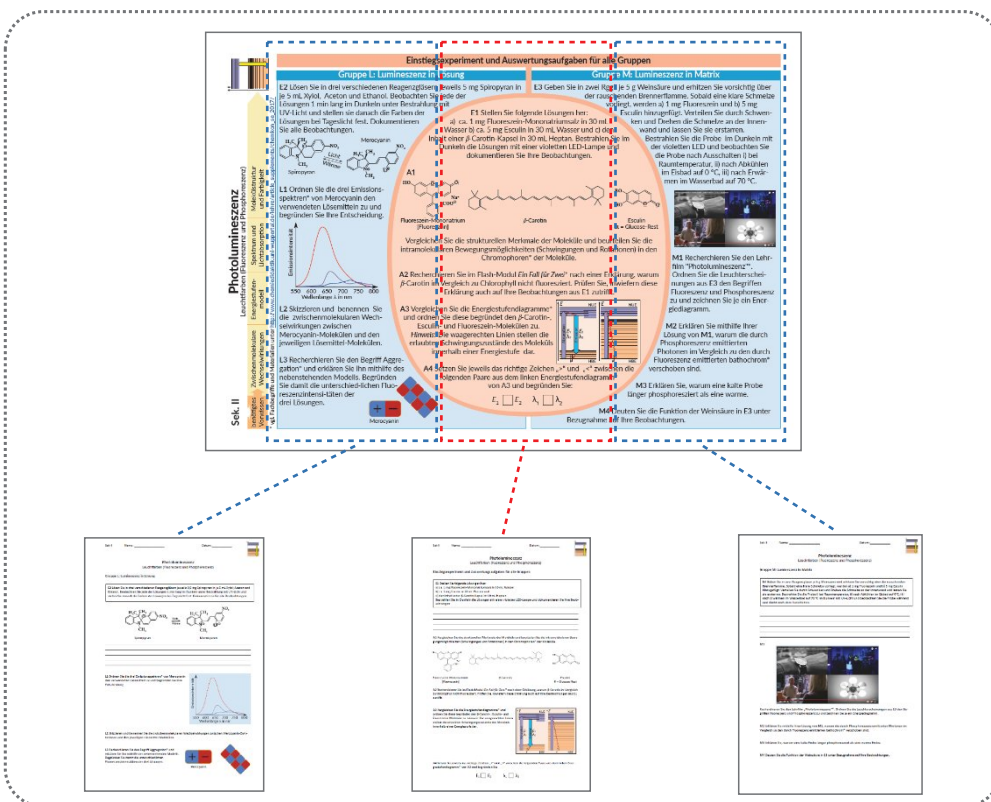


Abb. 104: Arbeitsblatt 7 (s. Kap. 4.1.3), aufgeteilt in drei Einzelarbeitsblätter.

6.2 Die BlackBox

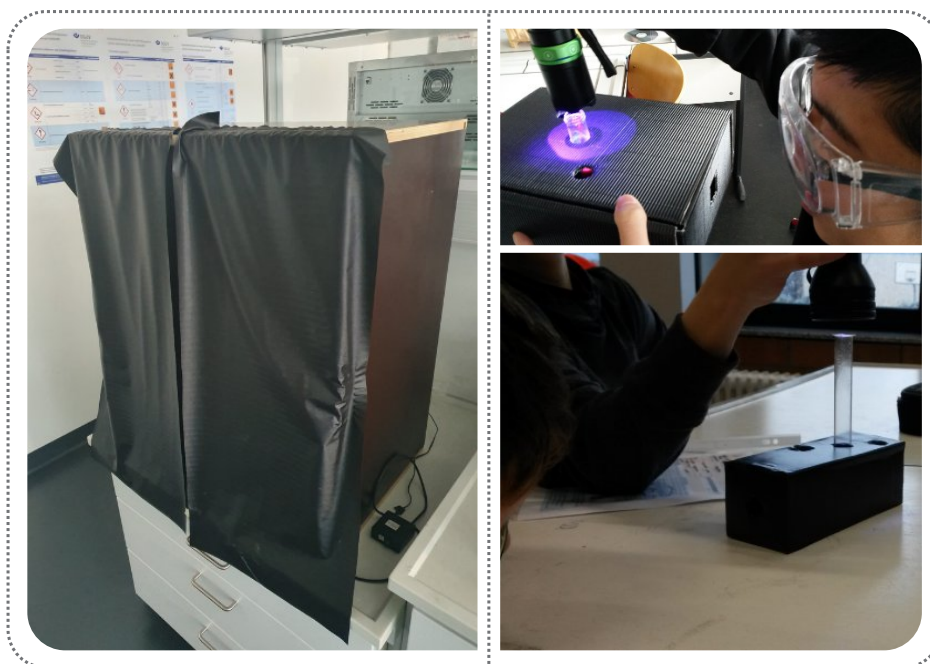


Abb. 105: Links ist die herkömmliche schwarze Holzbox zu sehen, rechts die für die Einzelstudien an den Schulen genutzten *BlackBoxen*.

Für die Experimente b, e, f und g (s. Kap. 4.1.1.1.2), bei denen eine Fluoreszenz bzw. Phosphoreszenz zu beobachten ist, wurde in der Universität bislang eine ca. $1,0 \times 0,4 \times 1,0 \text{ m}^3$ große Holzbox mit einer schwarzen Innenfläche und einem schwarzen Vorhang genutzt (s. Abb. 105). Da der Forscher alle Schulen mit öffentlichen Verkehrsmitteln aufsuchte und alle Materialien dementsprechend in einem Koffer transportiert wurden, wäre die Mitnahme der Holzbox nicht möglich gewesen. So wurde aus Schuhkartons und Taschenlampenkartons eine Low-Cost-Version, die *BlackBox*, entworfen (s. Abb. 105, 106), welche auch in den Praktika der Lehramtsstudierenden bereits ihren Einsatz fand. Dafür wurde in der letzten Version die Innen- und Außenfläche mit schwarzer Klebefolie beklebt. In die Oberseite wurden zur Befestigung von Reagenzgläsern drei Löcher geschnitten. Damit können drei Substanzen parallel betrachtet und verglichen werden (s. Abb. 105). Um hineinschauen zu können, wurde in die Seitenfläche des Kartons ein Guckloch gebastelt. Dieses wurde von einigen Schülern auch verwendet, um die Beobachtungen zu fotografieren (s. Abb. 106). Die *BlackBoxen* konnten, laut dem Erfahrungsbericht einer Lehrperson aus Bielefeld (s. Abb. 105, oben rechts), ganz leicht nachgebastelt werden. Ebenfalls ist es möglich, die Schüler die Boxen zu Hause basteln und dann in den Chemieunterricht mitnehmen zu lassen.

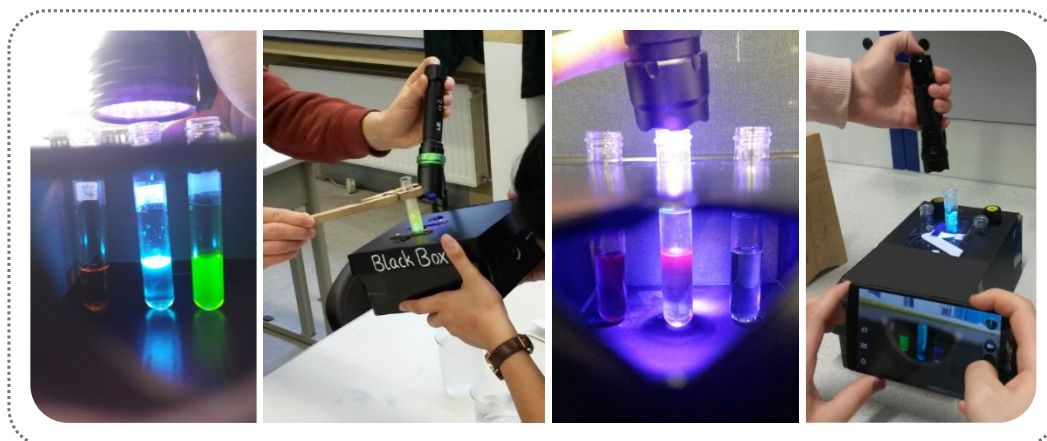


Abb. 106: Einsatz der *BlackBox*.

6.3 Lösung von Spiropyran in Heptan

In den Experimenten d, e und f (s. Kap. 4.1.1.1.2), die in die Arbeitsblätter zum Thema *Farbigkeit und Lichtenergie* (s. Kap. 4.1.3.1) integriert sind, wird der Feststoff Spiropyran in unterschiedlichen Lösemitteln gelöst, so auch in Xylol. In Kooperation mit einer Schule in Bonn wurde von einer Lehrperson das Lösemittel Heptan vorgeschlagen, das aufgrund seiner geringeren Gefährlichkeit statt Xylol verwendet werden könnte (vgl. [527]).

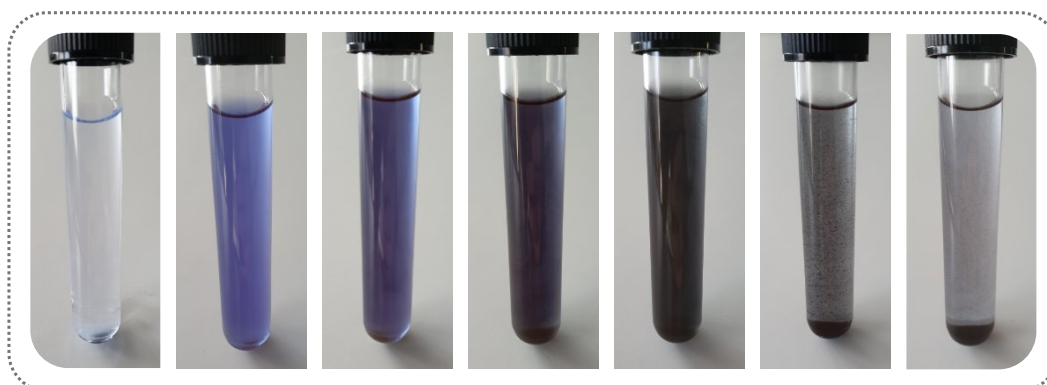


Abb. 107: Aussehen der Spiropyran-Heptan-Lösung (1. Foto) nach Bestrahlung in zweiminütigen Abständen (2. – 5. Foto) und Stehenlassen (6. – 7. Foto).

Es wurde sowohl an der Schule als auch in den Laboren der Universität dieser Vorschlag getestet. So wurde Spiropyran in Heptan gelöst und eine gesättigte Spiropyran-Lösung erhalten (s. Abb. 107, 1. Foto). Nach Bestrahlung mit violetterem Licht (ca. 400 nm) (s. Kap. 4.1.1.1.2) färbte sich die Lösung wie im Falle von Xylol oder Toluol auch blau (s. Abb. 107, 2. Foto). Nach permanenter Bestrahlung wurde in Abständen von zwei Minuten die Beobachtung aufgenommen (s. Abb. 107, 3. – 5. Foto). Im Laufe der Bestrahlung wurde die Trübung der Lösung immer intensiver und es konnte beobachtet werden, dass schwarz aussehende Partikel ausfielen. Nach Beendigung der Bestrahlung und dem Stehenlassen der Lösung setzten sich diese unten im Schraubdeckelglas ab (s. Abb. 107, 6. – 7. Foto; Abb. 108). Da durch die Bestrahlung mit violetterem Licht

sich aus Spiropyran normalerweise das für die Farbe der Lösung verantwortliche Isomer Merocyanin bildet (s. Kap. 2.3.2.1; Kap. 2.3.3.4), lag die Vermutung nahe, dass in diesem Fall Merocyanin dabei als Feststoffpartikel ausgefallen sein könnte. Das gleiche Phänomen zeigte sich in SPINNENS *Untersuchungen zur Aggregation von Spiropyran / Merocyanin in Cyclohexan* [179]. Deshalb wurde in Anlehnung an seine Arbeit, jedoch auf einem in der Schule durchführbaren Weg, der Feststoff durch Filtration getrennt (s. Abb. 109). Im Anschluss wurde mit einem *Phonescope*¹⁷² der Rückstand im Filterpapier vergrößert betrachtet (s. Abb. 110).

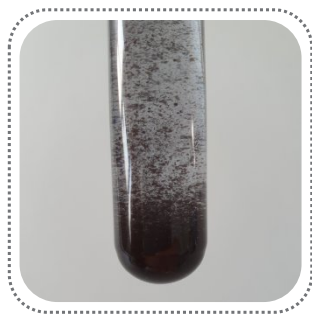


Abb. 108: Absetzen eines schwarzen Feststoffs nach Bestrahlung der Spiropyran-Heptan-Lösung.

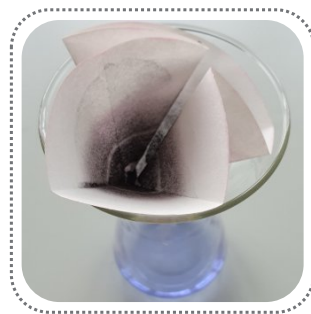


Abb. 109: Filtration der entstandenen Suspension aus der bestrahlten Spiropyran-Heptan-Lösung.

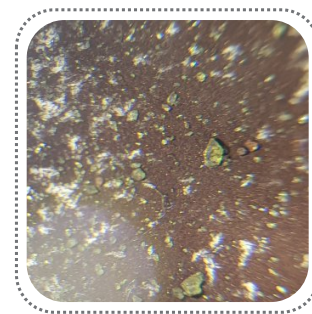


Abb. 110: 30-fache Vergrößerung des Partikelrückstands auf dem Filterpapier.

Der Partikelrückstand wurde, wie von SPINNEN beschrieben, anschließend in unterschiedlichen Lösemitteln, hier in Ethanol, Aceton und Xylol, gelöst (s. Abb. 111). Tatsächlich zeigten sich, wie auch bei Cyclohexan, die typischen Lösungsfarben, die zu beobachten sind, wenn Spiropyran in den drei angegebenen Lösemitteln gelöst wird und diese Lösungen anschließend mit UV-Licht bestrahlt werden, sodass dadurch Merocyanin entsteht (s. Kap. 4.1.1.1.2, d) (s. Abb. 111). Somit kann auch hier davon ausgegangen werden, dass es sich bei dem Feststoff in der durch Bestrahlung der Spiropyran-Heptan-Lösung entstandenen Suspension um Merocyanin-Partikel handelt (vgl. [179]).



Abb. 111: Partikelrückstände aufgeteilt auf die drei Schraubdeckelgläser. Rechts: Partikelrückstände gelöst in Ethanol, Aceton und Xylol (v.r.n.l.).

¹⁷² Das ist ein kleines Mikroskop, das an der Kamera des Handys befestigt wird und mit dem in diesem Fall eine 30-fache Vergrößerung erreicht wird. Im Online-Handel sind sie für ca. 10–20 € erhältlich.

Letztendlich konnten die oben genannten Experimente auch mit Heptan durchgeführt werden. Jedoch besteht der Nachteil, dass die Spiropyranlösung mit Heptan ohne die Ausbildung von Merocyanin-Partikeln nicht so langanhaltend ist wie die Spiropyran-Xylol-Lösung. Diese Erkenntnisse bzw. neuen Informationen wurden allen teilnehmenden Lehrern zwischenzeitlich per Mail mitgeteilt.

6.4 Weiterentwicklung der PBB-Konzentrationszelle

Das Experiment mit der PBB-Konzentrationszelle bzw. die photoelektrochemische Konzentrationszelle mit der PBB-Lösung als Elektrolytlösung (s. Kap. 4.1.1.1.2) hat eine ca. 25 Jahre lange Geschichte. Dazu „wurde erstmalig im Jahr 1994 publiziert [(s. Abb. 112)]. In den 25 Jahren seither hat es mehrere Metamorphosen durchlaufen und hat sich dabei so verändert, dass sich die ursprüngliche Versuchsanordnung (1994) [aus Abb. 112] und die aktuelle (2019) kaum noch ähneln“ [268].

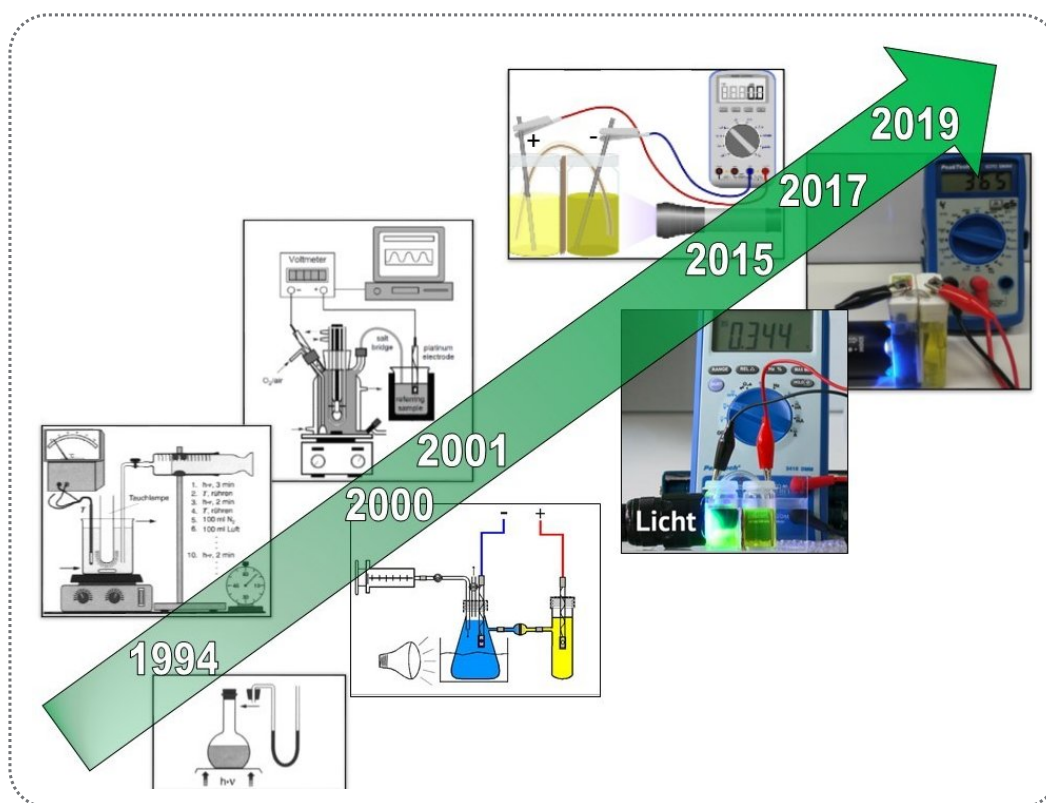


Abb. 112: Entwicklung der PBB-Konzentrationszelle über 25 Jahre (Abb. aus [268]).

HEFFEN [253] entwickelte 2017 eine bereits schultaugliche Version dieser photoelektrochemischen Konzentrationszelle (s. Abb. 112). Sie besteht aus zwei kleinen Schnappdeckelgläsern als Halbzellenmaterial, Edelstahlschrauben als Elektroden und Filterpapier im Gummirohr als Elektrolytbrückenmaterial. Außerdem dient als Trennwand zwischen der beleuchteten und der nicht-beleuchteten Halbzelle ein Stück Pappe. Nach Einsatz dieser Variante in neun

Einzelstudien (s. Kap. 5.4.4), wurde dieser Aufbau für den Schulunterricht revidiert und eine weitere Variante entwickelt. Deren Unterschied zum herkömmlichen Aufbau bestand darin, dass als Halbzellenmaterial TicTac[®]-Dosen für Frischepastillen verwendet wurden und als Trennmateriale zwischen diesen ein Stück Alublech geklebt wurde (s. Abb. 113).



Abb. 113: Die vorletzte (links) und die letzte Variante (rechts) der PBB-Konzentrationszelle.

Nach dem Einsatz der Konzentrationszellen aus Schraubdeckelgläsern neigten die Schüler dazu, zur Reinigung die Zellen in ihre Einzelbestandteile zu zerlegen. Dies bedeutete wiederum, dass für die nächste Einzelstudie an einer weiteren Schule diese Konzentrationszellen wieder zusammengebastelt werden mussten. Durch unsauberes Arbeiten oder beim Reinigen der Zellen wurde oftmals die Papp-Trennwand angefeuchtet und beschädigt, sodass auch diese nach dem Benutzen bei allen Konzentrationszellen kontrolliert werden musste. Für eine Lehrperson bedeuten solche Aspekte, dass die Nachbereitung der Unterrichtseinheit sich verlängert. Zudem erschien bei der Beobachtung der experimentierenden Schüler das Befüllen und Entleeren der Halbzellen mit der PBB-Lösung etwas unpraktisch. Diese Erfahrungen aus den Einzelstudien wurden somit zu Beweggründen für die Entwicklung der neuen Variante aus TicTac[®]-Dosen, welche gerade die oben aufgezählten Nachteile beheben sollte. Grundsätzlich kann jedoch nicht behauptet werden, dass die letzte Variante insgesamt für alle Unterrichtssituationen viel besser geeignet ist¹⁷³; mit ihrem Einsatz sind allerdings einige praktische Vorteile verbunden, nach denen während der Einzelstudien ein Bedarf bestand. Beispielsweise können die TicTac[®]-Dosen



Abb. 114: Einfaches Entleeren der TicTac[®]-Dosen

¹⁷³ Außerdem wurde zum Abdichten von Rinnen zwischen dem Behälter und der weißen Kappe Klebstoff mit der Heißklebepistole verwendet. Dies könnte eine potenzielle Schwierigkeit bei der Herstellung darstellen.

durch die Öffnungen viel schneller befüllt und entleert werden (s. Abb. 114). Zudem ist die neue Variante der Konzentrationszelle eindeutig kompakter und robuster, da die beiden Dosen und die Alufolie dazwischen in diesem Fall mit einem Heißkleber zusammengeklebt wurde. Möglich wäre auch Klebeband oder Sekundenkleber.

Der Aufbau aus TicTac[®]-Dosen ist genauso gut auch für andere Versuche aus der Elektrochemie geeignet. Von Lehramtsstudierenden der Universität Wuppertal wurden sie beispielsweise im Laborpraktikum für schülerorientiertes Experimentieren als ein weiterer Versuchsaufbau für das DANIELL-Element eingesetzt (s. Abb. 115).

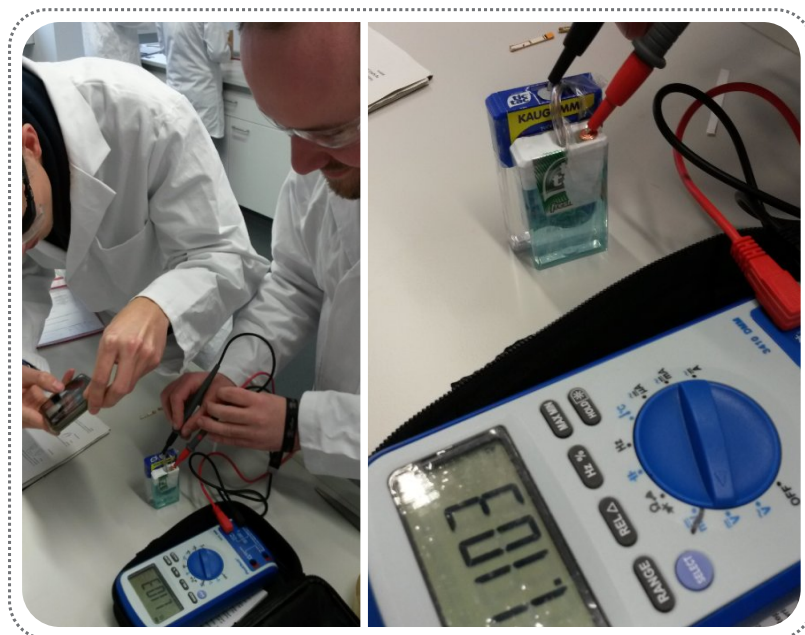


Abb. 115: Lehramtsstudierende setzen im Praktikum den Aufbau einer Zelle aus TicTac[®]-Dosen beim DANIELL-Element ein.

Die erkennbare Nützlichkeit dieser Variante diene als Motivation, um weitere Ideen zur Optimierung der Effizienz der Konzentrationszellen zu testen. Außerdem sollte dadurch versucht werden, eine Möglichkeit zu finden, die Geschwindigkeit der Spannungswertzunahme zu erhöhen, da die Dauer eines Experiments besonders für den Einsatz im Unterricht ein wichtiger Faktor ist. Beispielsweise wurde als Alternative zu den Edelstahlschrauben als Elektroden ein Stück Topfreiniger aus Edelstahl bzw. Edelstahlwolle eingesetzt (s. Abb. 116). Die Überlegung war, dass durch die größere Oberfläche hohe Spannungswerte viel schneller oder grundsätzlich höhere Spannungswerte erreichbar sein könnten. Außerdem wurde auch die Länge der Schrauben variiert. Eine weitere Idee war, unterschiedlich große Halbzellen einzusetzen, sodass neben den üblichen kleinen TicTac[®]-Dosen (ca. $1,3 \times 3,6 \times 6,2 \text{ cm}^3$) auch die großen TicTac[®]-Dosen (ca. $2,0 \times 4,7 \times 8,6 \text{ cm}^3$) getestet wurden. So wurden insgesamt acht verschiedene Kombinationen aus Elektroden und Halbzellenmaterial hinsichtlich ihrer Spannungswerte verglichen (s. Abb. 117; Tab. 53).



Abb. 116: Getestete Variationen des Elektrodenmaterials.

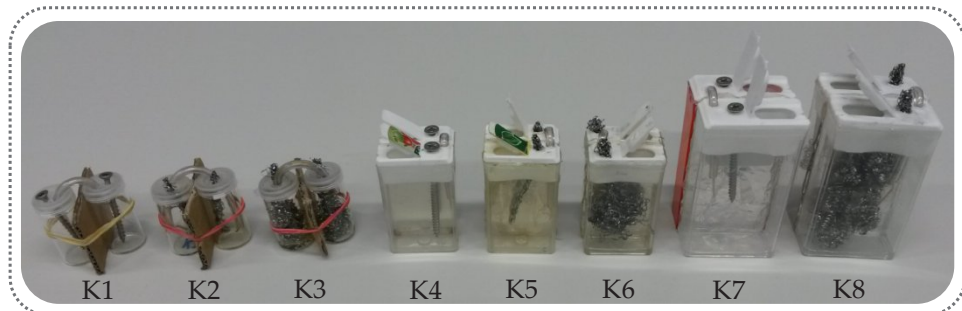


Abb. 117: Im Labor der Universität getestete Varianten K1 – K8 der PBB-Konzentrationszelle.

In der folgenden Tabelle werden die Angaben zu der Zusammensetzung der acht Varianten K1 – K8 gemacht:

V.	Halbzellenmaterial	Elektrodenmaterial	Volumen der PBB-Lösung
K1	Schnappdeckelglas	Edelstahlschrauben; 3,5 x 40,0 mm	5 mL
K2	Schnappdeckelglas	Edelstahlwolle geformt, Ø 0,27 g	5 mL
K3	Schnappdeckelglas	Edelstahlwolle, Ø 0,7 g	5 mL
K4	kleine TicTac [®] -Dosen	Edelstahlschrauben; 4,0 x 60,0 mm	10 mL
K5	kleine TicTac [®] -Dosen	Edelstahlwolle geformt, Ø 0,44 g	10 mL
K6	kleine TicTac [®] -Dosen	Edelstahlwolle, Ø 1,2 g	10 mL
K7	große TicTac [®] -Dosen	Edelstahlschrauben; 4,0 x 60,0 mm	20 mL
K8	große TicTac [®] -Dosen	Edelstahlwolle, Ø 3,0 g	20 mL

Tab. 53: Materielle Zusammensetzung der PBB-Konzentrationszellen-Varianten (V.).

Insgesamt wurden 28 Messreihen durchgeführt. Je Messreihe wurden mehrere Varianten der PBB-Konzentrationszelle gleichzeitig gemessen (s. Abb. 118). Hierfür wurden die Zellen mit der Lösung aufgefüllt und mit blauem Licht bestrahlt. 20 Minuten lang wurden minütlich die Spannungswerte der Zellen (in mV) festgehalten. Nach je fünf Messreihen wurden die Lampen neu aufgeladen und pro 20-minütiger Messreihe wurden die Halbzellenbehälter geleert und mit neuer PBB-Lösung befüllt.

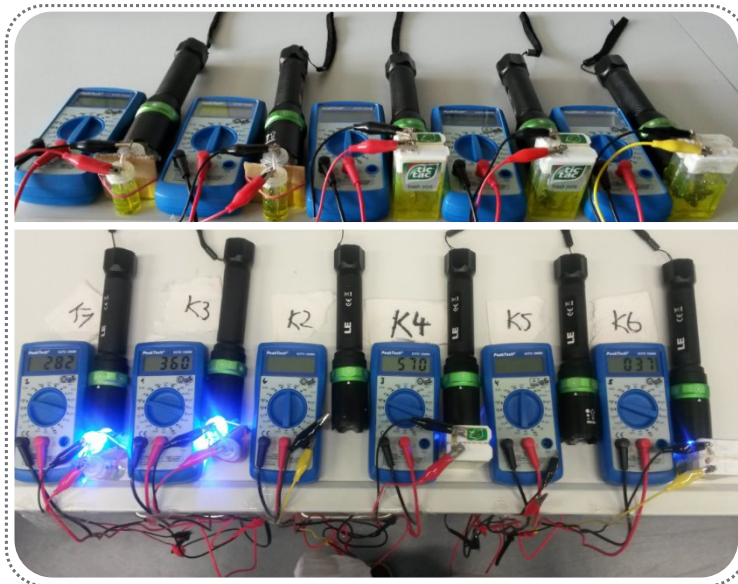


Abb. 118: Vergleich der Spannungswerte unterschiedlicher Varianten der PBB-Konzentrationszellen.

Für jede Variante wurde jeweils eine Grafik mit den Messreihen zu der entsprechenden Variante erstellt (s. Abb. 119 – 126). Bei den Varianten K7 und K8 lagen bereits in den ersten fünf Messreihen die Spannungswerte maximal bei ca. 200 mV, sodass keine weiteren Messungen durchgeführt wurden. Auch zu K2 und K5 fanden im Vergleich nur sieben Messreihen statt. Die höchsten Spannungswerte wurden zwar mit K4 gemessen, jedoch waren die Messreihen der Variante K4 sehr verstreut.

Die Varianten K1, K3, K4 und K6 erreichten nach bereits zehn Minuten über 300 mV Spannung. Davon wird in den Varianten K4 und K6 die PBB-Lösung durch eine Kunststoffwand der TicTac[®]-Dosen bestrahlt. Im Unterschied zur Glaswand der Schnappdeckelgläser in K1 und K3 werden durch die Kunststoffwand bereits Lichtbestände absorbiert, bevor sie die PBB-Lösung erreichen können. Somit gelangt das Taschenlampenlicht mit einer geringeren Intensität an die Lösung als in den Schnappdeckelgläsern. Dass jedoch dennoch innerhalb der ersten Hälfte der Messung relativ hohe Spannungswerte erreicht werden, könnte mit der größeren Oberfläche der dabei als Elektrode eingesetzten Edelmetallwolle zusammenhängen.

Wie zu erkennen ist, wurde die Messung auf dem im Schulunterricht möglichen Niveau und mit den dort verwendbaren Materialien und Gerätschaften durchgeführt (vgl. Kap. 4.1.1.1). Durch diese Herangehensweise ergeben sich weitere im Unterricht einsetzbare Schüleraufgaben. So könnten die Schüler beispielsweise unterschiedliche Varianten vorgelegt bekommen und diese auf Ihre Effizienz hin vergleichen und eventuell versuchen, eine der Varianten weiter zu optimieren. Zusätzlich könnten sie experimentell mit ihren eigenen Messwerten für oder gegen eine Variante argumentieren. Außerdem könnten die Schüler die Unterschiede in den Messwerten mit Blick auf die verwendeten Materialien fachwissenschaftlich begründen. Eine weitere Idee wäre, den Schülern eine der Varianten

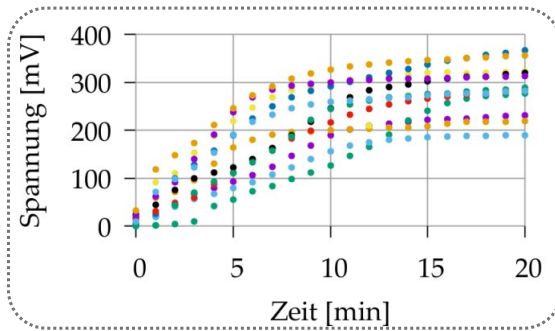


Abb. 119: 12 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K1** mit Schraubdeckelgläsern und Edelstahlschrauben.

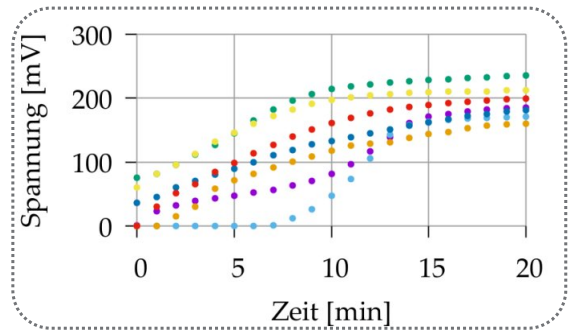


Abb. 120: 7 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K2** mit Schraubdeckelgläsern und geformter Edelstahlwolle.

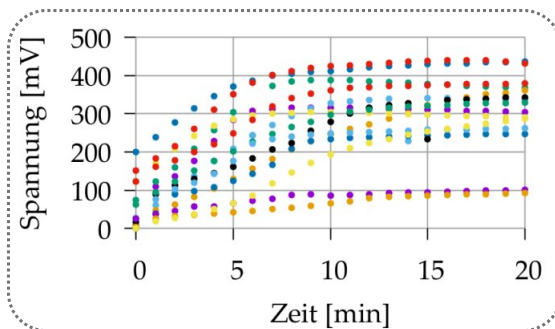


Abb. 121: 15 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K3** mit Schraubdeckelgläsern und Edelstahlwolle.

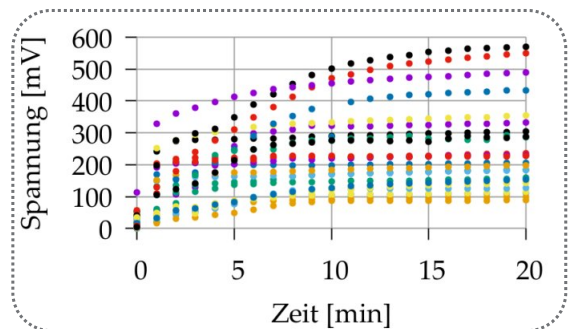


Abb. 122: 24 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K4** mit TicTac[®]-Dosen und Edelstahlschrauben.

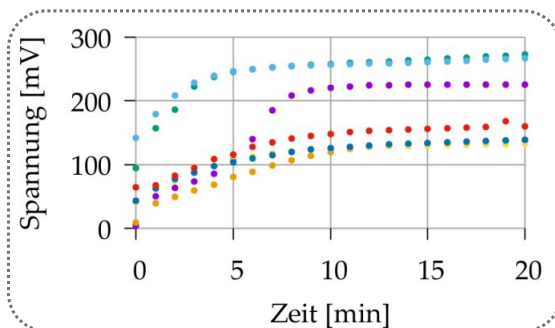


Abb. 123: 7 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K5** mit TicTac[®]-Dosen und geformter Edelstahlwolle.

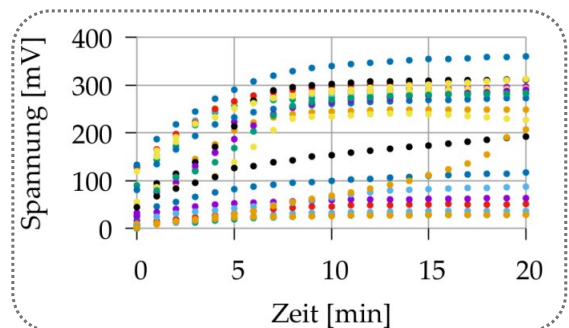


Abb. 124: 22 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K6** mit TicTac[®]-Dosen und Edelstahlwolle.

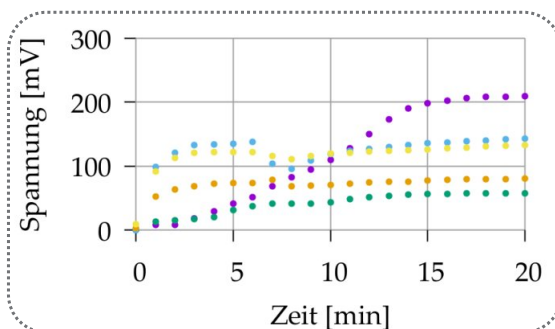


Abb. 125: 5 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K7** mit großen TicTac[®]-Dosen und Edelstahlschrauben.

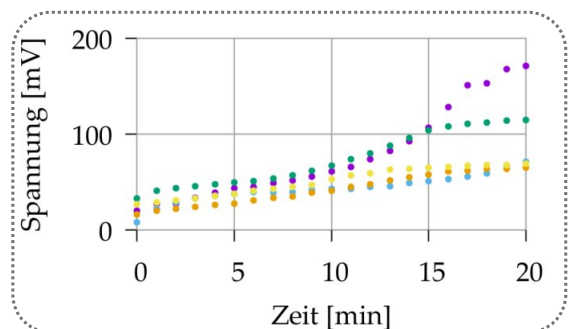


Abb. 126: 5 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle **K8** mit großen TicTac[®]-Dosen und Edelstahlwolle.

vorzusetzen und sie diese – mit den gegebenen Materialien im Hinblick auf ihre Effizienz – fachwissenschaftlich begründet optimieren zu lassen und ihre Verbesserungsvorschläge mit eigenen Messreihen zu bestätigen. Dies sind nur erste Überlegungen zu weiteren Schüleraufgaben, die im Zusammenhang mit diesem photochemischen Experiment möglich und somit stark mit praktischer Arbeit verzahnt wären. Dadurch können die Schüler in weiteren Kompetenzen gefördert werden. Insbesondere spielen in diesem Zusammenhang die *übergeordneten Kompetenzerwartungen* [20] zu Modellen eine Rolle.

7 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

7.1 Relevanz der Studie

Die hier vorliegende Arbeit war maßgeblich erst durch die zahlreichen geleisteten Vorarbeiten zu photochemischen Experimenten der AG Tausch möglich [549]; aber gleichzeitig mittlerweile auch nötig und besonders für den naturwissenschaftlichen Unterricht relevant. Im Folgenden soll die Notwendigkeit und Relevanz der Arbeit festgestellt werden, indem die Frage nach dem Mehrwert beantwortet wird, den die Photochemie im schulischen Kontext hat – unter Einbindung der Ergebnisse der Arbeit (s. Kap. 7.3). Dabei wird der Fokus auf drei besonders deutliche und für den zukünftigen naturwissenschaftlichen Unterricht entscheidende Vorteile der Photochemie gerichtet, die durch die erreichten Ergebnisse (s. Kap. 7.2) und die Beobachtungen während der Einzelstudien bestätigt werden:

1. Die Einbindung photochemischer Inhalte leistet mit Blick auf den Klimawandel und den damit einhergehenden Zuwachs der Bedeutung *erneuerbarer Energien* einen Beitrag zur Umsetzung der Leitlinie *Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)*.

„Im Kern geht es [bei der BNE] darum, Kinder und Jugendliche zu befähigen, ihre eigene Zukunft und auch die ihrer Generation zu gestalten“ [550]. Unter Berücksichtigung der in den 2016 von den *Vereinten Nationen* beschlossenen *Agenda 2030* [12] heißt es weiter:

„Der Verlust an Biodiversität, die Klimaproblematik, die Meeresverschmutzung, die Begrenztheit wichtiger Ressourcen, [die Energieversorgung, die Mobilität,] [...] – all dies sind weltweite Herausforderungen, denen sich die jetzigen und zukünftigen Generationen stellen müssen. [...] BNE hat die Aufgabe, uns angesichts der komplexen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zu zukünftigem Denken und Handeln zu befähigen. Insbesondere unsere Schulen sind im Rahmen ihres Bildungs- und Erziehungsauftrages dazu aufgefordert, Kinder und Jugendliche in Unterricht, in schulischen Projekten und im Schulalltag den Erwerb, den Ausbau und die Anwendung der dafür notwendigen Kenntnisse und Kompetenzen zu ermöglichen.“ [550]

„BNE Lernprozesse zeichnen sich dadurch aus, dass sie mehrere Dimensionen wie die ökologische, ökonomische, soziale, kulturelle sowie die politische Dimension und ihre Interdependenz berücksichtigen“ [550]. Themen wie beispielsweise *Klimaschutz*, *Energieversorgung* und *technologischer Fortschritt*, welche innerhalb der ökologischen und ökonomischen Dimension miteinander wechselwirken, und aus denen die Fragen nach *regenerativen Energiequellen* hervorkommen, können im Unterricht mit der bewussten, sowohl thematischen als auch praktischen Integration der Photochemie bzw. Lichtenergie

konkretisiert und exemplarisch aufbereitet werden. Wie bereits für die Photochemie dargelegt wurde (vgl. Kap. 4.1.3; Kap. 7.3), so heißt es auch für die Leitlinie BNE, dass es „nicht als Additum, sondern als ein integraler Bestandteil“ verstanden werden soll und es nicht beabsichtigt wird, ein neues Schulfach ‚BNE‘ einzuführen; zumal bereits in einzelnen Fächern, wie auch insbesondere im Fach *Chemie*, das Potenzial für mögliche Fragestellungen einer nachhaltigen Entwicklung gesehen wird. Dabei fallen für das Fach Chemie unter anderem Themen wie *Klimawandel, Treibhauseffekt, Ressourcen- und Energieeinsparungspotenziale, mobile Energiequellen* an, welche hervorragend mit innovativen photochemischen Experimenten praktisch thematisiert werden könnten. Die Schüler würden somit frühzeitig auch im Chemieunterricht für die Relevanz solcher Themen sensibilisiert werden.

Bei der strukturellen Verankerung der BNE sollen Schulen von staatlichen Institutionen unterstützt werden [550], sodass hierdurch der vorliegenden Arbeit ihre Relevanz für den naturwissenschaftlichen Unterricht wiederum zugesprochen wird. So liefern auch die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit durch das Aufzeigen der realistischen Integration von Photochemie gleichzeitig Anregungen und Ideen zur Umsetzung der BNE. Die Relevanz von Arbeiten, die die Brücke zwischen Forschung und Schule schlagen, ist nicht geringzuschätzen. Denn beispielsweise auch

„neuere Studien zur Rezeption der Bildungsstandards zeigen auf, dass diese zwar von den Lehrpersonen häufig prinzipiell begrüßt und anerkannt werden, dass dieser vergleichsweise hohen Zustimmung nach Auskunft befragter Lehrpersonen aber eine vergleichsweise geringe Umsetzung in der eigenen Unterrichtspraxis gegenübersteht. Als Gründe werden neben Zeitmangel fehlende Unterstützung und nicht hinreichend auf die Unterrichtspraxis bezogene Konkretisierungen angegeben“ [59].

Deshalb dürfen Lehrer auch mit der Aufgabe der Realisierung der BNE nicht allein gelassen werden.

2. In der Physik wird Licht beispielsweise im Zusammenhang mit der Optik thematisiert, in der Biologie im Zusammenhang mit der Photosynthese. Die Frage, in welchem Zusammenhang die Lichtenergie im CU eine Rolle spielen könnte, wurde durch die vorliegende Arbeit sowohl theoretisch (s. Kap. 3.2) als auch exemplarisch durch die Praxis (s. Kap. 4.1.3; Kap. 5.4.4) dargelegt. So wurde aufgezeigt, innerhalb welcher Inhaltsfelder ausgewählte photochemische Experimente sinnstiftend thematisiert werden können. Somit werden hierdurch den Lehrern die Möglichkeiten dargelegt, Strahlung bzw. Lichtenergie gemäß den Bildungsstandards und Kernlehrplänen anhand der erstellten Arbeitsmaterialien (s. Kap. 4.1.3) zu den ausgewählten photochemischen Experimenten (s. Kap. 4.1.1.2) in den eigenen Chemieunterricht zu integrieren. Durch die Ergebnisse der Arbeit wird verdeutlicht, dass die

Integration photochemischer Inhalte in den üblichen Chemieunterricht ohne großartigen zusätzlichen Aufwand möglich ist. Mithilfe der für die Studie entwickelten Lehrangebote können die Lehrer zudem ihren Unterricht planen. Durch die Arbeit wird explizit aufgezeigt, dass die Lichtenergie weder nur als ein Exkurs im Chemieunterricht thematisiert werden muss, noch unbedeutend und nebenläufig bei den schulüblichen photolytischen Experimenten auftritt, wie der Halogenierung (s. Kap. 3.4.2.3). Außerdem kann kein anderes naturwissenschaftliches Fach der Chemie die Arbeit aus der Hand nehmen, die Lichtenergie aus chemischer Perspektive bzw. seine Wechselwirkung mit den Stoffen auf molekularer Ebene zu betrachten. Energie ist nun einmal ein in den Lehrplänen fest verankertes Basiskonzept, das im Unterricht wiederzufinden sein sollte und am besten auch mit Bezug zur Leitlinie BNE explizit thematisiert werden sollte. Abgesehen davon ist das Energiekonzept an sich ein transdisziplinärer Knotenpunkt zwischen den Naturwissenschaften [156], sodass auch das Fach Chemie selbstverständlich verpflichtet ist, seinen Beitrag dazu zu leisten. Dahingehend müssten doch zwangsläufig photochemische Inhalte Interesse wecken und Anklang finden.

3. „Das Thema *Licht* ist par excellence fachübergreifend. Es durchquert gleichsam einem Licht-Strahl die drei Schul-Naturwissenschaften Physik, Chemie und Biologie und erscheint dabei je nach fachspezifischer Fragestellung in verschiedenen ‚Farben‘“ [195]. Ein weiterer Mehrwert der Phänomene mit Lichtbeteiligung ist demnach, dass sie aufgrund der Bedeutung von Licht in allen drei naturwissenschaftlichen Fächern Biologie, Chemie und Physik – und somit in ihrer Rolle als Element in der thematischen Schnittstelle dieser Fächer – besonders gut zur Integration in den fächerübergreifenden Unterricht bzw. in Differenzierungskurse oder Wahlpflichtfächer dieser Art in den Schulen geeignet wäre (vgl. Kap. 3.2.4; Kap. 3.5) [7]. Hierzu werden von TAUSCH einige Beispieleexperimente aus der Photochemie gegeben, welche auch unter den für die vorliegende Arbeit ausgewählten Experimenten zu finden sind:

„Die Verflechtung zwischen den verschiedenen Naturwissenschaften kann an Beispielen aus der Photochemie, die zugleich auch Pflichtveranstaltungen des Chemieunterrichts darstellen, eindrucksvoll verdeutlicht werden. Querverbindungen zur Physik gibt es bei der Fluoreszenz, der Phosphoreszenz und bei den Photoredoxreaktionen an Halbleitern, Brücken zur Biologie bei den cis-trans-Isomerisierungen, den Photoredoxreaktionen und der Chemilumineszenz.“ [56]

Beispielsweise haben die Photo-Blue-Bottle-Experimente im Zusammenhang mit dem natürlichen Kreislauf Photosynthese / Zellatmung einen Modell-experiment-Charakter (s. Kap. 2.3.3.3.5; s. Kap. 4.1.3.2.1). Deshalb könnten diese laut Lehrpersonen auch im Biologieunterricht genutzt werden (s. Kap. 5.4.2.2). Dann bestünde genauso gut die Möglichkeit, sie in den fächerübergreifenden Unterricht (s. Kap. 4.1.3; Kap. 6) einzubinden, sodass synergetisch sowohl aus der chemischen als auch aus der biologischen Perspektive diese ausreichend

beleuchtet werden könnten. Zudem müsste dann die Lehrperson nicht in Sorge sein, zu sehr vom eigenen Fach abzuschweifen oder imaginäre Grenzen zwischen den Fächern meist unter anderem aus zeitlichen Gründen einhalten zu müssen. In diesem Zusammenhang wären photochemische Phänomene auch besonders für das Konzept *Phenomen Based Learning and Teaching* aus Finnland [551] geeignet. Jedoch muss dabei Folgendes bedacht werden: „Um Synergieeffekte zu nutzen, ist eine Zusammenarbeit der naturwissenschaftlichen Fachkonferenzen Chemie, Biologie und Physik erforderlich“ [279]. Abgesehen davon wird, was das naturwissenschaftliche Energie-Konzept und den Energiebegriff angeht, eine Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen den drei Fächern „dringend“ empfohlen [552]. Nicht zuletzt ist auch in der Leitlinie BNE die verstärkte Berücksichtigung von fächerübergreifendem und fächerverbindendem Lernen vorgesehen. So ist durch den hier aufgeführten Mehrwert der Photochemie gleichzeitig auch die Relevanz der Arbeit noch einmal verdeutlicht worden.

7.2 Zentrale Ergebnisse für die schulische Praxis

„Was in der Praxis anerkannt wird, was funktioniert, was glaubhaft ist und was man dem anderen im wörtlichen und übertragenen Sinne abkauft, unterliegt – tendenziell – einem realen Marktgeschehen. [...] Kann z. B. der Praktiker in Schule, Hochschule oder Weiterbildung mit hoch geförderten Forschungsergebnissen nichts anfangen, wird dem widerspenstigen ‚Kunden‘ die falsche, nämlich eine zu praktizistische Haltung attestiert, nicht aber Qualität und Nutzen der Ergebnisse hinterfragt – ein Mechanismus, der in anderen Kontexten undenkbar wäre: Man stelle sich nur einmal vor, ein Automobilkonzern würde ein Auto bauen, das neueste wissenschaftliche Erkenntnisse berücksichtigt, sich auf der Straße aber als weitgehend fahruntauglich entpuppt. Wer dann auch noch auf die Idee käme, das Problem durch Fortbildung, Training und Werbung zu lösen, um den Kunden trotzdem zum Kauf zu bewegen, würde hochkant aus jedem Konzern fliegen.“ [493]

— G. REINMANN

Im Zusammenhang mit der Aussage von REINMANN (s.o.) steht das hier als Erstes genannte und übergeordnete zentrale Ergebnis der Arbeit, das gleichzeitig mit der Erstellung des Forschungskonzepts (s. Kap. 2.1) bereits beabsichtigt war und realisiert werden konnte.

1. Im Sinne von REINMANN sind die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit nicht nur „wissenschaftliche Erkenntnisse“, welche weiteren Forschungsvorhaben dienen sollten, sondern auch gleichzeitig soweit schulrelevant und fassbar, als dass sie zu einem beachtlichen Anteil von den Praktikern vor Ort an der Schule genutzt werden können. Da während der Exploration in Anlehnung

an die Forschungsansätze *praxisorientierte Grundlagenforschung*, *Aktionsforschung* und *Designed Based Research* (s. Kap. 2.1.4.3) gearbeitet wurde, können die Ergebnisse der Arbeit somit grob in zwei Kategorien unterteilt werden. Sie sind zum Teil **diagnostischen** und zum Teil aber auch **therapeutischen Charakters** (vgl. [553]).

2. Im Sinne des explorativen Forschungsansatzes wurden unterschiedliche Forschungsmethoden eingesetzt. Dadurch konnte eine große Stichprobe mit vieldimensionalen Daten erlangt werden (vgl. [509]), woraus Erkenntnisse geschöpft wurden, welche effektiv und sinnvoll zur Generierung von zentralen Ergebnissen vernetzt wurden. Insgesamt konnte eine weitgehend erfolgreiche explorative Studie durchgeführt werden, an der insgesamt knapp über 1000 Personen teilnahmen (s. Kap. 3.4.2; Kap. 5.2.2) (s. Tab. 54).

Studie	Forschungsmethode	Ort	Probandengruppe
Voruntersuchung	Beobachtung	Schulen	2 Schülergruppen; ca. n = 40
Voruntersuchung	Interview	Schulen	4 Lehrpersonen
Voruntersuchung	Schriftliche Befragung	Universitäten	426 Lehramtsstudierende
Voruntersuchung	Schriftliche Befragung	Lehrerfortbildungszentren	6 Ansprechpartner
Pilotstudie	Schriftliche Befragung	Universität	5 Treatment-Gruppen; n = 50 (15 Schüler; 35 Lehramtsstudierende)
Hauptstudie	Schriftliche Befragung	Schulen	30 Lehrpersonen
Hauptstudie	Schriftliche Befragung	Schulen	478 Schüler

Tab. 54: Die Anzahlen der Probanden, die insgesamt an der explorativen Studie teilgenommen haben.

3. Bei der Fülle an obligatorischen Inhalten der KLPe wird oft vorgehalten, dass für innovative Inhalte kaum Spielraum bleibe (vgl. [26]). Also wurden die Vorgaben für den Chemieunterricht dahingehend untersucht (s. Kap. 3.2) und es konnte festgehalten werden, inwieweit photochemische Inhalte bereits unter den vorhandenen Bedingungen der **KLP-Inhalte** und **Bildungsstandards** und somit auch dem geringsten schulbehördlichen Aufwand zunächst einmal **prinzipiell integrierbar** wären (s. Kap. 3.2.4). Dabei wurde jedoch nicht mit dem Gedanken an die Idee der Einführung eines für die Photochemie speziellen Inhaltsfeldes in den KLP gespielt (vgl. Kap. 3.5). Aus Sicht des Forschers und mit Blick auf die Argumentation in Kapitel 7.1 erschien dies als eine eher unwahrscheinliche und auch bedenkliche Alternative. Denn es konnte jedoch aufgezeigt werden, dass auch ohne eine radikale Änderung (vgl. Kap. 5, REINMANN) der KLPe eine Integration photochemischer Inhalte in gewissem Maße grundsätzlich möglich ist und eindeutig Potenzial dafür besteht (vgl. Kap. 5.4.4.1; Kap. 5.4.4.2), da in den unterschiedlichen Inhaltsfeldern bereits eine beachtliche Anzahl an Anknüpfungsmöglichkeiten besteht (s. Kap. 3.2.3.1). Dennoch wurden auch Stellen im KLP aufgezeigt, durch deren Aktualisierung im Hinblick auf die Berücksichtigung des Lichts als eine Energieform gleichzeitig eine stärkere Resonanz der Leitlinie BNE erreicht wäre (vgl. Kap. 3.2.3.1).

4. Durch das gewählte Forschungskonzept und die dadurch hervorgerufene Rolle der vorliegenden Arbeit als Brücke zwischen den beiden Institutionen Schule und Universität bzw. Forschungsstätte (s. Kap. 7.3, Abb. 127) konnte letztendlich der **Bedarf** dieser Vorgehensweise (**Kooperation von Universität und Schule**) und damit auch nach Personen, die den Beitrag beider Institutionen zur Kooperation koordinieren, festgestellt werden. Sie scheinen für die Bewältigung jeglicher Implementationen in der Schule (s. Kap. 2.1.2) zwingend notwendig zu sein und sind sinnvollerweise unbedingt in den Prozess der Implementation innovativer Inhalte in den Schulunterricht zur Unterstützung in der Schule einzubinden.

5. **Lehrpersonen** wurden **konkrete Umsetzungsmöglichkeiten** der Einbindung photochemischer Inhalte (s. Kap. 4.1.3) und elf ausgewählter photochemischer Experimente (s. Kap. 4.1.1.2) in den eigenen Unterricht aufgezeigt. Hierfür wurden unterrichtskonforme, gebrauchstaugliche **Arbeitsmaterialien** entwickelt (s. Kap. 4), die während der Voruntersuchungen und Hauptuntersuchungen reflektiert und optimiert wurden (s. Kap. 6). Diese konnten erfolgreich im Schulunterricht eingesetzt werden, sodass Lehrer durch diese praktische Erfahrung in dem eigenen Chemieunterricht ihre Hemmschwelle zum Einsatz photochemischer Experimente überwinden konnten, zumal sie feststellten, dass der zusätzliche Aufwand sich im Rahmen des im Schulalltag Möglichen bewegte (vgl. Kap. 5.4.4.2, s. Tab. 47, I18). Während der ganzen Studie wurde eng mit den Lehrern kooperiert und ihre Meinung unmittelbar aus der Schule zu der konkreten Praxis eingeholt. So wurde sie insgesamt auch dem folgenden Anspruch REINMANNs gerecht:

„Menschen in der Praxis stellen – logischerweise – den Anspruch, dass man ihnen hilft, ihre Probleme zu lösen, und das sind Probleme vor Ort, bei denen lokale und personale Handlungsbedingungen berücksichtigt werden müssen; Menschen in der Praxis fordern ein, dass man mit ihnen kommuniziert und zusammenarbeitet; sie wollen Anregungen und Empfehlungen für die Praxis, auch wenn diese noch keinen unumstößlichen Wirkungsnachweis erbracht haben.“ [493]

6. Rund 450 **Schüler** konnten verschiedene photochemische Experimente durchführen und kennenlernen. Ihre wohl größte Erkenntnis, welche auch durch die Beobachtungen über alle Einzelstudien hinweg bestätigt werden kann, war dabei, dass durch Lichtenergie Stoffe sichtbar beeinflusst werden können. In den Gesichtern der Schüler war förmlich die Begeisterung und die durch unerwartete Beobachtungen während des Experimentierens ausgelöste kognitive Krise (s. Kap. 4.1.1.1) ersichtlich. Diese verhalf ihnen zumindest ein Stück weit zu einem **Konzeptwechsel** bzw. zu einer Erweiterung oder Korrektur ihres Energiekonzepts.

7. Indirekt konnte durch die Relevanz photochemischer Inhalte (s. Kap. 7.3), der Mangel an photochemischen Experimenten in den Schulbüchern (s. Kap. 3.3.3; vgl. Kap. 3.5) und die Rückmeldungen der Lehrer nach (!) der Umsetzung der

Einzelstudien (s. Kap. 5.4.4.3) der **Bedarf** seitens der Schule nachgewiesen werden. Jedoch muss angemerkt werden, dass den Bedarf nach photochemischen Inhalten nur die Lehrpersonen verspüren können, die deren Bedeutung für den Chemieunterricht erkannt haben, und dies war erst nach den Interventionen möglich, da kaum ein Lehrer photochemische Experimente mit Betonung der Lichtenergie vorher thematisiert hatte (s. Kap. 5.4.4.3). Jedenfalls steht fest, dass photochemische Inhalte bisher nicht in ausreichendem Maße (vgl. Kap. 1; Kap. 2.2.1) ihren Platz im Chemieunterricht erhalten zu haben (s. Kap. 3).

8. Somit wurde nicht nur die **prinzipielle Integrierbarkeit** photochemischer Inhalte in die KLPe aufgezeigt, sondern durch die Hauptstudie (s. Kap. 5) auch die effektive und sinnvolle **praktische Integration** in den üblichen Chemieunterricht im laufenden Schulbetrieb. Damit wird bestätigt, dass die ausgewählten photochemischen Experimente sehr wohl unter Schulbedingungen – bspw. u.a. mit Klassenstärken von bis zu 32 Schülern, Klassenräumen mit nur einem Abzug – von Schülern erfolgreich durchgeführt werden können. Insgesamt wurde durch die vorliegende explorative Untersuchung somit belegt, dass in Zukunft die gleichwertige Thematisierung der Lichtenergie im Chemieunterricht sowohl theoretisch als auch praktisch möglich und relevant ist. In diesem Zusammenhang wurden sowohl Schüler und Lehrer (s. Kap. 5.2.3.1) als auch Lehramtsstudierende (s. Kap. 3.4.2.3) gebeten, die folgende Aussage mit einer der drei Optionen *relevanter*, *ebenso relevant* oder *weniger relevant* zu vervollständigen: *Zukünftig sollten im Chemieunterricht Experimente mit der Energieform Licht im Vergleich zu den Experimenten mit Wärme oder elektrischer Energie ... sein.*

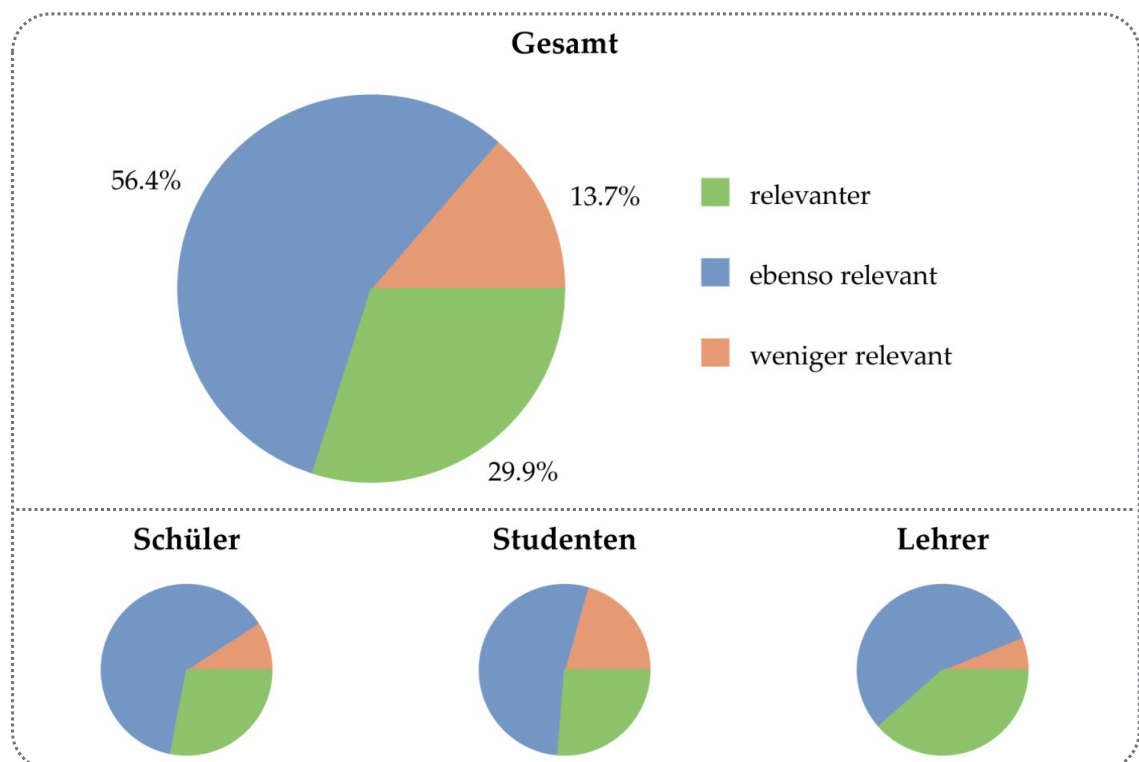


Abb. 127: Vervollständigung der Aussage *Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärme oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / ebenso relevant / weniger relevant sein.* durch die Studienteilnehmer ($n_{\text{gesamt}} = 943$; $n_{\text{Schüler}} = 471$; $n_{\text{Studenten}} = 407$; $n_{\text{Lehrer}} = 65$).

In allen drei Kohorten ist die Tendenz der Meinung zu der gestellten Aussage analog (s. Abb. 127). Dies spiegelt sich in der Zusammenfassung der Bewertungen für eine Gesamtstichprobe $n_{\text{gesamt}} = 943$ wider (s. Abb. 127). Denn insgesamt 86 % der Probanden sind der Meinung, dass die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente in Zukunft genauso relevant, wenn nicht relevanter sein sollten, als Experimente, die Wärme oder Elektrizität benötigen. Allein die Tatsache, dass mehr als die Hälfte sowohl der Schüler als auch der Lehramtsstudierenden und Lehrer davon überzeugt ist, dass Experimente mit Lichtenergie in Zukunft gleichwertig sein werden, ist ein Zeichen für die Wahrnehmung der Bedeutung und auch implizit für den Bedarf solcher Experimente, zu denen eben auch photochemische Experimente gehören. Nur einige wenige ausgewählte Begründungen dieser Bewertung seitens der Probanden lauten¹⁷⁴:

Schüler der Sek. 1
<ul style="list-style-type: none"> • Licht kommt sehr oft im Alltag vor. • Weil es täglich da ist und man wissen sollte, wie es funktioniert. • Es ist eine Form von Energie, die viele unterschätzen bzw. über die viele nicht sehr viel wissen. • Wie schon vorher gesagt: es ändert sich die Energienutzung, also muss sich auch unser Wissen ändern. Wir müssen über Veränderung Bescheid wissen. • Es ist alles gleichberechtigte Energie. • Lichtenergie ist bei uns im Alltag immer wichtiger, deswegen sollten wir mehr damit machen. • Warum sollte sie weniger relevant sein?!
Schüler der Sek. 2
<ul style="list-style-type: none"> • Energie als Form von Licht kommt im Alltag vor. • Licht findet man überall, deswegen sollte das Thema mehr besprochen werden. • Relevanz von Licht ist zunehmend wichtiger. • Alle Energieformen sollten gleich viel im Unterricht behandelt werden. • Da erneuerbare Energie so schnell wie möglich den Menschen nahegebracht werden sollte. • Alle Energieformen sollten verstanden werden; um zu verstehen inwieweit sie eingesetzt werden können in der Gesellschaft.
Studenten
s. Kap. 3.4.2.3., Tab. 26
Studenten
s. Kap. 5.4.4.2, Tab. 50

Tab. 55: Begründungen der Probanden, die die Lichtenergie in Zukunft im Chemieunterricht als *ebenso relevant* oder *relevanter* einstufen.

¹⁷⁴ In allen Antworten wurden die sprachlichen Fehler behoben.

7.3 Kritische Eigenreflexion des Forschungskonzepts

Mit Blick auf die Zielformulierung am Anfang dieser Arbeit erwies sich das schon theoretisch fundierte Forschungskonzept auch praktisch als zutreffend. Die Konstellation unterschiedlicher Schwerpunkte von verschiedenen Forschungsansätzen zur Umsetzung der Arbeit, welche ihren Forschungscharakter (s. Kap. 2.1.4) bilden, war sukzessiv sinnstiftend. Im Folgenden wird diese Feststellung näher erläutert.

HAMEYER geht davon aus, „dass Bildungsinnovationen in der Regel zwischen 15 und 50 Jahren benötigen [...], um tatsächlich in der Praxis pädagogischer Felder akzeptiert und übernommen zu werden“ [489]. Somit wäre es nicht realistisch gewesen, durch die vorliegende Forschungsarbeit von etwa drei Jahren die Innovation bzw. die gewählten photochemischen Inhalte und Experimente bis zu einer endgültigen offiziellen Implementierung in den Chemieunterricht zu erfassen [41]. Konkret war dies unter anderem der Tatsache geschuldet, dass gewisse Themen (s. Kap. 4.1.3) selbstverständlich nur an bestimmten Stellen des Kernlehrplans inhaltlich integrierbar waren, sodass nur im Einjahresrhythmus von Schülern und Lehrern Feedback zur sukzessiven Optimierung der eingesetzten Materialien und generell zu photochemischen Experimenten hätten eingeholt werden können. Jedoch waren einzelne Lehrpersonen so sehr von den innovativen Inhalten der Photochemie überzeugt, dass sie deren Implementierung in ihren eigenen Unterricht bekräftigten. Außerdem kann, wie bereits erwähnt, nicht davon gesprochen werden, dass mit der vorliegenden Arbeit durch die photochemischen Inhalte eine komplette Aktualisierung der Kernlehrpläne impliziert wurde (vgl. Kap. 4.1.3). Es sollte innerhalb der *nutzenorientierten Grundlagenforschung* lediglich auch im Sinne des *Designed Based Research* der Anspruch REINMANNS nach *Realisierungsbezug* (s. Kap. 2.1.4.3) eine Vorbildfunktion einnehmen.

Dank der explorativen Herangehensweise (s. Kap. 2.1.4.1) konnte die Photochemie im schulischen Kontext mit knapp über 1000 Studienteilnehmern (s. Kap. 7.4) aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Diese Erkenntnisse wurden so vernetzt bzw. gebündelt, dass durch deren Implikationen bis dato in der Literatur nicht zu findende fundierte Ergebnisse zur curricularen Einbindung photochemischer Experimente in den Chemieunterricht formuliert werden konnten. In diesem Sinne fordert BLUMER:

„Das Ziel der explorativen Forschung ist es [nämlich], ein entsprechend den Umständen möglichst umfassendes und genaues Bild des zu untersuchenden Bereiches zu entwickeln und auszufüllen. Das Bild sollte den Wissenschaftler in die Lage versetzen, sich in dem Bereich zu Hause zu fühlen, von einer durch Fakten belegten und nicht von einer spekulativen Position aus zu sprechen.“ [71]

Dieser Erwartung konnte hiermit entsprochen werden, wenn auch organisatorische Herausforderungen auf dem Weg dorthin auftraten:

Beispielsweise wurden zur Vorstellung des Forschungsvorhabens und für das Angebot einer möglichen Kooperation Schulen besucht und Gespräche mit Lehrpersonen geführt. Auf Nachfrage gab es seitens dieser jedoch keine Rückmeldung. Da die Einzelstudien im üblichen Schulalltag durchgeführt werden sollten und somit in den originalen Unterrichtsstunden stattfanden und hauptsächlich nicht als Blockveranstaltungen umgesetzt wurden, war die zeitliche Planung der Konstellation der Unterrichtsstunden an unterschiedlichen Schulen eine Herausforderung, zumal spontane Ausfälle wegen Krankheit u.ä. an einer der Schulen gleichzeitig eine Umstrukturierung der Studienpläne an anderen Schulen bedeutete. Im Allgemeinen war die Erfahrung mit den Lehrpersonen, die an der Studie teilgenommen haben, ausgesprochen positiv. Einige von ihnen agierten sogar als Multiplikatoren und empfahlen die Studie weiter, sodass auch dadurch weitere Lehrer für die Studie gewonnen werden konnten.

Da die Einzelstudien teilweise von dem Forscher und teilweise von den Lehrern durchgeführt wurden, ergaben sich dadurch und durch den regen Austausch für die fortlaufenden Arbeiten hilfreiche Synergieeffekte. Da der Forscher selbst vor Ort an Schulen die Interventionen durchführte, konnten auf Fragen seitens der Lehrpersonen im Hinblick auf die Umsetzung im Unterricht praxisnahe Antworten gegeben werden. Auf der anderen Seite konnten die Erfahrungen der Lehrpersonen durch den Forscher hinreichend nachvollzogen werden. Es ergaben sich insgesamt sehr authentische und realistische Rückmeldungen der Lehrpersonen (vgl. Kap. 5.4.1).

So kann durch die gewählte Vorgehensweise bei der Hauptuntersuchung bestätigt werden, dass die vorliegende Arbeit eine Art Schnittstelle zwischen der Forschung an der *Universität* und der *Praxis an den Schulen* darstellt (s. Abb. 128). Außerdem war dadurch ein ständiger Austausch zwischen den beiden Institutionen möglich, sodass die Arbeit gleichzeitig eine Brückenfunktion erfüllte.

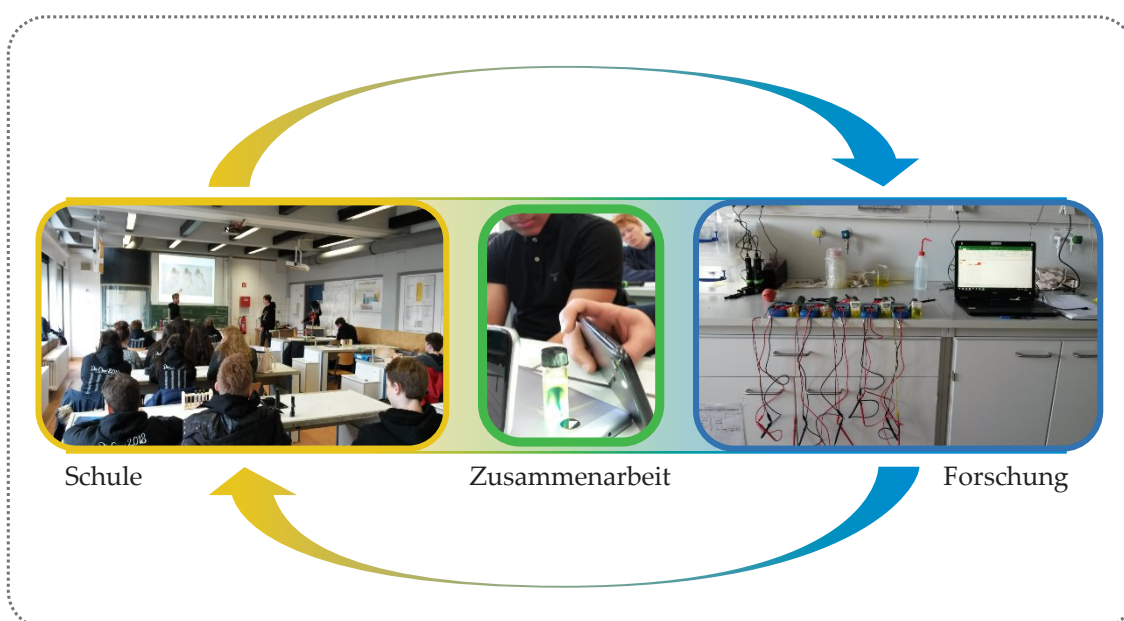


Abb. 128: Die vorliegende Arbeit als Schnittstelle bzw. Brückenfunktion zwischen der Forschung an der Universität und der Praxis in der Schule.

7.4 Kritische Eigenreflexion der Untersuchungsinstrumente

Der Umgang mit der durch die eingesetzten verschiedenen Unterrichtsinstrumente entstandenen enormen Datenmenge verlangte nach einer für den Außenstehenden bzw. Leser verständlichen Aufbereitung und Zusammenfügung dieses Korpus. Dabei war die Aufteilung der Arbeit in die Vor- und Hauptuntersuchung sehr hilfreich. Eventuell hätten in dem einen oder anderen Fall die Ergebnisse der Untersuchungsinstrumente noch detaillierter analysiert werden können, jedoch konnten auch auf diese Weise ausreichend voranbringende Erkenntnisse aus den soweit analysierten Ergebnissen gewonnen werden. Sinnvoll war zudem die Herangehensweise nach dem Mixed-Methods-Prinzip, da je nach Probandenzahl entweder eine qualitative oder quantitative Datenerhebungsmethode gewählt wurde, und somit keine der gewünschten Perspektiven auf die Photochemie (vgl. Kap. 7.2) aufgrund der Einschränkung auf eine einzige Art von Methode außer Betracht gelassen werden musste.

Die Feedbackbögen (s. Kap. 5.2.3.1) wurden nicht geschlechtsspezifisch analysiert und zudem unabhängig von dem entsprechenden Lernstandserhebungsbogen. Interessant wäre eventuell zu erfahren, ob die Rückmeldung zu den photochemischen Inhalten unabhängig vom Geschlecht der Schülerinnen und Schüler ist. Außerdem hätte bei der Betrachtung der Feedbackbögen in Abhängigkeit von den Lernstandserhebungen herausgefunden werden können, ob Schüler mit geringem Lernzuwachs eine genauso positive Einstellung gegenüber photochemischen Inhalten haben wie Schüler mit einem hohen Lernzuwachs. Somit hätte festgestellt werden können, inwieweit der Lernzuwachs bei photochemischen Inhalten mit der positiven Einstellung der Schüler korreliert. Zudem wäre es sinnstiftend zu erfahren, welche Vor- und Nachteile aus Schülerperspektive die von ihnen durchgeführten photochemischen Experimente für sie aufzeigen. Eventuell stellen diese Ideen gleichzeitig auch mögliche Forschungsdesiderata dar (vgl. Kap. 7.5).

Durch die Lernstandserhebungen (s. Kap. 5.2.3.2) sollte lediglich aufgezeigt werden, ob ein Lernzuwachs vorliegt. Obwohl die eingesetzten Testbögen erkenntnisbringend waren, war für dieses durchaus einfache Ziel der Aufwand der Auswertung der Testbögen aus vier Teilaufgaben relativ hoch. Beispielsweise hätte die Erstellung von Concept Maps oder die Konstellation von zwei der vier Testaufgaben vorerst für diese Art von explorativer Arbeit ausreichend sein können, welche bereits im Hinblick auf die gewählten Untersuchungsinstrumente umfangreich war. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Concepts Maps, die von den Oberstufenschülern erstellt werden sollten, nicht in dem dafür vorgesehenen Ausmaß ausgewertet werden konnten, da – obwohl ein Beispiel für die Vorgehensweise zur Erstellung einer Concept Map zuvor erklärt wurde – viele Schüler lediglich eine Mind Map erstellt hatten. Eine Alternative dazu wäre das Nutzen von *computergestützten Concept Maps* [504] gewesen, wobei dazu auch eine ausreichende Einweisung für die Schüler hätte stattfinden müssen.

7.5 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit ist zwar noch längst nicht der letzte "Brückenpfeiler" vor dem Ziel gesetzt, jedoch bietet sie ein nützliches Fundament und Anhaltspunkte für die womöglich letzten "Brückenpfeiler" bzw. Forschungsbemühungen vor einer für sinnvoll erachteten (vgl. bspw. Kap. 7.4) endgültigen Implementation photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht.

1. Hiermit wurde darauf abgezielt, mögliche Ideen zur Umsetzung einer Implementation aufzuzeigen (s. Kap. 4.1.3; Kap. 5.4.3), die allerdings bisher vorerst nur an Gymnasien (s. Kap. 5.4) zum Testen umgesetzt wurden. Vor diesem Hintergrund wäre ein logisches Forschungsdesiderat, auch für andere Schulformen Arbeitsmaterialien zu photochemischen Inhalten zu entwickeln, zu testen und somit die Meinung der Schüler und Lehrer dazu einzuholen. In der Tat gilt nämlich die Leitlinie BNE für alle Schulformen, und ausgewählte photochemische Experimente unter Berücksichtigung des Sicherheitsaspekts können sogar in Grundschulen im Sachunterricht beispielsweise in den obligatorischen Kontexten wie *Ressourcen und Energie* oder *Umwelt und Nachhaltigkeit* eingesetzt werden [554].

2. Mindestens so folgerichtig wäre, nach den erreichten Zielen der Arbeit, eventuell eine Langzeitstudie zur Ermittlung von Langzeiteffekten und der Feststellung des Grades der Implementation durchzuführen. Denn zwar wird bei der Gestaltung der Feedbackbögen für Schüler und Lehrer (s. Kap. 5.2.3.1) der Erfolgsfaktor *Nachhaltigkeit* (s. Kap. 2.1.2) berücksichtigt, und dahingehend werden auch Fragen an die Probanden gestellt, jedoch sind, so GOLDENBAUM, „zur Erfassung dieses Erfolgsfaktors [...] längerfristige, bestenfalls über mehrere Jahre angelegte Untersuchungen notwendig“ [41] (vgl. Kap. 2.1.2). Außerdem muss bedacht werden, dass es sich hierbei lediglich um eine explorative Arbeit handelt, und mit dieser allein verständlicherweise keine *Institutionalisierung* (s. Kap. 2.1.2) erreicht werden kann; ganz wohl aber Empfehlungen zur Nachjustierung in den Lehrplänen (vgl. Kap. 3.2.3.1).

3. Ein Forschungsdesiderat mit Blick auf den curricularen Kontext der Arbeit wäre der Versuch, photochemische Inhalte und Experimente in fächerübergreifenden Unterricht zu integrieren und das Potenzial, das dieses Thema dafür hat, auszuschöpfen (vgl. Kap. 3.2.4; Kap. 3.4.2.3; Kap. 7.4). Beispielsweise bieten einige Schulen im Wahlpflichtbereich für die Mittelstufenschüler Differenzierungskurse wie *Naturwissenschaften* [555] oder *Biochemie* [556] an.

Mit den getätigten Forschungsbemühungen ist ein weiterer "Brückenpfeiler" in Richtung curricularer Einbindung photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht gesetzt worden. Einige Möglichkeiten, diese Forschung weiter fortzusetzen, wurden oben genannt. Was jedoch im Sinne des Bottom-up-Prinzips am Ende dessen aussteht, was TAUSCH in diesem schulischen Kontext als *evolutionären Prozess* bezeichnet [26], ist der bildungspolitische Austausch der Forschenden aus der Universität und der Praktiker aus der

Schule mit den entsprechenden Ansprechpartnern aus den Schulbehörden, die letztendlich in der Rollenverteilung die Legislative übernehmen und ohne deren unabdingbaren Beitrag die endgültige – wohlgerneht curriculare – Implementation photochemischer Inhalte nicht abzuschließen wäre. Damit ist, wie schon an anderer Stelle erwähnt, nicht gemeint, dass unbedingt ein neues Inhaltsfeld wie Photochemie in die Kernlehrpläne integriert werden muss. Dies ist allein deshalb nicht nötig, da photochemische Experimente bzw. Inhalte, wie durch die vorliegende Arbeit aufgezeigt wurde (vgl. bspw. Kap. 4.1.3), thematisch an unterschiedlichen Stellen in den KLP integrierbar sind. Deshalb wäre der realistische und logische Schritt, die Implementation dementsprechend umzusetzen. Hierfür können ausgewählte Passagen und Kompetenzen, die bereits vorhanden sind, ergänzt oder umformuliert bzw. überarbeitet werden (s. Kap. 3.2.3.1), sodass dadurch auch die enorme Bedeutung der Lichtenergie im Hinblick auf die aktuellen Probleme des 21. Jahrhunderts (s. Kap. 7.4) für die Lehrpersonen erkennbar wird und priorisiert werden kann. Der Lichtenergie sollte neben der elektrischen Energie und Wärme eine gleichwertige Stellung zuteilwerden. Außerdem würde somit der KLP durch jene feine Nachjustierungen mit Blick auf die BNE lediglich an Aktualität gewinnen. Zudem liegt es aufgrund der Erkenntnisse sowohl durch die Befragung der Lehramtsstudierenden (s. Kap. 3.4.2.3) als auch der Interviews mit den Lehrern (s. Kap. 3.4.2.2) nahe, dass spätestens im gleichen Atemzug – wenn nicht schon davor – auch die Curricula für das Lehramt an den Universitäten eine Aktualisierung erfahren sollten (vgl. [138]).

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit erschließt sich eigentlich nur noch, dass die Verankerung photochemischer Inhalte in den Chemieunterricht in der flächenhaften Schullandschaft gerade aufgrund seiner Relevanz durch seine Vorzüge (s. bspw. Kap. 7.4) nur noch eine Zeitfrage sein darf.

8 Verzeichnisse

8.1 Abkürzungsverzeichnis

A	Elektronenakzeptor	MO	Molekülorbital
A.	Antwort	n	Stichprobengröße
AB	Arbeitsblatt	NASA	National Aeronautics and Space Administration.
Auswp.	Auswertungspunkt		Zivile US-Umweltbehörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft.
BS	Bildungsstandards		
BUW	Bergische Universität Wuppertal		
CU	Chemieunterricht	NOAA	National Oceanic Atmospheric Administration, Wetter- und Ozeanographiebehörde der Vereinigten Staaten
D	Elektronendonator bzw. Opferdonor		
DBR	Design-Based-Research		
DEGINTU	Gefahrenstoffsystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung	NUE	niedrigste unbesetzte Energiestufe
E	Energie	OECD	Organisation für wissenschaftliche Zusammenarbeit und Organisation
EF	Einführungsphase der Oberstufe in NRW	OLED	organic light emitting diode
EDTA	Ethylendiamintetraessigsäure Dinatriumsalz	r	PEARSON-Korrelationskoeffizient
EV ²⁺	Ethylviologen-Dikation	PET	photoinduzierter Elektronentransfer
F.	Frage	PF ⁺	Proflavin-Kation
FuE	Forschung und Entwicklung	PISA	Programme for International Student Assessment
GDCh	Gesellschaft Deutscher Chemiker	PK	Photokatalysator
HBE	höchste begrenzte Energiestufe	Q	Quencher
Jgst.	Jahrgangsstufe	R	Alkylrest
KLP	Kernlehrplan	RISU	Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht an
KMK	Kultusministerkonferenz		allgemeinbildenden Schulen
LED	Light Emitting Diode		
M	Mittelwert	s. w. u.	siehe weiter unten
MSB NRW	Ministerium für Schule und Bildung des Landes NRW	S ₀	Grundzustand im Singulett-Zustand
MNU	Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts	S ₁	angeregter Singulett-Zustand
		Sek.	Sekundarstufe
		SD	Standardabweichung

SPSS	Statistical Package for the Social Science	UV	ultraviolett
SuS	Schülerinnen und Schüler	VCI	Verband der Chemischen Industrie
T ₁	angeregter Triplett-Zustand	VIS	visible, sichtbar
TIMSS	Trends in International Mathematics and Science Study	WBGU	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
UN	United Nations, Vereinte Nationen		
UNESCO	United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation		

8.1.1 Einheiten

J	Joule	nm	Nanometer
Js	Joulesekunde	s	Sekunde

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau der Forschungsarbeit.....	9
Abb. 2: Phasen der Innovation nach ROGERS.....	12
Abb. 3: Der fünfschrittige individuelle Entscheidungsprozess des Adapters nach ROGERS.....	14
Abb. 4: Vier Einflussfaktoren auf den Implementationsvorgang.....	16
Abb. 5: Darstellung des Verhältnisses der Begriffe L und C mit der Mengenlehre.....	19
Abb. 6: Verlauf der curricularen Innovationsforschung nach TAUSCH.....	20
Abb. 7: Das Quadrantenmodell von STOKES.....	24
Abb. 8: Arbeitsschwerpunkte der Fachgruppe Photochemie der GDCh.....	34
Abb. 9: Die drei Einheiten der Schülerlabothek der Universität Wuppertal.....	40
Abb. 10: Mögliche Energieformen in den Naturwissenschaften.....	44
Abb. 11: Elektromagnetische Strahlung und die möglichen Wechselwirkungen mit der Materie.....	45
Abb. 12: Absorbierte Spektralfarbe und die für das menschliche Auge sichtbare Komplementärfarbe.....	46
Abb. 13: Abnahme der zur Absorption nötigen Energie durch die Zunahme der Größe des delokalisierten π -Elektronensystems.....	48
Abb. 14: Strukturformel eines β -Carotin-Moleküls.....	48
Abb. 15: Strukturformel eines Azobenzol-Moleküls.....	48

Abb. 16: Bildung eines Push-Pull-Systems im Farbstoffmolekül durch die Donator- und Akzeptorgruppen.....	49
Abb. 17: Schematisch vereinfachte Darstellung eines Farbstoffmoleküls.....	49
Abb. 18: Molekülstruktur eines Fluoreszein-dianion-Moleküls.....	49
Abb. 19: Strukturformel von einem Merocyanin-Molekül und seiner mesomeren Grenzstruktur.....	50
Abb. 20: Merocyanin gelöst in Xylol, Aceton und Ethanol.....	51
Abb. 21: Vertikaler $S_0 \rightarrow S_1$ -Übergang durch Lichtabsorption nach dem <i>Franck-Condon-Prinzip</i>	55
Abb. 22: Desaktivierungsmöglichkeiten im elektronisch angeregten Zustand des Moleküls.....	58
Abb. 23: Desaktivierungsmöglichkeiten in den S_0 -Zustand.....	59
Abb. 24: Photolumineszenz in Alltagsgegenständen.....	60
Abb. 25: Strahlende Desaktivierungsmöglichkeiten des angeregten Zustands..	61
Abb. 26: Die Molekülstrukturen vom Phenolphthalein-Dianion und Fluoreszein-Dianion im Vergleich.....	62
Abb. 27: Molekülstruktur von Esculin.....	62
Abb. 28: Emission von Blaulicht durch einen angeschnittenen Kastanienzweig in wässriger Lösung unter UV-Licht.....	62
Abb. 29: Unterschiedliche Emissionsintensität von Merocyanin in drei verschiedenen Lösemitteln.....	64
Abb. 30: Darstellung der Aggregation von Merocyanin-Zwitterionen gelöst in Ethylenglycol.....	65
Abb. 31: Eine vereinfachte Darstellung der strahlungslosen Desaktivierung einer organischen Verbindung mithilfe des Energiestufen-Modells.	66
Abb. 32: Strukturformel eines β -Carotin-Moleküls.....	66
Abb. 33: Photochrome (E)/(Z)-Photoisomerisierung der Azoverbindung (E)-Azobenzol zu (Z)-Azobenzol.....	69
Abb. 34: Venn-Diagramm zu den Charakteristiken von Photoisomerisierungen und photochromen Prozesse.....	69
Abb. 35: Photochrome Photoisomerisierung des (mit einer Nitro-Gruppe substituierten) Derivats von Spiropyran zu Merocyanin.....	70
Abb. 36: Absorptionsspektren von Spiropyran und Merocyanin in Toluol.....	71
Abb. 37: Molekülstruktur von der offenkettigen (Z)-Form des Merocyanins.....	71
Abb. 38: Schematisch vereinfachte Darstellung der möglichen Wege für $A \rightarrow B$.	72
Abb. 39: Potenzialenergiehyperflächen des S_0 und $S_x/T_x > 0$ für A, X und B.....	73
Abb. 40: Einstellung des thermodynamischen Gleichgewichts in der Toluol-Lösung nach Abbruch der Bestrahlung bei drei unterschiedlichen Temperaturen.....	74
Abb. 41: Photokatalytischer Elektronentransfer via reduktivem und oxidativem Quenchingzyklus.....	77
Abb. 42: Die drei Chemikalien Ethylviologen, EDTA und Proflavin werden zur Herstellung der PBB-Lösung in Wasser gelöst.....	78

Abb. 43: Bestrahlung der gelben PBB-Lösung mit Licht vier unterschiedlicher Wellenlängen.....	79
Abb. 44: Verbotener Elektronentransfer bzw. erlaubter Elektronentransfer zwischen dem Proflavin-Monokation und dem Ethylviologen-Dikation..	80
Abb. 45: Die Redoxpotenziale der Substanzen in der PBB-Lösung in Relation zueinander.....	80
Abb. 46: Ablauf der PET im Drei-Komponenten-System EDTA bzw. D-PF ⁺ -EV ²⁺	81
Abb. 47: Gekoppelte Reaktionszyklen des Kreislaufs Photosynthese-Zellatmung und der PBB-Lösung.....	81
Abb. 48: Generierung von Wasserstoff via PET eines Drei-Komponenten-Systems.....	83
Abb. 49: Aufbau der explorativen nutzenorientierten Untersuchung mit den Grundlagen als deren Fundament.....	84
Abb. 50: Das Quadrantenmodell von STOKES - Nutzenorientierte Grundlagenforschung.....	85
Abb. 51: Darstellung der Markierung a. in der 3. Spalte und b. in der 6. Spalte der Tab. 14 mithilfe einer Landkarte.....	102
Abb. 52: Darstellung der Markierung a. in der 3. Spalte und b. in der 6. Spalte der Tab. 14 mithilfe einer Landkarte unabhängig von der Sekundarstufe.	102
Abb. 53: Globalstrahlung auf Deutschland.....	103
Abb. 54: Leistung neu installierter Photovoltaikanlagen in Deutschland in kWp (in den Jahren 2009, 2011, 2016, 2018).....	104
Abb. 55: Anzahl der neu installierten Photovoltaikanlagen in Deutschland nach Bundesland im Jahr 2018.....	104
Abb. 56: Anzahl der neu installierten Photovoltaikanlagen in Deutschland nach Bundesland in Abhängigkeit von der Landfläche im Jahr 2018.....	105
Abb. 57: Anzahl der Themen in den Schulbüchern zu photochemischen und elektrochemischen Inhalten im Vergleich.....	123
Abb. 58: Anzahl der Experimente in den Schulbüchern zu photochemischen und elektrochemischen Inhalten im Vergleich.....	125
Abb. 59: Aufgaben zur Auswertung eines Experiments von der Lehrperson...	134
Abb. 60: Antworten der Studierenden (n = 426) auf die Frage <i>Kennen Sie photochemische Experimente aus Ihrer eigenen Schulzeit? Wenn ja, welche sind das?</i>	147
Abb. 61: Antworten der Studierenden (n = 426) auf die Frage <i>Kennen Sie photochemische Experimente aus Ihrem Studium? Wenn ja, welche sind das?</i>	148
Abb. 62: Antworten der Studierenden (n = 426) auf die Frage <i>Warum würden Sie photochemische Experimente später als Lehrperson in Ihrem Chemieunterricht einsetzen?</i>	150
Abb. 63: Vervollständigung der Aussage <i>Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärme oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / ebenso relevant / weniger relevant?</i> durch die Studierenden.....	152

Abb. 64: Begründungen der Entscheidung der Studierenden (n = 68) im 4. Item.	154
Abb. 65: PHOTO-LIKE.....	164
Abb. 66: Verhältnis von Theorie und Praxis.....	166
Abb. 67: Die Wechselwirkung von drei der Prinzipien des <i>forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens</i> nach SCHMIDKUNZ und LINDEMANN.....	170
Abb. 68: Das <i>Chemical Triangle</i> nach JOHNSTONE.....	178
Abb. 69: Darstellungsformen nach Leisen am Beispiel vom Arbeitsblatt zum Thema <i>Solvatochromie</i>	179
Abb. 70: Inhaltliche Einordnung der Arbeitsblätter in die KLPe.....	185
Abb. 71: Lineare Forschungsstrategie der Hauptstudie.....	199
Abb. 72: Kreise der Schulen, die an der Feldstudie teilnahmen.....	201
Abb. 73: Graphische Unterstützung der Skalierung in den Feedbackbögen....	203
Abb. 74: Ausschnitt aus Aufgabe A der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 7..	208
Abb. 75: Ausschnitt aus Aufgabe B der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 1..	208
Abb. 76: Ausschnitt aus Aufgabe A der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 2..	209
Abb. 77: Aufgabe D der Lernstandserhebung zum Arbeitsblatt 5.....	210
Abb. 78: Ein Box-Plot mit Beschriftung der Messdaten.....	212
Abb. 79: Positionierung der Hauptuntersuchung im gesamten Zeitplan der Arbeit.....	215
Abb. 80: Ausschnitte aus der Fortbildung zur praktischen Einführung.....	221
Abb. 81: Aufbau der Unterrichtsintervention für die Einzelstudien.....	224
Abb. 82: Darstellung der Verteilung von Schülerbewertungen zu den Items I6, I7, I8 aus dem Feedbackbogen.....	230
Abb. 83: Skizze eines Schülers der aggregationsinduzierten Lichtemission der Spiropyran-Lösungen während der Einzelstudie zum Thema <i>Solvatochromie</i>	231
Abb. 84: Schüler in der Erarbeitungsphase; Ergebnisse einiger Aufgaben.....	232
Abb. 85: <i>Forschendes Experimentieren</i> der Schüler in den Unterrichtsstunden mit photochemischen Experimenten und Fachinhalten.....	233
Abb. 86: Schüler halten mit ihren Handys ihre Beobachtungen während des Experimentierens fest.....	234
Abb. 87: Auswertung der Mittelwerte zu Item 6 aus dem Schüler-Feedback abhängig vom Arbeitsblatt.....	235
Abb. 88: Auswertung der Mittelwerte zu Item 8 aus dem Schüler-Feedback abhängig vom Arbeitsblatt.....	236
Abb. 89: Streudiagramm zur graphischen Darstellung der beiden statistischen Merkmale <i>Spaß</i> (I6) und <i>Lernertrag</i> (I8) bei der Intervention aus den Schüler-Feedbackbögen.....	237
Abb. 90: Arbeitsblattunabhängige Auswertung der Aufgabe A der Lernstandserhebung.....	237
Abb. 91: Arbeitsblattunabhängige Auswertung der Aufgabe B der Lernstandserhebung.....	239
Abb. 92: Arbeitsblattunabhängige Auswertung der Aufgabe C der Lernstandserhebung.....	239

Abb. 93: Auswertung der Aufgabe D aus der Lernstandserhebung mithilfe von Wortwolken.....	240
Abb. 94: Darstellung der Verteilung von Schülerbewertungen zum Items I9 aus dem Feedbackbogen.....	241
Abb. 95: Ergebnis zu Item 13 des Schüler-Feedbacks.....	242
Abb. 96: Darstellung der Verteilung von Lehrerbewertungen zu den Items I6, I7, I8 und I12 aus dem Feedbackbogen.....	243
Abb. 97: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I9 mithilfe eines Boxplots.....	246
Abb. 98: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I9 mithilfe eines Säulendiagramms.....	246
Abb. 99: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I5 mithilfe eines Boxplots.....	248
Abb. 100: Darstellung der Verteilung der Lehrerbewertungen zum Item I4 mithilfe eines Boxplots.....	248
Abb. 101: Streudiagramm zur graphischen Darstellung der beiden statistischen Merkmale <i>Lernertrag</i> (I8) und <i>Integrierbarkeit in den KLP</i> (I9) bei der Intervention aus den Lehrer-Feedbackbögen.....	249
Abb. 102: Einzelstudie in einer Klasse mit 32 Schülern.....	252
Abb. 103: Arbeitsblatt 1, aufgeteilt in drei Einzelarbeitsblätter.....	258
Abb. 104: Arbeitsblatt 7, aufgeteilt in drei Einzelarbeitsblätter.....	258
Abb. 105: Herkömmliche schwarze Holzkiste und <i>BlackBoxen</i>	259
Abb. 106: Einsatz der <i>BlackBox</i>	260
Abb. 107: Aussehen der Spiropyran-Heptan-Lösung nach Bestrahlung in zweiminütigen Abständen und Stehenlassen.....	260
Abb. 108: Absetzen eines schwarzen Feststoffs nach Bestrahlung der Spiropyran-Heptan-Lösung.....	261
Abb. 109: Filtration der entstandenen Suspension aus der bestrahlten Spiropyran-Heptan-Lösung.....	261
Abb. 110: 30-fache Vergrößerung des Partikelrückstands auf dem Filterpapier .	261
Abb. 111: Partikelrückstände aufgeteilt auf die drei Schraubdeckelgläser und Partikelrückstände gelöst in Ethanol, Aceton und Xylol.....	261
Abb. 112: Entwicklung der PBB-Konzentrationszelle über 25 Jahre.....	262
Abb. 113: Die vorletzte und die letzte Variante der PBB-Konzentrationszelle..	263
Abb. 114: Einfaches Entleeren der Tictac [®] -Dosen.....	263
Abb. 115: Lehramtsstudierende setzen im Praktikum den Aufbau einer Zelle aus TicTac [®] -Dosen beim Daniell-Element ein.....	264
Abb. 116: Getestete Variationen des Elektrodenmaterials.....	265
Abb. 117: Im Labor der Universität getestete Varianten K1 – K8 der PBB-Konzentrationszelle.....	265
Abb. 118: Vergleich der Spannungswerte unterschiedlicher Varianten der PBB-Konzentrationszellen.....	266
Abb. 119: 12 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K1 mit Schraubdeckelgläsern und Edelstahlschrauben.....	267

Abb. 120: 7 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K2 mit Schraubdeckelgläsern und geformter Edelstahlwolle.....	267
Abb. 121: 15 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K3 mit Schraubdeckelgläsern und Edelstahlwolle.....	267
Abb. 122: 24 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K4 mit TicTac [®] -Dosen und Edelstahlschrauben.....	267
Abb. 123: 7 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K5 mit TicTac [®] -Dosen und geformter Edelstahlwolle.....	267
Abb. 124: 22 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K6 mit TicTac [®] -Dosen und Edelstahlwolle.....	267
Abb. 125: 5 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K7 mit großen TicTac [®] -Dosen und Edelstahlschrauben.....	267
Abb. 126: 5 Messreihen der PBB-Konzentrationszelle K8 mit großen TicTac [®] -Dosen und Edelstahlwolle.....	267
Abb. 127: Vervollständigung der Aussage <i>Zukünftig werden im Chemieunterricht die mit Lichtenergie durchgeführten Experimente im Vergleich zu den mit Wärme oder elektrischer Energie durchgeführten Experimenten etwas relevanter / ebenso relevant / weniger relevant sein?</i> durch die Studienteilnehmer.....	275
Abb. 128: Die vorliegende Arbeit als Schnittstelle bzw. Brückenfunktion zwischen der Forschung an der Universität und der Praxis in der Schule.....	278

8.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Aktivitäten in vier Phasen des Implementationsprozesses der Schulinnovation.....	15
Tab. 2: Bedeutende Ereignisse in der Geschichte der Photochemie.....	31
Tab. 3: Bekannte Organisationen von Photochemikern.....	32
Tab. 4: Fachliteratur zur Photochemie.....	32
Tab. 5: Inhaltsverzeichnis des 11. Bands der von der GDCh veröffentlichten <i>HighChem-hautnah</i> -Reihe mit dem Titel <i>Aktuelles zu Chemie und Licht</i>	35
Tab. 6: Fachzeitschriften zu speziell photochemischen Inhalten.....	36
Tab. 7: Erste Ergebnisse einer Recherche über die Google-Suchmaschine zu universitären Veranstaltungen und Arbeitsgruppen, die explizit im Zusammenhang mit der photochemischen Wissenschaft stehen.....	38
Tab. 8: Schülerlabore mit photochemischen Inhalten.....	39
Tab. 9: Bundessieger der Kategorie Chemie bei Jugend forscht, deren Forschungsthema <i>Photochemie</i> beinhaltet.....	40
Tab. 10: Absorptionsmaxima λ_{\max} von Alkenen mit zunehmender Anzahl n an – C = C – Bindungen.....	48
Tab. 11: Basiskonzepte der Fächer Biologie, Chemie und Physik in den Bildungsstandards.....	91
Tab. 12: Beschreibung der Kompetenzbereiche in den Bildungsstandards des Faches Chemie.....	92

Tab. 13: Kompetenzen aus den BS der naturwissenschaftlichen Fächer, in denen der Ausdruck <i>Energie</i> vorkommt.....	92
Tab. 14: Analyseraster für die Analyse der Lehrpläne der Sekundarstufe 1 und 2 des Gymnasiums in allen Bundesländern.	96
Tab. 15: Inhaltsfeld <i>Energie aus chemischen Reaktionen</i> und der fachliche Kontext dazu aus dem KLP der Sekundarstufe 1.....	108
Tab. 16: Kompetenzen aus den KLPen der Sek. 1 und 2, die im direkten Zusammenhang zum Basiskonzept <i>Energie</i> stehen.....	109
Tab. 17: Kompetenzen aus dem KLP des Faches Biologie für die Sek.1, in die explizit der Begriff <i>Lichtenergie</i> integriert ist.....	111
Tab. 18: Kompetenzen aus dem KLP des Faches Biologie für die Sek. 2 im Zusammenhang mit dem Thema <i>Fotosynthese</i>	112
Tab. 19: Inhaltsfelder, die das Licht thematisieren, aus dem KLP des Faches Physik für die Sek. 1.....	112
Tab. 20: Inhaltsfelder, die elektromagnetische Strahlung thematisieren, aus dem KLP des Faches Physik für die Sek. 2.....	113
Tab. 21: Kompetenzen aus dem KLPen des Faches Physik, die in Bezug zur elektromagnetischen Strahlung stehen.....	114
Tab. 22: Zur Analyse ausgewählte Schulbücher.....	121
Tab. 23: Auswahl an Ausdrücken aus den Inhaltsverzeichnissen der Schulbücher, die im Zusammenhang zur elektromagnetischen Strahlung stehen.....	125
Tab. 24: Verlauf der Leitfadeninterviews.....	131
Tab. 25: Die Anzahlen der Probanden, die an den Voruntersuchungen teilgenommen haben.....	133
Tab. 26: Das Kategoriensystem zur Auswertung der Interviews in Form einer Hierarchie.....	135
Tab. 27: Das Kategoriensystem für die Antworten der ersten beiden offenen Fragen in der Befragung für die Lehramtsstudierenden.....	146
Tab. 28: Das Kategoriensystem für die Antworten der dritten offenen Frage in der Befragung für die Lehramtsstudierenden.....	150
Tab. 29: Begründungen der Studierenden, die die Lichtenergie in Zukunft im Chemieunterricht als <i>ebenso relevant</i> oder <i>relevanter</i> einstufen.....	152
Tab. 30: Das Kategoriensystem für die Begründungen in dem 4. Item in der Befragung für die Lehramtsstudierenden.....	154
Tab. 31: Antworten der Ansprechpartner für das Fach Chemie von Lehrerfortbildungszentren.....	156
Tab. 32: Die für die in der Schule eingesetzten Experimente verwendeten Chemikalien.....	171
Tab. 33: Die für die in der Schule eingesetzten Experimente verwendeten Geräte und Materialien.....	172
Tab. 34: Beschreibung der für die Arbeitsblätter (1 – 7) ausgewählten Experimente.....	173

Tab. 35: Die durch den Einsatz der Arbeitsblätter zum Oberthema <i>Farbigkeit</i> und <i>Licht</i> zu fördernden Kompetenzen.....	187
Tab. 36: Die durch den Einsatz der Arbeitsblätter zum Oberthema <i>Energiekonversion und -speicherung</i> zu fördernden Kompetenzen.....	190
Tab. 37: Vergleich Modellexperiment – Original.....	192
Tab. 38: Die Anzahlen der Probanden, die an der Hauptuntersuchung teilgenommen haben.....	200
Tab. 39: Die Schulen aus NRW, die an der Hauptstudie teilnahmen.....	202
Tab. 40: Items der drei Feedbackbögen für Lehrer und Schüler der Sek. 1 und Sek. 2.....	204
Tab. 41: Items des Abschluss-Feedbackbogens der Lehrer.....	206
Tab. 42: Interpretation des PEARSON-Korrelationskoeffizienten nach COHEN ...	213
Tab. 43: Die für die Einzelstudien durch die Lehrer entschiedenen Themen aus PHOTO-LIKE.....	228
Tab. 44: Mittelwerte $M (ES_F)$ und $M (ES_L)$ der Beurteilung von Aussagen in den Schüler-Feedbackbögen und deren Differenz ΔES	229
Tab. 45: Mittelwerte der Beurteilung von Aussagen in den Schüler-Feedbackbögen je AB und die maximale Differenz Δ_{max}	229
Tab. 46: Beschreibung der Ideen der Schüler während des forschenden Lernens.	232
Tab. 47: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I15, I16, I18 und I23..	244
Tab. 48: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I9 und I17.....	247
Tab. 49: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I14 und I19.....	250
Tab. 50: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I13 und I20.....	251
Tab. 51: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I11 und I22.....	253
Tab. 52: Schriftliches Feedback der Lehrer zu den Items I10 und I21.....	255
Tab. 53: Materielle Zusammensetzung der PBB-Konzentrationszellen-Varianten.....	265
Tab. 54: Die Anzahlen der Probanden, die insgesamt an der explorativen Studie teilgenommen haben.....	273
Tab. 55: Begründungen der Probanden, die die Lichtenergie in Zukunft im Chemieunterricht als <i>ebenso relevant</i> oder <i>relevanter</i> einstufen.....	276

8.4 Literaturverzeichnis

- [1] Bibelstelle. <https://www.die-bibel.de/bibelstelle/Koh%203,1-15/> (letzter Zugriff am 28.1.2019).
- [2] U.S. Energy Information Administration (2017). International Energy Outlook2017.
- [3] United Nations. World Population Prospects - Population Division. <https://population.un.org/wpp/> (letzter Zugriff am 28.1.2019).
- [4] NOAA/NASA (2018). Annual Global Analysis for 2017.

- [5] Brandl, M. (2016). Hiroshima, Tschernobyl, Fukushima, Kyschtym: Die größten Nuklearkatastrophen. <https://web.de/magazine/wissen/tschernobyl-fukushima-kyschtym-groessten-nuklearkastrophen-30089792> (letzter Zugriff am 29.1.2019).
- [6] Quadbeck-Seeger, H.-J. (2006). Chemie im Alltag. Die verborgenen Innovationen. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 55/4, 5–8.
- [7] Tausch, M. W. (2018). Mehr Licht im Chemieunterricht! Experimentelle Zugänge zu Grundkonzepten der Photochemie. Chimia 72/1, 23–26.
- [8] Wöhrle, D., Tausch, M. W., Stohrer, W.-D. (1998). Photochemie. Konzepte, Methoden, Experimente. Wiley-VCH, Weinheim.
- [9] Günther, E. (2019). Definition: Erneuerbare Energien. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/erneuerbare-energien-53729> (letzter Zugriff am 10.3.2019).
- [10] Graßl, H. (2003). Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit. Springer, Berlin.
- [11] Meissner, D. (2010). Energie für das Jahr 2050. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 59/2, 6–10.
- [12] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ (2018). Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. https://www.bmz.de/de/ministerium/ziele/2030_agenda/index.html (letzter Zugriff am 29.1.2019).
- [13] Rat für Nachhaltige Entwicklung. Klimawandel und Energiewende Archives. <https://www.nachhaltigkeitsrat.de/thema/klimawandel-und-energiewende/> (letzter Zugriff am 30.1.2019).
- [14] Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005). Beschlüsse der Bildungsministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf (letzter Zugriff am 30.1.2019).
- [15] Tausch, M. W. (2015). Mehr Licht! Auch im Chemieunterricht! CHEMKON 22/4, 161.
- [16] Pfeifer, P. (1996). Praxisorientierter Unterricht - konkret. Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie 7/31, 4–6.
- [17] Enerdata. Statistik des weltweiten Energieverbrauchs. <https://energiestatistik.enerdata.net/gesamtenergie/welt-verbrauch-statistik.html> (letzter Zugriff am 2.2.2019).

- [18] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2015). Energiestudie 2016. Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Energie/Downloads/Energiestudie_2016.pdf;jsessionid=93FEF9A0C5676E6A46B36D867B1C1040.2_cid331?__blob=publication-file&v=3 (letzter Zugriff am 2.2.2019).
- [19] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2014). Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2014). Anlagen, installierte Leistung, Stromerzeugung, Marktintegration der Erneuerbaren Energien, EEG-Auszahlungen und regionale Verteilung der EEG-induzierten Zahlungsströme. https://www.bdew.de/media/documents/20140224_Foliensatz-Energie-Info-Erneuerbare-Energien-und-das-EEG-2014.pdf.
- [20] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2014). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Chemie.
- [21] LernortLabor - Bundesverband der Schülerlabore e.V. (2018). Schülerlabor-Atlas von LernortLabor. <https://www.schuelerlabor-atlas.de/home> (letzter Zugriff am 4.3.2019).
- [22] Tausch, M. W., Goodwin, A. (2003). ... zur Forschung in der Didaktik. 7 Thesen... Chemie in unserer Zeit 37/3, 210–211.
- [23] Didaktik der Chemie. Publikationen Michael W. Tausch. http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/forschung_tausch/publikationen/index.html (letzter Zugriff am 7.3.2019).
- [24] Meuter, N. (2018). Photolumineszenz und Photochromie in Lösungen und in Feststoffmatrices - Interaktionsbox Photo-Mol. Wuppertal.
- [25] Institut für Chemiedidaktik. OPE-Koffer. Organische Elektronik. <http://chemiedidaktik.uni-koeln.de/oled.html> (letzter Zugriff am 2.2.2019).
- [26] Tausch, M. W. (2009). Innovationen. In Zeiten von Kerncurricula und PISA. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 58/2, 35–37.
- [27] Brockhoff, K. (1999). Forschung und Entwicklung. Planung und Kontrolle. München u.a.
- [28] Gräsel, C. (2011). Die Kooperation von Forschung und Lehrer/-innen bei der Realisierung didaktischer Innovation. In: Unterrichtsentwicklung und didaktische Entwicklungsforschung. Einsiedler, W. H. (Hrsg.). Klinkhardt, Bad Heilbrunn, 88–101.
- [29] Krohn, B. (2019). Zitate von Gottfried Wilhelm Leibniz. <https://www.bk-luebeck.eu/zitate-leibniz.html> (letzter Zugriff am 17.4.2019).
- [30] Banerji, A. (2012). Vom Plexiglas zum OLED-Display. Konjugierte Polymere in der curricularen Innovation. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.

- [31] Krees, S., Tausch, M. W. (2007). Moleküle zu Gast beim Zuckerwirt. Wirt-Gast-Komplexe mit Cyclodextrinen. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 56/8.
- [32] Zitate und Weisheiten von Henry Ford (2018). <https://www.henryford.net/deutsch/zitate.html> (letzter Zugriff am 2.3.2019).
- [33] Rogers, E. M. (2003). Diffusion of innovations. Simon & Schuster, New York u.a.
- [34] Rürup, M. (2007). Innovationswege im deutschen Bildungssystem. Die Verbreitung der Idee „Schulautonomie“ im Ländervergleich. VS | GWV, Wiesbaden.
- [35] Senge, P. M. (1990). The fifth discipline. The art and practice of the learning organization. Duobleday, New York u.a.
- [36] Hauschildt, J., Kock, A., Salomo, S., Schultz, C. (2016). Innovationsmanagement. Franz Vahlen Verlag, München.
- [37] Reinmann, G. (2003). Didaktische Innovation durch Blended Learning. Leitlinien anhand eines Beispiels aus der Hochschule. Bern u.a.
- [38] Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. Zeitschrift für Lernforschung 33/1, 52–69.
- [39] Pleschak, F., Sabisch, H. (1996). Innovationsmanagement. Schäffer-Poeschel, UTB, Stuttgart.
- [40] Talke, K. (2005). Einführung von Innovationen. Marktorientierte strategische und operative Aktivitäten als kritische Erfolgsfaktoren. Wiesbaden.
- [41] Goldenbaum, A. (2012). Innovationsmanagement in Schulen. Eine empirische Untersuchung zur Implementation eines Sozialen Lernprogramms. Springer, Wiesbaden.
- [42] Jäger, M. (2004). Transfer in Schulentwicklungsprojekten. VS, Wiesbaden.
- [43] Holzinger, K., Jörgens, H., Knill, C. (2007). Transfer, Diffusion und Konvergenz von Politiken. VS / GWV, Wiesbaden.
- [44] Blättel-Mink, B., Menez, R. (2015). Kompendium der Innovationsforschung. Springer VS, Wiesbaden.
- [45] Tausch, M. W., Anton, M. A. (2015). Chem2Do. Lehrermittel für den innovativen Unterricht. CHEMKON 22/2, 82–84.
- [46] Hofbauer, G. (2004). Erfolgsfaktoren bei der Einführung von Innovationen. Arbeitsberichhte - Working Papers, Nr. 3, Ingolstadt.
- [47] Luchte, K. (2005). Implementierung pädagogischer Konzepte in sozialen Systemen. Beltz, Weinheim.

- [48] Altrichter, H., Wiesinger, S. (2005). Implementation von Schulinnovationen - aktuelle Hoffnungen und Forschungswissen. *Journal für Schulentwicklung* 9/4, 28–36.
- [49] Fullan, M. (2007). *The new meaning of educational change*. Routledge, London u.a.
- [50] Reinmann, G., Vohle, F. (2004). Implementation als Designprozess. In: *Psychologie des Wissensmanagements*. Reinmann, G., Mandl, H. (Hrsg.). Hogrefe, Göttingen, 234–247.
- [51] Sumfleth, E. (2017). Diagnose - Intervention - Implementation im Spannungsfeld zwischen fachdidaktischer Forschung und unterrichtlicher Praxis. In: *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Zürich 2016. Maurer, C. (Hrsg.).
- [52] Coburn, C. E. (2003). Rethinking Scale. Moving beyond Numbers to Deep and Lasting Change. *Educational Researcher* 6, 3.
- [53] Klees, G., Tillmann, A. (2015). Design-Based Research als Forschungsansatz in der Fachdidaktik Biologie. Entwicklung, Implementierung und Wirkung einer multimedialen Lernumgebung im Biologieunterricht zur Optimierung von Lernprozessen im Schülerlabor. *Journal für Didaktik der Biowissenschaften (F)* 5, 91–110.
- [54] Hall, G. E., Hord, S. M. (2001). *Implementing change. Patterns, principles, and potholes*. Allyn & Bacon, Boston u.a.
- [55] Tausch, M. W. (2004). *Curriculare Innovation* 53/8, 18–21.
- [56] Tausch, M. W. (1991). Photochemie - aktuelle Bedeutung und Möglichkeiten der Integration in den Chemieunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 40/4, 1–10.
- [57] Parchmann, I., Schwarzer, S., Wilke, T., Tausch, M. W., Waitz, T. (2017). Von Innovationen der Chemie zu innovativen Lernanlässen für den Chemieunterricht und darüber hinaus. *CHEMKON* 24/4, 161–164.
- [58] Lindner, M. V., Amman, A. V., Overath, C. V. (2009). Effektivität der Implementation der Bildungsstandards in den Naturwissenschaften in Schleswig-Holstein- Ergebnisse einer Interviewstudie. In: *Chemie- und Physikdidaktik für die Lehramtsausbildung*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik - Jahrestagung in Schwäbisch Gmünd 2008. Höttecke, D. (Hrsg.). LIT-Verl., Münster.
- [59] Gräsel, C., Jäger, M., Wilke, H. (2006). Konzeption einer übergreifenden Transferforschung unter Einbeziehung des internationalen Forschungsstandes. In: *Innovation und Transfer. Expertisen zur Transferforschung*. Nickolaus, R., Gräsel, C. (Hrsg.). Schneider, Hohengehren, 445–566.

- [60] Stark, R. (2004). Eine integrative Forschungsstrategie zur anwendungsbezogenen Generierung relevanten wissenschaftlichen Wissens in der Lehr-Lern-Forschung. *Unterrichtswissenschaft* 32/3, 257–273.
- [61] Pfeifer, P. (1995). Ist ein Umbruch in Sicht? *Chemieunterricht an der Schwelle zum Jahr 2000. Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie* 6/27, 4–8.
- [62] Becker, H.-J., Glöckner, W., Hoffman, F., Jüngel, G. (1980). *Fachdidaktik Chemie*. Aulis, Deubner, Köln.
- [63] Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (2018). *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Aulis, Seelze.
- [64] Parchmann, I., Sommer, K. (2018). Kompetenzorientierte Lehrpläne. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Aulis, Seelze, 117–135.
- [65] Krees, S. (2009). *Wirt-Gast-Komplexe mit Cyclodextrinen. Strukturelle Merkmale und didaktisches Potenzial*. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- [66] Trommsdorff, V., Steinhoff, F. (2013). *Innovationsmarketing*.
- [67] Max-Planck-Gesellschaft (Hrsg.) (2010). *Licht und Materie. Rätselhaftes Wechselspiel*.
- [68] Tausch, M. W. (2006). *Chemie ist... Naturwissenschaft, Innovationsmotor, Unterrichtsfach und mehr. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 55/4.
- [69] Lamnek, S., Krell, C. (2016). *Qualitative Sozialforschung*. Beltz, Weinheim.
- [70] Gillen, J. (2006). *Kompetenzanalysen als berufliche Entwicklungschance. Eine Konzeption zur Förderung beruflicher Handlungskompetenz*. Bertelsmann, Bielefeld.
- [71] Blumer, H. (1973). Der Methodologische Standort des Symbolischen Interaktionismus. In: *Alltagswissen, Interaktion und Gesellschaftliche Wirklichkeit*. 1: Symbolischer Interaktionismus und Ethnomethodologie. 2: Ethnotheorie und Ethnographie des Sprechens. Arbeitsgruppe Bielefelder Soziologen (Hrsg.). VS, Wiesbaden.
- [72] Döring, N., Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Mit 167 Tabellen. Springer, Berlin u.a.
- [73] Hussy, W., Schreier, M., Echterhoff, G. (2013). *Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [74] Victor, N. (1980). Stellung der explorativen Datenanalyse (EDA) im Rahmen der Statistik. Warum eine Sitzung zu diesem Thema? In:

- Explorative Datenanalyse. Frühjahrstagung der GMDS ; München, 21. - 22. März 1980.
- [75] Tausch, M. W. (1998). Sinn(e) der Fachdidaktik. CHEMKON 5/4, 173.
- [76] Stokes, D. E. (1997). Pasteur's quadrant. Basic science and technological innovation. Brookings Institution, Washington.
- [77] Fischer, F., Waibel, M., Wecker, C. (2005). Nutzenorientierte Grundlagenforschung im Bildungsbereich. Argumente einer internationalen Diskussion. Zeitschrift der Erziehungswissenschaft 8/3, 427–442.
- [78] Fischer, F., Wecker, C. (2006). Pasteurs Quadrant und die Diskussion in den USA um die Verbesserung des praktischen Nutzens der Bildungsforschung. In: Entwicklung und Bewertung von anwendungsorientierter Grundlagenforschung in der Psychologie, 1. Aufl. Brüggemann, A., Bromme, R. (Hrsg.). Akademie, Berlin.
- [79] Einsiedler, W. H. (Hrsg.) (2011). Unterrichtsentwicklung und didaktische Entwicklungsforschung. Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- [80] OECD (2018). Frascati-Handbuch 2015. Leitlinien für die Erhebung und Meldung von Daten über Forschung und experimentelle Entwicklung.
- [81] Burkhardt, H., Schoenfeld, A. H. (2003). Improving Educational Research: Toward a More Useful, More Influential, and Better-Funded Enterprise. Educational Researcher 32, 3–14.
- [82] Tausch, M. W. (2000). Didaktische Integration - die Versöhnung von Fachsystematik und Alltagsbezug. Chemie in der Schule 47/3, 179–181.
- [83] Eilks, I., Ralle, B. (2002). Partizipative Fachdidaktische Aktionsforschung. Ein Modell für eine begründete und praxisnahe curriculare Entwicklungsforschung in der Chemiedidaktik. CHEMKON 9/1, 13–18.
- [84] Ralle, B., Fuccia, D.-S. (2014). Aktionsforschung als Teil fachdidaktischer Entwicklungsforschung. In: Methoden in der naturwissenschafts-didaktischen Forschung. Krüger, D., Parchmann, I., Schecker, H. (Hrsg.). Springer, Berlin, Heidelberg, 43–55.
- [85] Eilks, I., Markic, S. (2007). Kooperatives Lernen im Chemieunterricht. Konzipierung und Untersuchung von Unterrichtseinheiten durch Partizipative Aktionsforschung I. In: Kooperatives und selbstständiges Arbeiten von Schülern. Zur Qualitätsentwicklung von Unterricht. Rabenstein, K., Reh, S. (Hrsg.). VS / GWV, Wiesbaden, 210–230.
- [86] Reinmann, G., Sesink, W. (2014). Begründungslinien für eine entwicklungsorientierte Bildungsforschung. In: Methodologie und Methoden medienpädagogischer Forschung. Jahrbuch Medienpädagogik 10. Hartung, A., Schorb, B., Niesyto, H., Moser, H., Grell, P. (Hrsg.). Springer, Wiesbaden, 75–89.

- [87] Reinmann, G. (2017). Design-Based Research. In: Gestaltungsorientierte Forschung - Basis für soziale Innovationen. Erprobte Ansätze im Zusammenwirken von Wissenschaft und Praxis. Schemme, D., Novak, H. (Hrsg.). Bielefeld, 49–62.
- [88] Reinmann, G. (2014). Design-based Research: Auftakt für eine methodologische Diskussion entwicklungsorientierter Bildungsforschung? Schriftfassung desgleichnamigen Online-Vortrags auf e-teaching.org.
- [89] Reinmann, G. (2006). Nur „Forschung danach“? Vom faktischen und potentiellen Beitrag der Forschung zu alltagstauglichen Innovationen beim E-Learning. Arbeitsbericht Nr. 14.
- [90] Reinmann, G. (2016). Design-Based Research am Beispiel hochschuldidaktischer Forschung. Redemanuskript.
- [91] Reinmann, G., Vohle, F. (2012). Entwicklungsorientierte Bildungsforschung. Diskussion wissenschaftlicher Standards anhand eines mediendidaktischen Beispiels. Zeitschrift für E-Learning 7/4, 21–34.
- [92] Reinmann, G. (2014). Welchen Stellenwert hat die Entwicklung im Kontext von Design Research? Wie wird Entwicklung zu einem wissenschaftlichen Akt? In: Design-Based Research. Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik. Beiheft. Euler, D., Sloane, P. F. E. (Hrsg.). Steiner, Stuttgart, 63–78.
- [93] Brahm, T., Jenert, T. (2014). Wissenschafts-Praxis-Kooperation in designbasierter Forschung: Im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Gültigkeit und praktischer Relevanz. In: Design-Based Research. Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik. Beiheft. Euler, D., Sloane, P. F. E. (Hrsg.). Steiner, Stuttgart, 45–61.
- [94] Griesbeck, A. G. Wurzeln und Bedeutung der Photochemie. In: HighChem-hautnah. Aktuelles zu Chemie und Licht. Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.). Zarbock, Frankfurt am Main, 9–10.
- [95] Giacomo Ciamician (1912). The Photochemistry of the Future. *Science* 36/926, 385–394.
- [96] Horspool, W. M. (1976). *Aspects of organic photochemistry*. Academic Press, London u.a.
- [97] Brandl, H., Tausch, M. (1997). Lichtbeteiligung bei chemischen Reaktionen. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 50/4, 206–222.
- [98] Roth, H. D. (1989). Die Anfänge der Organischen Photochemie. *Angewandte Chemie* 101/9, 1220–1234.
- [99] Staude, H. (1966). *Photochemie*. Bibliographisches Institut, Mannheim.
- [100] Urbach, F., Forbes, P. D., Davies, R. E., Berger, D. (1976). Cutaneous Photobiology. Past, Present and Future. *The Journal of Investigative Dermatology* 67/1, 209–224.

- [101] Becker, H. G. (1976). Einführung in die Photochemie. Mit 60 Tabellen. Thieme, Berlin.
- [102] Schmitz, J. (2019). Geschichte der Photovoltaik. <https://www.solaranlagen-portal.de/photovoltaik-technik/photovoltaik-energie.html> (letzter Zugriff am 27.2.2019).
- [103] International Solar Energy Society ISES. <https://www.ises.org/> (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [104] European Photochemistry Society. <https://www.photochemistry.eu/> (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [105] Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. Photochemie. <https://www.gdch.de/netzwerk-strukturen/fachstrukturen/photochemie.html> (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [106] Korean Society of Photoscience (KSP). http://www.photos.or.kr/about/history_e.htm (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [107] European Society for Quantum Solar Energy Conversion QUANTSOL (2015). <http://www.quantisol.org/> (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [108] Jaeck, A. Photochemie. <https://www.internetchemie.info/chemie/photochemie.php#org> (letzter Zugriff am 27.2.2019).
- [109] American Society for Photobiology – Promoting the Photobiological Sciences. <http://photobiology.org/> (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [110] Landesbibliothek Düsseldorf. Suchergebnisse - Photochemie. <https://katalog.ulb.hhu.de/Search/Results?lookfor=Photochemie&type=AllFields&limit=10&sort=relevance> (letzter Zugriff am 1.3.2019).
- [111] Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.). HighChem-hautnah. Aktuelles zu Chemie und Licht. Zarbock, Frankfurt am Main.
- [112] SJR – SCImago Journal & Country Rank. <https://www.scimagojr.com/> (letzter Zugriff am 27.1.2019).
- [113] Andreas Jaeck. Photochemie. <https://www.internetchemie.info/chemie/photochemie.php> (letzter Zugriff am 2.3.2019).
- [114] Journal of Photochemistry. All Journal Issues. <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-photochemistry/issues> (letzter Zugriff am 2.3.2019).
- [115] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2019). Ausgaben des Bundes für Wirtschaft, Forschung und Entwicklung im Rahmen der Projektförderung und Ressortforschung nach Förderbereichen und Förderschwerpunkt. Tabelle 1.1.5 (BuFI 5).
- [116] Nanokarte: Forschung und Innovation (nano-map). <https://www.werkstoff-technologien.de/service/nano-map/#/?nw=u1ffk3fqsf7r&se=u27uzmqc2yde> (letzter Zugriff am 2.3.2019).

- [117] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.) (2009). nano.DE-Report 2009. Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland.
- [118] Die Aktionspläne Nanotechnologie der Bundesregierung. <https://www.bmu.de/themen/gesundheitschemikalien/nanotechnologie/aktionsplaene-nanotechnologie/> (letzter Zugriff am 2.3.2019).
- [119] The Nobel Prize in Chemistry. <https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/> (letzter Zugriff am 2.3.2019).
- [120] BASF (2019). 3D-Druck / Additive Fertigung. https://www.basf.com/global/de/who-we-are/organization/locations/europe/german-companies/BASF_New-Business-GmbH/our-solutions/3d-printing.html (letzter Zugriff am 2.3.2019).
- [121] Freie Universität Berlin. Organisch-chemisches Grundpraktikum. Photochemische Reaktionen. https://www.bcp.fu-berlin.de/chemie/chemie/studium/ocpraktikum/ressourcen/laborpraxis/laborpraxis_webinfos/apparaturen/photochemie/index.html (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [122] Universität Stuttgart. Aktuelles. Presseinfo 19.11.2013. Nr. 3. Chemie. Neues Photochemie-Praktikum: Energieerzeugung richtig verstehen. https://www.student.uni-stuttgart.de/aktuelles/presseinfo/Neues_Photochemie-Praktikumx_Energieerzeugung_richtig_verstehen-00001/ (letzter Zugriff am 29.1.2020).
- [123] Universität Heidelberg. Bachelor (PC III) - Versuche und Betreuer/innen. Photochemische Kinetik. https://www.uni-heidelberg.de/md/chemgeo/pci/motzkus/praktikum/pc3_versuche.html (letzter Zugriff am 29.1.2020).
- [124] Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Organisch-Chemisches Praktikum für Fortgeschrittene mit Themenseminar. <https://www.chemie.uni-kiel.de/pages/studium/bama/MNF-chem0502.pdf> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [125] Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Arbeitsgruppe Fotochemie. https://www.chemie.uni-halle.de/bereiche_der_chemie/organische_chemie/33685_44613/ (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [126] Heinrich Heine Universität Düsseldorf. Arbeitsgruppe Organische Photochemie. <http://www.photochemie.hhu.de/> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [127] Ruhr-Universität Bochum. AG Ultraschnelle Photochemie (2018). <https://www.ruhr-uni-bochum.de/ag-nuernberger/> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [128] Universität Regensburg. Lehrstuhl für physikalische Chemie. Molekularspektroskopie und Photochemie. <http://www-dick.chemie.uni-regensburg.de/> (letzter Zugriff am 16.5.2019).
- [129] Technische Universität München. Fakultät für Chemie. Professoren. Arbeitsgruppen. <https://www.ch.tum.de/index.php?id=647> (letzter Zugriff am 16.5.2019).

- [130] RWTH Aachen. Institut für Organische Chemie. Historie. <http://www.ioc.rwth-aachen.de/institut.html> (letzter Zugriff am 16.5.2019).
- [131] Universität Siegen. Fakultät IV. AK Ihmels. <https://www.chemiebiologie.uni-siegen.de/oc/oc2/> (letzter Zugriff am 16.5.2019).
- [132] Universität Potsdam. Seminar: Aktuelle Fragen der Photochemie. <https://puls.uni-potsdam.de/qisserver/rds?state=verpublish&status=init&vmfile=no&publishid=70059&moduleCall=webInfo&publishConfFile=webInfo&publishSubDir=veranstaltung&language=en> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [133] Universität Ulm. Chemiestudium. Stundenpläne. Master. <https://www.uni-ulm.de/nawi/chemie/studium-und-lehre/stundenplaene-und-pruefungstermine/stundenplaene/> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [134] Technische Universität Kaiserslautern (Hrsg.) (2016). Modulhandbuch für den Master-Studiengang Chemie.
- [135] Universität Kassel. Vorlesung: Organische Chemie II - Organische Photochemie. <https://portal.uni-kassel.de/qisserver/rds?state=verpublish&status=init&vmfile=no&moduleCall=webInfo&publishConfFile=webInfo&publishSubDir=veranstaltung&veranstaltung.veranstid=155153> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [136] KIT - Institut für Organische Chemie - Vorlesungen (2018). <https://www.ioc.kit.edu/198.php> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [137] Gesellschaft Deutscher Chemiker. Chemie studieren. Photochemie. Studium. <https://www.chemie-studieren.de/fachrichtungen/photochemie.html> (letzter Zugriff am 4.3.2019).
- [138] Reiners, C. S., Tausch, M. W. (2009). Curricula für das Lehramt Chemie an der Universität. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 58/2, 29–31.
- [139] Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V. Photochemie in der Lehre. <https://www.gdch.de/netzwerk-strukturen/fachstrukturen/photochemie/photochemie-in-der-lehre.html> (letzter Zugriff am 4.3.2019).
- [140] Bergische Universität Wuppertal. Zentrale Studienberatung. Schülerlabothek Chemie. <https://www.zsb.uni-wuppertal.de/fuerschuelerinnen-und-schueler/schuelerlabore/schuelerlabothek-chemie.html> (letzter Zugriff am 3.3.2019).
- [141] Bergische Universität Wuppertal. Didaktik der Chemie. Chemie-Labothek. <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/labothek/index.html> (letzter Zugriff am 25.6.2018).
- [142] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2008). Kernlehrplan für das Gymnasium. Sekundarstufe I (8) in Nordrhein-Westfalen. Erdkunde.

- [143] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2014). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium/Gesamt-schulein Nordrhein-Westfalen. Geographie.
- [144] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2008). Kernlehrplan für das Gymnasium. Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Physik.
- [145] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2014). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik.
- [146] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2008). Kernlehrplan für das Gymnasium. Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Biologie.
- [147] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2013). Kernlehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Biologie.
- [148] Glöckner, W. (1991). Licht: Katalysator und "Chemikalie". Praxis der Naturwissenschaften - Chemie 40/4.
- [149] Stiftung Jugend forscht e. V. Projektdatenbank. 1. Platz (Bundessieg Fachgebiet). Chemie. <https://www.jugend-forscht.de/projektdatenbank/1/1/seite-1.html> (letzter Zugriff am 4.3.2019).
- [150] Meuter, N., Spinnen, S., Yurdanur, Y., Tausch, M. W. (2017). Photonen und Moleküle. CHEMKON 24/4, 265–271.
- [151] Heisenberg, W. (1959). Physik und Philosophie. Hirzel, Stuttgart.
- [152] Elstner, M. (2017). Physikalische Chemie I. Thermodynamik und Kinetik. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [153] The Feynman Lectures on Physics Vol. I Ch. 4: Conservation of Energy (2019). http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_04.html (letzter Zugriff am 8.3.2019).
- [154] Petermann, J. P. E. (2018). Erfolgreiches Energiemanagement im Betrieb. Lehrbuch für Energiemanager und Energiefachwirte. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- [155] Job, G., Rüffler, R. (2011). Physikalische Chemie. Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten. Vieweg+Teubner / Springer, Wiesbaden.
- [156] Wagner, T., Flint, A. (2018). Energie für Chemie oder Chemie für Energie? CHEMKON 25/3, 98–103.
- [157] Scheler, K. V. (2012). Was ist Energie? Naturwissenschaften im Unterricht Chemie 23/128, 33–37.
- [158] Atkins, P. W., Paula, J. de (2013). Physikalische Chemie, 5. Aufl. Wiley-VCH, Weinheim.

- [159] Büнау, G. v., Wolff, T. (1987). Photochemie. Grundlagen, Methoden, Anwendungen. VCH, Weinheim u.a.
- [160] Herzberg, G. (1973). Einführung in die Molekülspektroskopie. Die Spektren und Strukturen von einfachen freien Radikalen The spectra and structures of simple free radicals [dt.]. Steinkopff, Darmstadt.
- [161] Bingel, W. A. (1967). Theorie der Molekülspektren. Chemie, Weinheim.
- [162] Blumenthal, G., Linke, D., Vieth, S. (2006). Chemie. Grundwissen für Ingenieure. Teubner, Wiesbaden.
- [163] Wöhrle, D. (2015). Photonen, Licht, Stoff- und Energieumwandlungen. Teil 1. Was ist Licht? Chemie in unserer Zeit 49/6, 386–401.
- [164] Tipler, P. A., Mosca, G. (2015). Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [165] Harten, U. (2017). Physik. Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
- [166] Tausch, M. W. (Hrsg.) (1994). Chemie SII. Stoff - Formel - Umwelt, 2. Aufl. C.C. Buchner, Bamberg.
- [167] Fadini, A., Schnepel, F.-M. (1985). Schwingungsspektroskopie. Methoden, Anwendungen. Thieme, Stuttgart u.a.
- [168] Bohrmann, C. (2003). Photoelektrochemie und Elektrolumineszenz. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
- [169] Weeks, I. (1992). Chemiluminescence immunoassay. Elsevier, Amsterdam.
- [170] Latscha, H. P., Kazmaier, U., Klein, H. (2016). Organische Chemie. Chemie-Basiswissen II. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [171] Mortimer, C. E., Müller, U., Beck, J. (2015). Chemie. Das Basiswissen der Chemie Chemistry. Thieme, Stuttgart, New York.
- [172] Meier, H. (1963). Die Photochemie der organischen Farbstoffe. Springer, Berlin u.a.
- [173] Röder, B. (1999). Einführung in die molekulare Photobiophysik. Springer, Wiesbaden.
- [174] Schirmeister, T., Schmuck, C., Wich, P. R., Beyer, H., Walter, W., Francke, W., Bamberger, D. (2016). Beyer/Walter Organische Chemie. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- [175] Wachtendonk, M. v., Tausch, M. W. (2007). Chemie 2000+, Gesamtband. Sekundarstufe II. Bamberg.
- [176] Weber, R. (1992). Wissenschaftler und Weise. Gespräche über die Einheit des Seins. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg.
- [177] Buncl, E., Rajagopal, S. (1990). Solvatochromism and Solvent Polarity Scales. Accounts of Chemical Research 23/7, 226-231.

- [178] Reichardt, C., Welton, T. (2011). Solvents and solvent effects in organic chemistry. Wiley-VCH, Weinheim.
- [179] Spinnen, S. (2018). Molekulare Logik mit farbabsorbierenden und -emittierenden Molekülen auf Basis von Spiropyran. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- [180] Tausch, M. W., Spinnen, S., Essers, M., Krees, S. (2014). Die Umgebung macht's. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 63/2, 35–37.
- [181] Reichardt, C. (1994). Solvatochromic Dyes as Solvent Polarity Indicators. Chemical Review 94/8, 2319–2358.
- [182] Nič, M., Jiráč, J., Košata, B., Jenkins, A., McNaught, A. (Hrsg.) (2009). IUPAC Compendium of Chemical Terminology. IUPAC, Research Triangle Park, NC.
- [183] Wardle, B. (2009). Principles and Applications of Photochemistry. John Wiley & Sons, New York.
- [184] Turro, N. J. (1978). Modern molecular photochemistry. Benjamin/Cummings, California u.a.
- [185] Google Scholar: excited state chemistry. https://scholar.google.de/scholar?q=excited+state+chemistry&hl=de&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart (letzter Zugriff am 16.3.2019).
- [186] Cvetanović, R. J. (1974). Excited State Chemistry in the Stratosphere. Can. J. Chem. 52/8, 1452–1464.
- [187] Griesbeck, A. G. (2019). The Future of Photochemistry. Just Bright. ChemPhotoChem 3/1, 8–9.
- [188] König, B., Butenschön, H. (2007). Organische Chemie. Kurz und bündig für die Bachelor-Prüfung. Wiley-VCH, Weinheim.
- [189] DePuy, C. H., Chapman, O. L. (1977). Molekül-Reaktionen und Photochemie. Chemie, Weinheim u.a.
- [190] Skrabal, P. (2009). Spektroskopie. Eine methodenübergreifende Darstellung vom UV- bis zum NMR-Bereich. VDF-Hochschulverlag, Zürich.
- [191] Engelke, F. (1992). Aufbau der Moleküle. Eine Einführung. Teubner, Stuttgart.
- [192] Tausch, M. W., Paterkiewicz, D. (1988). Phosphoreszenz und Fluoreszenz. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie 37/1, 14–21.
- [193] Stohrer, W.-D. V. (1991). Die konzeptionellen Grundlagen der Photochemie. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie 40/4, 15–22.
- [194] Rau, H. (2015). Grundlagen der Elektronenspektroskopie. Theorie der Anregung und Deaktivierung von Molekülen. Wiley-VCH, Weinheim.

- [195] Tausch, M. W., Grolmuss, A., Piwek, B. (1998). Echtfarben-Emissionsspektren EFES. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 47/2, 10–14.
- [196] Wöhrle, D. (1991). Energieumwandlung mit sichtbarem Licht - Solarenergie. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 40/4, 10–15.
- [197] Cowan, D. O., Drisko, R. L. (1976). *Elements of organic photochemistry*. Plenum, New York u.a.
- [198] Klessinger, M., Michl, J. (1990). *Lichtabsorption und Photochemie organischer Moleküle*. VCH, Weinheim u.a.
- [199] Coyle, J. D. (1986). *Introduction to organic photochemistry*. Wiley, Chichester u.a.
- [200] Fallert, J. A. (2009). *stimulierte Emission in Zinkoxid-Nanostrukturen*. Dissertation. Technische Hochschule Karlsruhe.
- [201] Unger, K. (1967). Spontane und induzierte Emission in Laserdioden. *Zeitschrift für Physik* 13/3, 322–331.
- [202] Klein, P., Schwarz, P., Tausch, M. W., Meuter, N. Photolumineszenz - Farbe durch Lichtemission. <http://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/index.php?id=4594> (letzter Zugriff am 22.3.2019).
- [203] Kasha, M. (1950). Characterization of electronic transitions in complex molecules. *Discussions of the Faraday Society* 9, 14–19.
- [204] Balushev, S., Miteva, T., Yakutkin, V., Nelles, G., Yasuda, A., Wegner, G. (2006). Upconversion fluorescence. Noncoherent excitation by sunlight. *Physical review letters* 97/14, 143903.
- [205] Pichaandi, J., Boyer, J.-C., Delaney, K. R., van Veggel, F. C. J. M. (2011). Two-Photon Upconversion Laser (Scanning and Wide-Field) Microscopy Using Ln^{3+} -Doped NaYF_4 Upconverting Nanocrystals. A Critical Evaluation of their Performance and Potential in Bioimaging. *J. Phys. Chem. C* 115/39, 19054–19064.
- [206] Reinhardt, B. A., Brott, L. L., Clarson, S. J., Dillard, A. G., Bhatt, J. C., Kannan, R., Yuan, L., He, G. S., Prasad, P. N. (1998). Highly Active Two-Photon Dyes. Design, Synthesis, and Characterization toward Application. *Chem. Mater.* 10/7, 1863–1874.
- [207] Singh-Rachford, T. N., Castellano, F. N. (2010). Photon upconversion based on sensitized triplet–triplet annihilation. *Coordination Chemistry Reviews* 254/21-22, 2560–2573.
- [208] Klán, P., Wirz, J. (2009). *Photochemistry of organic compounds. From concepts to practice*. Wiley, Chichester, U.K.
- [209] Steidl, H., Nowak, D. (1975). Die Verwendung eines Molekülstrahls zur Messung der S_2 -Fluoreszenz des Pyrens. *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 94/1-3, 95–99.

- [210] White, W., Seybold, P. G. (1977). External Heavy-Atom Effect on the Room-Temperature Luminescence of Adsorbed Dyes. *The Journal of Physical Chemistry* 81/21.
- [211] Mei, J., Hong, Y., Lam, J. W. Y., Qin, A., Tang, Y., Tang, B. Z. (2014). Aggregation-induced emission. The whole is more brilliant than the parts. *Advanced materials* 26/31, 5429–5479.
- [212] Browne, W. R., Feringa, B. L. (2011). *Molecular Switches*. Wiley-VCH, Weinheim, Cambridge.
- [213] Feringa, B. L., Jager, W. F., de Lange, Ben (1993). Organic Materials for Reversible Optical Data Storage. Jager, W F, Lange, B D & Feringa, B 1993, 'Organic Materials for Reversible Optical Data Storage' *Tetrahedron*, vol 49, no. 37 49/37, 8267–8310.
- [214] Hong, Y., Lam, J. W. Y., Tang, B. Z. (2011). Aggregation-induced emission. *Chemical Society reviews* 40/11, 5361–5388.
- [215] Meuter, N., Spinnen, S., Yurdanur, Y., Tausch, M. W. (2017). Photonen und Moleküle. Zusatzinformation zur aggregationsinduzierten Lumineszenz. *CHEMKON* 24/4, 265–271.
- [216] Turro, N. J. (1974). *Molecular photochemistry*. Benjamin, Massachusetts u.a.
- [217] Wagner, A. (2013). *Energieeffiziente Fenster und Verglasungen*, 4. Aufl. Fraunhofer-IRB, Stuttgart.
- [218] van Eldik, R. (Hrsg.) (2011). *Inorganic photochemistry*. Elsevier, Amsterdam u.a.
- [219] G.V.Smith, G.V., Zahraa, O., Molnar, A., Khan, M. M., Rihter, B., Brower, W. E. (1983). Characterization of Pd-on-Alumina and Pd-Si Glasses by Isomerization and Hydrogenation of (+)-Apopinene. *Journal of Catalysis* 83/1, 238–241.
- [220] Balzani, V., Carassiti, V. (1970). *Photochemistry of coordination compounds*. Academic Press, London u.a.
- [221] Tausch, M. (1981). *Theoretische und experimentelle Untersuchungen von Valenzisomerisierungen*. Minerva, München.
- [222] Maier, G. (1972). *Valenzisomerisierungen*. Chemie, Weinheim.
- [223] Kubik, S. (2005). RÖMPP. Valenzisomerisierung. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-22-00057> (letzter Zugriff am 31.3.2019).
- [224] Rawat, M.S.M., Mal, S., Singh, P. (2015). Photochromism in Anils - A Review. *Open Chemistry Journal* 2/1, 7–19.
- [225] Rück-Braun, K., Thilemann, M. Photochrome organische Verbindungen in den Lebens- und Materialwissenschaften. Licht und Farbe. In:

- HighChem-hautnah. Aktuelles zu Chemie und Licht. Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hrsg.). Zarbock, Frankfurt am Main, 78–79.
- [226] Dürr, H. (2004). Organische Photochromie. *Angew. Chem.* 116/25, 3404–3418.
- [227] Dürr, H. (1991). Photochromie - Stand und Entwicklungstendenzen. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 40/4, 22–28.
- [228] Klaue, K., Garmshausen, Y., Hecht, S. (2018). Photochromie jenseits des Sichtbaren. Direkte, im biologischen Fenster adressierbare Einphotonen-NIR-Photoschalter. *Angewandte Chemie* 130/5, 1429–1432.
- [229] Herges, R. (2011). Spinschaltung und intelligente Kontrastmittel in der MRT. *Nachrichten aus der Chemie* 59/9, 817–821.
- [230] Birge, R. R. (1990). Nature of the primary photochemical events in rhodopsin and bacteriorhodopsin. *Biochimica et biophysica acta* 1016/3, 293–327.
- [231] Fischer, E. (1975). Photochromie und photochrome Verbindungen. *Chemie in unserer Zeit* 9/3, 85–95.
- [232] Sakuragi, M., Aoki, K., Tamaki, T., Ichimura, K. (1990). The Role of Triplet State of Nitrospiropyran in Their Photochromic Reaction. *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 63/1, 74–79.
- [233] May, F. (2012). Synthese und Untersuchung photoschaltbarer Spiropyrane und Diarylethene für die photoschaltbare Fluoreszenz und als DNA Interkalatoren. Universität Bielefeld.
- [234] Schönberg, A., Schenck, G. O. (1968). Preparative organic photochemistry. *Präparative organische Photochemie*. Springer, New York.
- [235] Seefeldt, B., Kasper, R., Beining, M., Mattay, J., Arden-Jacob, J., Kemnitzer, N., Drexhage, K. H., Heilemann, M., Sauer, M. (2010). Spiropyranes as molecular optical switches. *Photochemical & photobiological sciences* 9/2, 213–220.
- [236] Brunnert, R., Bohrmann-Linde, C., Meuter, N., Pereira Vaz, N., Spinnen, S., Yurdanur, Y., Tausch, M. W. (2018). The Fascinating World of Photochemistry. *Educación Química* 29/3, 108.
- [237] Meuter, N., Tausch, M. W. Herstellung einer "intelligenten Folie". <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/index.php?id=4540> (letzter Zugriff am 3.4.2019).
- [238] Tausch, M. W. (1996). Ungleiche Gleichgewichte. *CHEMKON* 3/3, 123–127.
- [239] Hirshberg, Y., Fischer, E. (1954). Photochromism and reversible multiple internal transitions in some spiropyranes at low temperatures. Part I. *Journal of the Chemical Society*, 297–304.
- [240] Tausch, M. W., Bohrmann-Linde, C., Meuter, N., Spinnen, S., Yurdanur, Y., Vaz, N. P., Drude, N. (2018). Photochemie und andere interessante Sachen.

- Ungleiche Gleichgewichte. <http://www.beil-stein.tv/categories/tutorials/> (letzter Zugriff am 3.4.2019).
- [241] Spinnen, S., Tausch, M. W. (2015). Ein multiples Chamäleon. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 64/6, 46–49.
- [242] Tausch, M. W., Bohrmann-Linde, C., Meuter, N., Spinnen, S., Yurdanur, Y., Vaz, N. P., Drude, N. (2018). Photochemie und andere interessante Sachen. Ein chemisches Chamäleon. <http://www.beil-stein.tv/video/ein-chemisches-chamaleon/> (letzter Zugriff am 3.4.2019).
- [243] Zitat zum Thema: Kompliment. <https://www.aphorismen.de/zitat/23711> (letzter Zugriff am 7.4.2019).
- [244] Wold, A. (1993). Photocatalytic properties of titanium dioxide (TiO₂). *Chem.Mater.* 5/3, 280–283.
- [245] Tausch, M. W. (2011). Photokatalyse - Reif für den Schulunterricht. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 60/1, 29–32.
- [246] Wöhrle, D. (2016). Photonen, Licht, Stoff- und Energieumwandlungen. Teil 2. Was Licht bewirken kann. *Chemie in unserer Zeit* 50/4, 244–259.
- [247] Dau, H., Kurz, P., Weitze, M.-D. (2019). Künstliche Photosynthese. Besser als die Natur? Springer, Berlin, Heidelberg.
- [248] Zepp, M. (2017). Organische Photovoltaik für Unterricht und Lehre. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- [249] Rendón Enríquez, I. N. (2016). Elektrochemische Abscheidung und Charakterisierung von Polymeren auf FTO beschichteten Gläsern. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal.
- [250] Angerhofer, A. (1994). Die Primärprozesse der Photosynthese. Aktuelle Fragestellungen und Experimente. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 43/3, 2–13.
- [251] Tausch, M. W., Heffen, U. M. (2015). Photokatalyse - homogen und heterogen. Das Photo-Blue-Bottle-Experiment runderneuert. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 64/8, 51–55.
- [252] Heffen, U. M., Krämer, R., Meuter, N., Tausch, M. W. (2015). Passendes Licht - harmlose Stoffe. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 64/2, 45–49.
- [253] Heffen, U. M. (2017). Photoredoxsysteme zur Konversion und chemischen Speicherung von Solarenergie. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal.
- [254] Tsubomura, H., Shimoura, Y., Fujiwara, S. (1979). Chemical Processes and Electric Power in Photogalvanic Cells Containing Reversible or Irreversible Reducing Agents. *The Journal of Physical Chemistry* 83/16, 2103–2106.

- [255] Fromherz, P., Rieger, B. (1986). Photoinduced electron transfer in DNA matrix from intercalated ethidium to condensed methylviologen. *Journal of the American Chemical Society* 108/17, 5361–5362.
- [256] Lee, S. H., Choi, D. S., Kuk, S. K., Park, C. B. (2018). Photobiokatalyse. Aktivierung von Redoxenzymen durch direkten oder indirekten Transfer photoinduzierter Elektronen. *Angewandte Chemie* 130/27, 8086–8116.
- [257] Zubarev, V., Goez, M. (1997). Absorption/Elektronentransfer/Absorption – ein effizienter Weg zu hydratisierten Elektronen bei der Laserblitzlicht-photolyse. *Angewandte Chemie* 109/23, 2779–2781.
- [258] Zeitler, K., Neumann, M. (2013). Synergistic Visible Light Photoredox Catalysis. In: *Chemical photocatalysis*. König, B. (Hrsg.). de Gruyter, Berlin.
- [259] Zeitler, K. (2009). Photoredox Catalysis with Visible Light. *Angewandte Chemie* 48/52, 9785–9789.
- [260] Teders, M. (2017). Mechanismusbasiertes Entdecken in der Photoredoxkatalyse. Lumineszenzlöschung als Hilfsmittel zur Entwicklung von Photoredoxreaktionen. Springer, Wiesbaden.
- [261] Kalyanasundaram, K., Dung, D. (1980). Role of proflavin as a photosensitizer for the light-induced hydrogen evolution from water. *The Journal of Physical Chemistry* 84/20, 2551–2556.
- [262] Korn, S., Tausch, M. W. (2001). A Laboratory Simulation for Coupled Cycles of Photosynthesis and Respiration. *Journal of Chemical Education* 78/9, 1238.
- [263] Tausch, M. W. (1994). Photo-Blue-Bottle. Modellversuche zur Photosynthese und zur Atmung. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie* 43/3, 13–18.
- [264] Bellin, J., Alexander, R., Mohaney, R. D. (1973). Dye-sensitized Photoreduction of Methyl viologen. *Photochemistry and Photobiology* 17/1, 17–24.
- [265] Lechner, R., Kümmel, S., König, B. (2010). Visible light flavin photo-oxidation of methylbenzenes, styrenes and phenylacetic acids. *Photochemical and Photobiological Sciences* 9/10, 1367–1377.
- [266] Tausch, M. W. (2019). *Unterwegs zur künstlichen Photosynthese*. Wien, Österreich.
- [267] Brunnert, R., Yurdanur, Y., W. Tausch, M. (2019). Towards Artificial Photosynthesis in Science Education. *World Journal of Chemical Education* 7/2, 33–39.
- [268] Yurdanur, Y., Tausch, M. W. (2019). Metamorphosen eines Experiments - Vom hightech UV-Tauchlampenreaktor zur Low-Cost TicTac[®]-Zelle. *CHEMKON* 125-129.
- [269] Balzani, V., Bolletta, F., Ciano, M., Maestri, M. (1983). Electron Transfer Reactions Involving Light. *Journal of Chemical Education* 60/6, 447.

- [270] Friedrich, J. (2013). Potenzialdifferenzen von Konzentrationszellen. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 62/7, 9–15.
- [271] Korn, S., Tausch, M. W. (49). Kreislauf des Kohlenstoffs in der Biosphäre. Ein Modellexperiment. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 7, 29–31.
- [272] Krüger, D., Parchmann, I., Schecker, H. (Hrsg.) (2014). *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [273] Pfeifer, P. (2018). Der heutige Chemieunterricht und seine Entwicklungsgeschichte. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Aulis, Seelze, 645–658.
- [274] Wambach, H. (2009). Lehrplanempfehlungen. Vom Stoffplan bis zur Erschließung von methodischen Maßnahmen. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 58/2, 6–10.
- [275] Labudde, P., Schecker, H., Haagen-Schützenhöfer, C. (2017). PISA und seine Folgen in Deutschland, Österreich und der Schweiz. In: *Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Zürich 2016*. Maurer, C. (Hrsg.), 55–58.
- [276] Klieme, E., Artelt, C., Hartig, J., Jude, N., Köller, O., Prenzel, M., Schneider, W., Stanat, P. (2010). *PISA 2009. Bilanz nach einem Jahrzehnt*. Waxmann, Münster u.a.
- [277] Artelt, C., Riecke-Baulecke, T. (2004). *Bildungsstandards. Fakten, Hintergründe, Praxistipps*. Oldenbourg, München.
- [278] Kultusministerkonferenz. *Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz*. <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsstandards.html> (letzter Zugriff am 29.4.2019).
- [279] Kremer, M., Rebentisch, D., Wambach-Laicher, J. (2009). *KMK-Bildungsstandards und ihre Umsetzung in einzelnen Bundesländern*. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 58/2, 18–25.
- [280] Vollstädt, W. (2003). Steuerung von Schulentwicklung und Unterrichtsqualität durch staatliche Lehrpläne. In: *Zeitschrift für Pädagogik. Recht – Erziehung – Staat. Zur Genese einer Problemkonstellation und zur Programmatik ihrer zukünftigen Entwicklung*. Beltz, 194–214.
- [281] Niehaus, I., Stoletzki, A., Fuchs, E., Ahlrichs, J. (2011). *Wissenschaftliche Recherche und Analyse zur Gestaltung, Verwendung und Wirkung von Lehrmitteln (Metaanalyse und Empfehlungen): im Auftrag der Bildungsdirektion des Kantons Zürich*. Braunschweig.
- [282] Laubig, M., Peters, H., Weinbrenner, P. (1986). *Methodenprobleme der Schulbuchanalyse. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt 3017 an der Fakultät für Soziologie der Universität Bielefeld in Zusammenarbeit mit der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften*. Bielefeld.

- [283] Labudde, P. (2013). Fächerübergreifender naturwissenschaftlicher Unterricht – Mythen, Definitionen, Fakten. In: Naturwissenschaftliche Bildung zwischen Science- und Fachunterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in München 2013. Bernholt, S. (Hrsg.). Kiel, 13–24.
- [284] Huber, L. (1994). Wissenschaftspropädeutik und Fächerübergreifender Unterricht – Eine unerledigte Hausaufgabe der allgemeinen Didaktik. In: Allgemeine Didaktik, Fachdidaktik und Fachunterricht. Meyer, M. A., Plöger, W. (Hrsg.). Beltz, Weinheim, Basel.
- [285] Labudde, P. (Hrsg.) (2008). Naturwissenschaften vernetzen, Horizonte erweitern. Fächerübergreifender Unterricht konkret. Kallmeyer, Klett, Seelze-Velber.
- [286] Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005). Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Biologie für den Mittleren Schulabschluss. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf (letzter Zugriff am 30.4.2019).
- [287] Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2005). Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards für das Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Physik-Mittleren-SA.pdf (letzter Zugriff am 30.4.2019).
- [288] Fischer, H. E., Glemnitz, I., Kauertz, A., Sumfleth, E. (2007). Auf Wissen aufbauen - kumulatives Lernen in Chemie und Physik. In: Physikdidaktik. Theorie und Praxis. Kircher, E., Girwidz, R., Häußler, P. (Hrsg.). Springer, Berlin, Heidelberg, 657–658.
- [289] Weinert, F. E. (2014). Leistungsmessungen in Schulen. Beltz, Weinheim.
- [290] Scholl, D. (2009). Sind die traditionellen Lehrpläne überflüssig? Zur lehrplan-theoretischen Problematik von Bildungsstandards und Kernlehrplänen. Springer VS, Wiesbaden.
- [291] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.) (2007). Zur Entwicklung nationaler Bildungsstandards. Expertise. Berlin.
- [292] Rauin, U., Tillmann, K.-J., Vollstädt, W. (1999). Lehrpläne im Schulalltag. Eine empirische Studie zur Akzeptanz und Wirkung von Lehrplänen in der Sekundarstufe I. Leske u. Budrich, Opladen.
- [293] Karpen, K., Ingwersen, C. (2005). Bildungsstandards in der Bundesrepublik Deutschland. In: Bildungsstandards, Kerncurricula und die Aufgabe der Schule. Rekus, J. (Hrsg.). Aschendorff, Münster.

- [294] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus. Vorbemerkungen zum Lehrplan. http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26344.html (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [295] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden Württemberg (2016). Bildungsplan des Gymnasiums. Chemie. http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_CH.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [296] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Naturwissenschaftlich-technologisches Gymnasium. Fachprofil Chemie. Jahrgangstufen 11/12. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26195.html (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [297] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Naturwissenschaftlich-technologisches Gymnasium. Fachprofil Chemie. Jahrgangstufe 8. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26448.html (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [298] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Naturwissenschaftlich-technologisches Gymnasium. Fachprofil Chemie. Jahrgangstufe 10. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26225.html (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [299] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Naturwissenschaftlich-technologisches Gymnasium. Fachprofil Chemie. Jahrgangstufe 9. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26447.html (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [300] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Fachprofil Natur und Technik. Jahrgangstufe 7. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26436.html (letzter Zugriff am 8.5.2019).
- [301] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Fachprofil Natur und Technik. Jahrgangstufe 6. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26433.html (letzter Zugriff am 8.5.2019).
- [302] Bayerisches Staatsministerium für Unterricht und Kultus (2004). Fachprofil Natur und Technik. Jahrgangstufe 5. http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26334.html (letzter Zugriff am 8.5.2019).
- [303] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin, Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg, Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern (2015). Teil C. Chemie. Jahrgangsstufen 7-10. https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Chemie_2015_11_10_WEB.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).

- [304] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin, Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg (2006). Rahmenlehrplan für die gymnasiale Oberstufe. Gymnasien, Gesamtschulen mit gymnasialer Oberstufe, Berufliche Gymnasien, Kollegs, Abendgymnasien. Chemie. <https://www.berlin.de/sen/bildung/unterricht/faecher-rahmenlehrplaene/rahmenlehrplaene/> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [305] Senator für Bildung und Wissenschaft Bremen (2006). Naturwissenschaften, Biologie - Chemie - Physik. Bildungsplan für das Gymnasium. Jahrgangsstufe 5 -10. https://www.lis.bremen.de/schulqualitaet/curriculumentwicklung/bildungsplaene/sekundarbereich_i-15226 (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [306] Senator für Bildung und Wissenschaft Bremen (2008). Die Gymnasiale Oberstufe im Land Bremen. Chemie. Bildungsplan für die Qualifikationsphase. https://www.lis.bremen.de/schulqualitaet/curriculumentwicklung/bildungsplaene/sekundarbereich_ii___allgemeinbildend-16698 (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [307] Freie und Hansestadt Hamburg. Behörde für Schule und Berufsbildung (2009). Bildungsplan. Gymnasiale Oberstufe. Berlin. <https://www.hamburg.de/contentblob/1475194/bf7b01c3faaa85e8b71a69480373a142/data/chemie-gyo.pdf> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [308] Freie und Hansestadt Hamburg. Behörde für Schule und Berufsbildung (2011). Bildungsplan. Gymnasium. Sekundarstufe 1. Chemie. <https://www.hamburg.de/contentblob/2373260/aadb3c81e4e00760e7d6daec0288b555/data/chemie-gym-seki.pdf> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [309] Freie und Hansestadt Hamburg. Behörde für Schule und Berufsbildung (2004). Bildungsplan. Naturwissenschaft/Technik. <https://www.hamburg.de/contentblob/2975652/ae0de4c3e76d25c7e67dc06520fc38e9/data/naturw-technik-gym-seki.pdf> (letzter Zugriff am 8.5.2019).
- [310] Hessisches Kultusministerium. Lehrplan Chemie. Gymnasialer Bildungsgang. Jahrgangsstufen 8 bis 13. <https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/g9-chemie.pdf> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [311] Hessisches Kultusministerium (2010). Lehrplan Chemie. Gymnasialer Bildungsgang. Jahrgangsstufen 7G bis 9G. <https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/g8-chemie.pdf> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [312] Hessisches Kultusministerium (2010). Lehrplan Chemie. Gymnasialer Bildungsgang. Gymnasiale Oberstufe. <https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/go-chemie.pdf> (letzter Zugriff am 7.5.2019).

- [313] Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern (2011). Rahmenplan. Chemie. Für die Jahrgangsstufen 7 bis 10 des gymnasialen Bildungsgangs. https://www.bildung-mv.de/downloads/unterricht/rahmenplaene_allgemeinbildende_schulen/Chemie/rahmenplan_chemie_gymnasium.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [314] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin, Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg, Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern (2006). Kerncurriculum für die Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe. Chemie. https://www.bildung-mv.de/downloads/unterricht/rahmenplaene_allgemeinbildende_schulen/Chemie/kc-chemie-11-12-gym.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [315] Niedersächsisches Kultusministerium (2015). Kerncurriculum für das Gymnasium. Schuljahrgänge 5-10. http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/nw_gym_si_kc_druck.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [316] Niedersächsisches Kultusministerium (2017). Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe, das Berufliche Gymnasium, das Abendgymnasium das Kolleg. Chemie. http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/ch_go_kc_druck_2017.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [317] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2008). Kernlehrplan für das Gymnasium. Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Chemie.
- [318] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz (1998). Lehrplan Chemie Sekundarstufe II. <https://lehrplaene.bildung-rp.de/index.php?id=4308&category=14> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [319] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz (2010). Rahmenlehrplan. Naturwissenschaften für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Klassenstufen 5 und 6. <https://lehrplaene.bildung-rp.de/index.php?id=4308&category=14> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [320] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz (2014). Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz. Biologie, Chemie, Physik. Klassenstufen 7 bis 9/10. <https://lehrplaene.bildung-rp.de/index.php?id=4308&category=14> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [321] Ministerium für Bildung und Kultur Saarland (2008). Gymnasiale Oberstufe Saar. Lehrplan Chemie. G-Kurs. https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/CH-GOS-Feb2008.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).

- [322] Ministerium für Bildung und Kultur Saarland (2006). Achtjähriges Gymnasium. Lehrplan Chemie - mathematisch-naturwissenschaftlicher Zweig - für die Einführungsphase der gymnasialen Oberstufe. https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/CHmnEinfphFeb2006.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [323] Ministerium für Bildung und Kultur Saarland (2012). Lehrplan. Chemie. Klassenstufen 8 und 9. Naturwissenschaftlicher Zweig. https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/LP_Ch_Gym_8_und_9_nw-Zweig_Juni_2012.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [324] Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (2011). Lehrplan. Gymnasium. Chemie. <https://www.schule.sachsen.de/lpdb/> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [325] Ministerium für Bildung Sachsen-Anhalt (2016). Fachlehrplan. Gymnasium. Chemie. https://www.bildung-lsa.de/pool/RRL_Lehrplaene/Erprobung/Gymnasium/FLP_Gym_Chemie_LTn.pdf (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [326] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein (2019). Fachanforderungen. Chemie. Allgemeinbildende Schulen. Sekundarstufe 1. Sekundarstufe 2. <https://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=225> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [327] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (2012). Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Chemie. <https://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2285> (letzter Zugriff am 7.5.2019).
- [328] Karten von Ländern und Kontinenten zum Ausdrucken. <https://www.umrechnung.org/landkarten/laender-und-karten.htm> (letzter Zugriff am 16.12.2019).
- [329] Solargis. Solar resource maps of Germany. Global Horizontal Irradiation. <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/germany> (letzter Zugriff am 4.5.2019).
- [330] Bundesländerübersicht zu Erneuerbaren Energien. Neu installierte Leistung Photovoltaik pro km². https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaender/BW|BY|B|BB|HB|HH|HE|MV|NI|NRW|RLP|SL|SN|ST|SH|TH|D/kategorie/top%2010/#goto_726 (letzter Zugriff am 4.5.2019).
- [331] statista. Anzahl der neu installierten Photovoltaikanlagen in Deutschland nach Bundesland im Jahr 2018. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/180784/umfrage/anzahl-der-neu-installierten-photovoltaikanlagen-nach-bundeslaendern/> (letzter Zugriff am 16.12.2019).

- [332] statista. Fläche der deutschen Bundesländer (in Quadratkilometern) zum 31. Dezember 2018. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154868/umfrage/flaeche-der-deutschen-bundeslaender/> (letzter Zugriff am 16.12.2019).
- [333] Weber, T., Schön, L.-H. (2002). Kumulatives Lernen mit dem Lichtwegkonzept. In: Zur Didaktik der Physik und Chemie. Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik, Chemie in Dortmund, September 2001. Brechel, R. (Hrsg.). Leuchtturm-Verlag, Alsbach.
- [334] Bruner, J. S. (1999). The process of education. Harvard University.
- [335] Harden, M. R. (1999). What is a spiral curriculum? *Medical Teacher* 21/2, 141–143.
- [336] Organisation for Economic Co-operation and Development (1999). Measuring Student Knowledge and Skills. A New Framework for Assessment. OECD Publishing, Paris.
- [337] Ditton, H. (2000). Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung in Schule und Unterricht. Ein Überblick zum Stand der empirischen Forschung. In: Qualität und Qualitätssicherung im Bildungsbereich. Schule, Sozialpädagogik, Hochschule. Helmke, A. (Hrsg.). Beltz, Weinheim u.a., 73–92.
- [338] Tausch, M. W. (2020). Chemie mit Licht. Innovative Didaktik für Studium und Unterricht. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [339] Reiners, C. S., Saborowski, J. (2017). Wissensvermittlung durch Transformation. In: Chemie vermitteln. Fachdidaktische Grundlagen und Implikationen. Reiners, C. S. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [340] Parchmann, I., Freienberg, J. (2009). Bildungsstandards, Kerncurricula und Lehrerbildung. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 58/2, 11–17.
- [341] Tipler, P. A. (1998). Physik, 2. Aufl. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg.
- [342] Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning* 7/2, 75–83.
- [343] Bradley, J. D. (2014). The chemist's triangle and a general systemic approach to teaching, learning and research in chemistry education. *African Journal of Chemical Education* 4/2, 64–79.
- [344] Sekretariat der Kultusministerkonferenz (Hrsg.) (2016). Gesamtstrategie der Kultusministerkonferenz zum Bildungsmonitoring. Köln.
- [345] Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.) (2011). Bildung auf einen Blick 2011. OECD Indikatoren. Deutsche Übersetzung in Absprache mit der OECD. Paris.

- [346] Wiater, W. (2005). Lehrplan und Schulbuch. Reflexion über zwei Instrumente des Staates zur Steuerung des Bildungswesens. In: Das Schulbuch zwischen Lehrplan und Unterrichtspraxis. Matthes, E. (Hrsg.). Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- [347] Bundesministerium für Justiz und für Verbraucherschutz (2019). Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Artikel 7. <https://www.gesetze-im-internet.de/gg/BJNR000010949.html> (letzter Zugriff am 20.5.2019).
- [348] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalens. Zulassung von Lernmitteln in NRW. <https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Schulsystem/Unterricht/Lernmittel/index.html> (letzter Zugriff am 20.5.2019).
- [349] Reiners, C. S., Saborowski, J. (2017). Auf dem Weg zum Chemieunterricht. In: Chemie vermitteln. Fachdidaktische Grundlagen und Implikationen. Reiners, C.S. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [350] Kultusministerkonferenz. TIMSS. <https://www.kmk.org/themen/qualitaetssicherung-in-schulen/bildungsmonitoring/internationale-schulleistungsvergleiche/timss.html> (letzter Zugriff am 20.5.2019).
- [351] Bundesministerium für Bildung und Forschung. PISA - internationale Schulleistungsstudie. <https://www.bmbf.de/de/pisa-programme-for-international-student-assessment-81.html> (letzter Zugriff am 20.5.2019).
- [352] Tausch, M. W. (2002). PISA - Für Insider nicht viel Neues. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 51/6, II.
- [353] PISA Deutschland. <https://www.pisa.tum.de/home/> (letzter Zugriff am 20.5.2019).
- [354] Fuchs, E., Niehaus, I., Stoletzki, A. (2014). Das Schulbuch in der Forschung. V&R Unipress, Göttingen.
- [355] Pfeifer, P., Lutz, B., Bader, H. J. (2002). Konkrete Fachdidaktik Chemie. Oldenbourg, München.
- [356] Wild, V. (2013). Aufgaben im Geschichtsschulbuch: Eine Schulbuchanalyse aus didaktischer Perspektive. Masterarbeit. Universität Passau.
- [357] Stein, G. (2003). Vom medienkritischen Umgang mit Schulbüchern: mehr als nur eine "didaktische Innovation". In: Didaktische Innovationen im Schulbuch. Matthes, E. H., Heinze, C. H. (Hrsg.). Klinkhardt, Bad Heilbrunn, Obb.
- [358] Apple, M., Christion-Schmidt, L. K. (1991). The Politics of the Textbook. Routledge, New York.
- [359] Rauch, M., Wurster, E. (1997). Schulbuchforschung als Unterrichtsforschung. Vergleichende Schreibtisch- und Praxisevaluation von Unterrichtswerken für den Sachunterricht. P. Lang, Frankfurt am Main.

- [360] Schreiber, W., Schöner, A., Sochatzy, F., Ventzke, M. (2013). Analyse von Schulbüchern als Grundlage empirischer Geschichtsdidaktik. Kohlhammer, Stuttgart.
- [361] Tausch, M. W., Wachtendonk, M. v. (Hrsg.) (2010). Chemie 2000+. Sekundarstufe 1. C. C. Buchner, Bamberg.
- [362] Asselborn, W., Dreßel, B., Risch, K. T., Sieve, B. F. (Hrsg.) (2017). Chemie heute - SI. Nordrhein-Westfalen. Schroedel, Braunschweig.
- [363] Kraft, L., Ratermann, M., Stippel, F. (Hrsg.) (2016). NEO Chemie S I Nordrhein-Westfalen. Westermann Gruppe, Braunschweig.
- [364] Eisner, W., Gietz, P., Justus, A., Laitenberger, K., Nickolay, H., Schierle, W., Schmidt, B., Sternberg, M., Thorsten Zippel (2009). Elemente Chemie 1. Ernst Klett, Stuttgart.
- [365] Merchel, J. (2015). Evaluation in der Sozialen Arbeit. Mit 11 Tabellen. UTB GmbH, Reinhardt, Stuttgart, München u.a.
- [366] Caspari, D., Klippel, F., Legutke, M. K., Schramm, K. (2016). Forschungsmethoden in der Fremdsprachendidaktik. Ein Handbuch. Narr Francke Attempto, Tübingen.
- [367] Mayer, H. O. (2013). Interview und schriftliche Befragung. Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung. Oldenbourg, München.
- [368] Kruse, J., Schmieder, C., Weber, K. M., Dresing, T., Pehl, T. (2015). Qualitative Interviewforschung. Ein integrativer Ansatz. Juventa, Beltz, Weinheim u.a.
- [369] Mayring, P. (2016). Einführung in die qualitative Sozialforschung. Beltz, Weinheim.
- [370] Reinders, H. (2005). Qualitative Interviews mit Jugendlichen führen. Oldenbourg, München.
- [371] Fuß, S., Karbach, U. (2019). Grundlagen der Transkription. Eine praktische Einführung. Barbara Budrich, Opladen, Toronto.
- [372] Mayring, P. (2015). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken. Beltz, Weinheim.
- [373] Hug, T., Poscheschnik, G. (2010). Empirisch forschen. Die Planung und Umsetzung von Projekten im Studium. UVK Verlagsgesellschaft, Konstanz.
- [374] GDCh-Lehrerfortbildungszentren. <https://www.gdch.de/ausbildung-karriere/schule-studium-aus-und-fortbildung/lehrer/lehrerfortbildung.html> (letzter Zugriff am 17.6.2019).
- [375] Porst, R. (2014). Fragebogen. Ein Arbeitsbuch. Springer, Wiesbaden.
- [376] Beller, S. (2016). Empirisch forschen lernen. Konzepte, Methoden, Fallbeispiele, Tipps. Hogrefe, Bern.

- [377] Pietzner, V., Wagner, W. (2018). Klassische und digitale Medien im Chemieunterricht. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis, Seelze, 557–660.
- [378] Kuckartz, U. (2018). Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Beltz, Weinheim.
- [379] Lueger, M. (2010). Interpretative Sozialforschung. Die Methoden. Facultaswuv, Wien.
- [380] Kuckartz, U. (2012). Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung. Beltz Juventa, Weinheim u.a.
- [381] Hochstetter, J. (2011). Diagnostische Kompetenz im Englischunterricht der Grundschule. Eine empirische Studie zum Einsatz von Beobachtungsbögen. Narr, Tübingen.
- [382] Corbin, J., Strauss, A. (2015). Basics of qualitative research. Techniques and procedures for developing grounded theory, 4. Aufl. Sage, Thousand Oaks, California.
- [383] Mayring, P. (2008). Neuere Entwicklung in der qualitativen Forschung und der Qualitativen Inhaltsanalyse. In: Die Praxis der qualitativen Inhaltsanalyse. Mayring, P. (Hrsg.). Beltz, Weinheim u.a.
- [384] Demuth, R. (1992). Über die Auswirkungen von Schülerexperimenten. In: Zur Didaktik der Physik und Chemie. Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg. September 1991. Wiebel, K. H. H. (Hrsg.). Leuchtturm, Alsbach.
- [385] Becker, H.-J. (1984). Fach- und Lehrerbeliebtheit. Ergebnisse einer Untersuchung zum Chemieunterricht. MNU 37/2, 78–81.
- [386] Frischknecht-Tobler, U., Labudde, P. (2010). Beobachten und Experimentieren. In: Fachdidaktik Naturwissenschaft. 1. - 9. Schuljahr. Labudde, P. (Hrsg.). Haupt UTB, Bern u.a.
- [387] Walpuski, M., Hauck, A. (2017). Experimente und Lernerfolg. Wie können Experimentierphasen optimiert werden, um Interesse und Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler zu erhöhen? Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie 28/158, 8–13.
- [388] Mischke, W., Kiper, H. (2008). Selbstreguliertes Lernen - Kooperation - Soziale Kompetenz. Fächerübergreifendes Lernen in der Schule. W. Kohlhammer, Stuttgart.
- [389] Zeller, D., Bohrmann-Linde, C. (2017). Solarzellen ohne Silicium für den Chemieunterricht. Nachrichten aus der Chemie 65/12, 1236–1239.
- [390] Sekretariat der Kultusministerkonferenz (Hrsg.) (2019). Ländergemeinsame inhaltliche Anforderungen für die Fachwissenschaften und Fachdidaktiken in der Lehrerbildung. (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.10.2008 i. d.F. vom 16.05.2019).

- [391] Klafki, W. (1964). Das pädagogische Problem des Elementaren und die Theorie der kategorialen Bildung. Beltz, Weinheim.
- [392] Meyer, M. A., Meyer, H. (2007). Wolfgang Klafki. Eine Didaktik für das 21. Jahrhundert? Beltz, Weinheim u.a.
- [393] Kahlert, J. (2005). Zwischen den Stühlen zweier Referenzsysteme. Zum Umgang mit heterogenen Erwartungen bei der Evaluation schulnaher Disziplinen in Lehramtsstudiengängen. Zeitschrift für Pädagogik 51/6, 840–855.
- [394] Einsiedler, W. (1978). Didaktik eines schülerorientierten Unterrichts. In: Schülerorientierter Unterricht. Einsiedler, Wolfgang, Härle, Helmut (Hrsg.). Auer, Donauwörth.
- [395] Helmke, A. (2014). Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität. Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts. Klett - Kallmeyer, Seelze.
- [396] Pfeifer, P., Schaffer, S., Sommer, K. (2011). Schülerexperimente im Unterricht. Auswahlkriterien und Beispiele. Unterricht Chemie 22/121, 2–9.
- [397] Barke, H.-D., Harsch, G. (2011). Chemiedidaktik kompakt. Lernprozesse in Theorie und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [398] Stäudel, L., Wöhrmann, H. (1999). Chemieunterricht zwischen Alltag, Technik und Umwelt Unterstützungsmöglichkeiten im regionalen Verbund. CHEMKON 6/3, 114–117.
- [399] Pfeifer, P., Schaffer, S. (2011). Ziele von Schülerexperimenten. Von einer Ist-Standanalyse zur Unterrichtsentwicklung. Unterricht Chemie 22/122, 10–13.
- [400] Höttecke, D. (2008). Fachliche Klärung des Experimentierens. In: Kompetenzen, Kompetenzmodelle, Kompetenzentwicklung. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Essen 2007. Höttecke, D. (Hrsg.). LIT-Verlag Dr. W. Hopf, Berlin, 293–295.
- [401] Abteilung für Lehramtskandidaten der Chemie (Hrsg.). Schulversuchspraktikum. Skript zum Seminar Sommersemester 2008 - Wintersemester 2008/9. Johannes Gutenberg Universität Mainz.
- [402] Woest, V. (1997). Der unbeliebte Chemieunterricht? Ergebnisse einer Befragung von Schülern der Sekundarstufe 2. Mathematisch und Naturwissenschaftlicher Unterricht 50/1, 50–57.
- [403] Merzyn, G. (2013). Guter Chemieunterricht. Die Sicht von Schüler, Lehrern, Naturwissenschaftlern. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 62/1.
- [404] Wirth, J., Thillmann, H., Marschner, J., Gößling, J., Künsting, J. (2011). Lernen durch Experimentieren. Utopie oder nur eine Frage der Technik. Unterricht Chemie 22/126, 14–17.

- [405] Becker, H.-J. (1983). Eine empirische Untersuchung zur Beliebtheit des Chemieunterrichts. *chimica didactica* 9/97, 97–123.
- [406] Schulz, A. (2010). Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. Eine Videostudie. Dissertation. Universität Duisburg-Essen.
- [407] Abrahams, I., Millar, R. (2008). Does Practical Work Really Work? A study of the effectiveness of practical work as a teaching and learning method in schools science. *International Journal of Science Education* 30/14, 1945–1969.
- [408] Neth, P. Folgeschwerer Bedeutungsverlust. <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/naturwissenschaften-folgeschwerer-bedeutungsverlust-1.2703213> (letzter Zugriff am 23.6.2019).
- [409] Moszkowski, A. (1921). Einstein. Einblicke in seine Gedankenwelt. Gemeinverständliche Betrachtungen über die Relativitätstheorie und ein neues Weltsystem. Entwickelt aus Gesprächen mit Einstein. Hoffmann und Campe, F. Fontane & Co, Hamburg, Berlin.
- [410] Vollmeyer, R. (2006). Ansatzpunkte für die Beeinflussung von Lernmotivation. In: *Hanbuch Lernstrategien*. Mandl, H., Friedrich, H. F. (Hrsg.). Hogrefe, Göttingen u.a.
- [411] Goebel, M. (2017). Kautschuk und Löwenzahn in der curricularen Innovationsforschung. Universität Siegen.
- [412] Bader, H.-J., Lühken, A. (2018). Anforderungen an ein Schulexperiment. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Aulis, Seelze, 464–466.
- [413] Rossa, E. (1959). Das naturwissenschaftliche Experiment als Mittel der Erziehung Untersuchungen über die Beschaffenheit, den Erziehungswert und den Einsatz chemischer Unterrichtsversuche. Volk und Wissen, Berlin.
- [414] Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception. Toward a theory of conceptual change. *Science Education* 66/2, 211–227.
- [415] Weidenmann, B. (1997). "Multimedia": Mehrere Medien, mehrere Codes, mehrere Sinneskanäle? *Unterrichtswissenschaft* 25/3, 197–206.
- [416] Tausch, M. W. (2015). Photo-LeNa. Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 64/1, 5–9.
- [417] Tausch, M. W. (2016). Didaktisch integrativer Chemieunterricht. Kohärente Inhalte, Methoden und Medien. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 65/5, 44–48.
- [418] Kuhn, T. S. (2009). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press, Chicago.

- [419] Friedrich, C. (2010). Fachdidaktik. Alltagsvorstellungen von Schülern und Konzeptwechsel im GW-Unterricht - Begriff, Bedeutung, Forschungsschwerpunkte, Unterrichtsstrategien. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft* 152, 305–322.
- [420] Bader, H.-J., Lühken, A., Sommer, K. (2018). Schülerexperimente im Chemieunterricht. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Aulis, Seelze, 479–493.
- [421] Schmidkunz, H., Lindemann, H. (2003). Das forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren. Problemlösen im naturwissenschaftlichen Unterricht. Westarp Wissenschaften, Magdeburg.
- [422] Heimann, R., Neumann, S. (2011). Naturwissenschaftliches Denken. Welche Bedeutung hat es für den Chemieunterricht und wie kann man seine Ausprägung ermitteln? *Unterricht Chemie* 22/124/125, 26–31.
- [423] Huwer, J. (2015). Nachhaltigkeit und Chemie im Schülerlabor. Forschendes Experimentieren im Kontext einer naturwissenschaftlich-technischen Umweltbildung. Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- [424] Schaffer, S., Pfeifer, P. (2011). Ziele von Schülerexperimenten. Von einer Ist-Standanalyse zur Unterrichtsentwicklung. *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie* 22/126, 10–13.
- [425] LE. Lightning Ever. LED Taschenlampen. <https://www.lightingever.de/5w-cree-led-auflanbare-taschlampe-580lm-1200021.html> (letzter Zugriff am 25.6.2019).
- [426] Uhrhammer-Lehrmittel. Naturwissenschaftliche Fachhandlung. Teclubrenner. <http://www.urhammer.de/lehrmittel/chemie/laborbrenner-und-waerme-quellen/teclubrenner#isPage=1> (letzter Zugriff am 25.6.2019).
- [427] WINLAB. Onlineshop für naturwissenschaftliches Unterrichtsmaterial und Labortechnik. Laborbrenner. <https://www.winlab.de/schule/mess-pruefgeraete/laborbrenner/?p=1> (letzter Zugriff am 10.1.2020).
- [428] Tausch, M. W. (Hrsg.) (2015). Begleitheft zum PHOTO-MOL Experimentierkoffer. Hedinger.
- [429] Tausch, M. W., Schmitz, R.-P., Meuter, N. (2013). Ein Fall für 2. Interaktion von Chlorophyll und β -Carotin bei der Photosynthese. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 62/8, 15–20.
- [430] Tausch, H. Ein Fall für 2. Teil 1. <http://www.colour.education/photosynthese-ein-fall-fuer-2/> (letzter Zugriff am 9.7.2018).
- [431] Tausch, M. W., Bohrmann-Linde, C., Posala, F., Nietz, D. (2013). Akku leer? Licht an! Photoelektrochemische Lichtenergiekonversion und -speicherung. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 62/5, 25–31.

- [432] Hilger, G. (1980). Anregungen für einen schüleraktiven Unterricht. In: Schüler beurteilen Schule. Analyse und Interpretation von Dokumenten zum Schulalltag aus dem Blickwinkel von Schülern. Hagstedt, H., Hildebrand-Nilshon, M.(Hrsg.). Pädagogischer Verlag Schwann, Düsseldorf.
- [433] Wiater, W. (2012). Unterrichtsprinzipien. Prüfungswissen – Basiswissen Schulpädagogik. Auer, Donauwörth.
- [434] Wahl, D. (2013). Lernumgebungen erfolgreich gestalten. Verlag Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- [435] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen. Übersicht über die Operatoren für das Fach Chemie. <https://www.standardsicherung.schulministerium.nrw.de/cms/zentralabiturgost/faecher/get-file.php?file=3850> (letzter Zugriff am 30.6.2019).
- [436] Gläser-Zikuda, M. (2001). Emotionen und Lernstrategien in der Schule. Eine empirische Studie mit qualitativer Inhaltsanalyse. Beltz, Weinheim u.a.
- [437] Stäudel, L. (2009). Differenzieren im Chemieunterricht. Eine Herausforderung für Lehrkräfte, Lernende und das Selbstverständnis von Schule. Unterricht Chemie 20/111/112, 8–11.
- [438] Ministerium für Bildung und Schule des Landes Nordrhein-Westfalen. Binnendifferenzierung. <https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Schulsystem/Schulformen/Hauptschule/FAQ-A--Z/Binnendifferenzierung/index.html> (letzter Zugriff am 30.6.2109).
- [439] Schmidkunz, H. (2009). Backzutaten identifizieren. Innere Differenzierung durch arbeitsteiliges Experimentieren. Unterricht Chemie 20/111-112, 46–48.
- [440] Thiel, F., Richter, S. G., Ophardt, D. (2012). Steuerung von Übergängen im Unterricht. Zeitschrift für Erziehungswissenschaft 15/4, 727–752.
- [441] Lohrmann, K. (2008). Langweile im Unterricht. Waxmann, New York u.a.
- [442] Ministerium für Bildung und Schule des Landes Nordrhein-Westfalen. Medienkompetenzrahmen NRW. <https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Schulsystem/Medien/Medienkompetenzrahmen/index.html> (letzter Zugriff am 30.6.2019).
- [443] Chemie mit Licht. <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/de/qr-materialien-pakete/experimentierkoffer-materialiensets/qr-34-materialienbox-photo-like.html> (letzter Zugriff am 12.11.2019).
- [444] Chemie mit Licht. <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/> (letzter Zugriff am 29.7.2019).
- [445] Beilstein TV (2018). Video category: photochemistry. <https://www.beilstein.tv/categories/Photochemistry/> (letzter Zugriff am 30.6.2019).
- [446] Das Konzept „Flipped Classroom“. <https://fliptheclassroom.de/konzept/> (letz-ter Zugriff am 30.6.2019).

- [447] Weidlich, J., Spannagel, C. (2014). Die Vorbereitungsphase im Flipped Classroom. Vorlesungsvideos versus Aufgaben. In: Lernräume gestalten – Bildungskontexte vielfältig denken. Rummler, K. (Hrsg.). Waxmann, Münster, New York, 237–248.
- [448] Barke, H.-D. (2006). Chemiedidaktik. Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [449] Sommer, K. (2018). Begriffsbildung im Chemieunterricht. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Aulis, Seelze, 248–261.
- [450] Johnstone, A. H. (2000). Teaching of chemistry – Logical or psychological? Chemistry Education Research and Practise 1/1, 9–15.
- [451] Leisen, J. (2015). Fachlernen und Sprachlernen! Bringt zusammen, was zusammen gehört! Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht 68/3, 132–137.
- [452] Yurdanur, Y. (2016). Tims Lieblingsjoghurt verpackt in Polystyrol (Teil 2) - Der Reaktionsmechanismus der radikalischen Polymerisation. Unterrichtspraktische Prüfung. Schriftliche Arbeit im Fach Chemie, Krefeld.
- [453] Gabel, D. (1999). Improving Teaching and Learning through Chemistry Education Research. A Look to the Future. Journal of Chemical Education 76/4, 548.
- [454] Leisen, J. (2017). Handbuch Fortbildung Sprachförderung im Fach. Sprachsensibler Fachunterricht in der Praxis, 1. Aufl. Ernst Klett Sprachen, Stuttgart.
- [455] Leisen, J. (2018). Bringt zusammen, was zusammengehört: Fachlernen und Sprachlernen! Karlsruhe.
- [456] Leisen, J. (2005). Wechsel der Darstellungsformen. Ein Unterrichtsprinzip für alle Fächer. Der fremdsprachliche Unterricht Englisch 39/78, 9–11.
- [457] Mézes, C. (2016). Zur Motivation beim Experimentieren im Physikunterricht. Pädagogische Hochschule Schwäbisch Gmünd.
- [458] Hart, C., Mulhall, P., Berry, A., Loughran, J., Gunstone, R. (2000). What is the purpose of this experiment? Or can students learn something from doing experiments? Journal of Research in Science Teaching 37/7, 655–675.
- [459] Zehren, W. (2009). Forschendes Experimentieren im Schülerlabor. Universität des Saarlandes, Saarbrücken.
- [460] Kremers, T. (2014). Wie lernwirksam ist das kooperative Lernen? Lernen in kooperativen Strukturen auf dem Prüfstand der Hattie-Studie. In: Die Hattie-Studie in der Diskussion. Probleme sichtbar machen. Terhart, E. (Hrsg.). Klett Kallmeyer, Seelze.

- [461] Rumann, S. (2004). Kooperatives Experimentieren im Chemieunterricht. Entwicklung und Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Stärke. Universität Duisburg-Essen.
- [462] Feigenwinter, M. (1977). Gruppenarbeit im Unterricht. Verlag Arp, St. Gallen.
- [463] Johnson, D. W., Johnson Roger T. An Overview of Cooperative Learning. Definition of Cooperative Learning. <http://www.co-operation.org/what-is-cooperative-learning> (letzter Zugriff am 2.7.2019).
- [464] Johnson, D. W., Johnson, R. T., Holubec, E. J. V. (1994). The new circles of learning. Association for Supervision and Curriculum Development, Alexandria, Virginia.
- [465] Green, N., Green, K. (2005). Kooperatives Lernen im Klassenraum und im Kollegium. Das Trainingsbuch. Klett-Kallmeyer, Seelze.
- [466] Brüning, L., Saum, T. (2009). Erfolgreich unterrichten durch Kooperatives Lernen 2. Neue Strategien zur Schüleraktivierung. Individualisierung - Leistungsbeurteilung - Schulentwicklung. Neue-Deutsche-Schule, Essen.
- [467] Weinert, F. E. (2000). Lehren und Lernen in der Zukunft - Ansprüche an das Lernen in der Schule. Pädagogisches Zentrum in Bad Kreuznach.
- [468] Rabenstein, K., Reh, S. (2007). Kooperative und selbstständigkeitsfördernde Arbeitsformen im Unterricht. Forschungen und Diskurse. In: Kooperatives undselbstständiges Arbeiten von Schülern. Zur Qualitätsentwicklung von Unterricht. Rabenstein, K. (Hrsg.). VS, Wiesbaden.
- [469] Ausubel, D. P., Novak, J. D., Hanesian, H. (1980). Psychologie des Unterrichts 1. Beltz, Weinheim u.a.
- [470] Hattie, J. (2014). Lernen sichtbar machen für Lehrpersonen (Orig.: Visible Learning for Teachers: Maximizing Impact on Learning. London (2012). Schneider, Hohengehren.
- [471] Jahnke, J. (1977). Motivation in der Schulpraxis. Ergebnisse der modernen Motivationspsychologie. Lernen wollen oder lernen müssen - das Dilemma des schulischen Lernens. Interesse als Lernziel. Herder, Freiburg u.a.
- [472] Bohrmann-Linde, C., Krees, S., Tausch, M. W., Wachtendonk, M. v. (Hrsg.) (2012). Chemie 2000+. Einführungsphase. C. C. Buchner, Bamberg.
- [473] Bohrmann-Linde, C., Krees, S., Tausch, M. W., Wachtendonk, M. v. (Hrsg.) (2015). Chemie 2000+. Qualifikationsphase. C. C. Buchner, Bamberg.
- [474] Neubauer, D. (2016). Demokrit lässt grüßen. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [475] Meisert, A. (2008). Vom Modellwissen zum Modellverständnis - Elemente einer umfassenden Modellkompetenz und deren Fundierung durch lernerseitige Kriterien zur Klassifikation von Modellen. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 14, 243–261.

- [476] Grünkorn, J., Lotz, A., Terzer, E. (2014). Erfassung von Modellkompetenz im Biologieunterricht. *MNU* 67/4, 132–138.
- [477] Spörhase-Eichmann, U. (2015). *Biologie Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*, 7. Aufl. Cornelsen.
- [478] Justi, R. S., Gilbert, J. K. (2002). Science Teachers' Knowledge about and Attitudes towards the Use of Models and Modelling in Learning Science. *International Journal of Science Education* 24/12, 1273–1292.
- [479] Tausch, M. W. (1982). Modelle im Chemieunterricht. *MNU* 35/4.
- [480] Sommer, K., Toschka, C., Schröder, L., Schröder, T. P., Steff, H., Fischer, R. A. (2017). Modellexperimente im Chemieunterricht. *CHEMKON* 24/1, 13–19.
- [481] Sommer, K., Steff, H., Toschka, C. (2018). Modellexperimente. In: *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Aulis, Seelze, 541–552.
- [482] Grandrath, R., Zeller, D., Kremer, R., Venzlaff, J., Tausch, M. W., Bohrmann-Linde, C. (2019). E3 - Energieumwandlung experimentell erleben. *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie* 30/4, 29–34.
- [483] Graf, E. (2002). Modelle im Chemieunterricht. *Unterricht Chemie* 13/67.
- [484] van Driel, J. H., Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modelling in science. *International Journal of Science Education* 21/11, 1141–1153.
- [485] Clement, J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education* 22/9, 1041–1053.
- [486] Pöpping, W. (2002). Modellarbeit als Methodentraining und als Unterrichtseinheit. *Unterricht Chemie* 13/67, 10–12.
- [487] Gilbert, J. K., Boulter, C. J. (1998). Learning Science through Models and Modelling. In: *International Handbook of Science Education*. Fraser, B. J., Tobin, K. G. (Hrsg.). Kluwer, Dordrecht.
- [488] Tausch, M. W. V. (2009). Innovationen. In *Zeiten von Kerncurricula und PISA. Die verborgenen Innovationen* 58/2, 35–37.
- [489] Hameyer, U. (1978). *Innovationsprozesse. Analysemodell und Fallstudien zum sozialen Konflikt in der Curriculumrevision*. Beltz, Weinheim, Basel.
- [490] Klein, K. J., Sorra, J. S. (1996). The Challenge of Innovation Implementation. *The Academy of Management Review* 21/4, 1055.
- [491] Meifert, M. T. (2013). *Strategische Personalentwicklung. Ein Programm in acht Etappen*. Springer, Wiesbaden.
- [492] Tippelt, R., Edelmann, D., Schmidt, J. (2011). *Einführung in die Bildungsforschung*. Kohlhammer, Stuttgart.

- [493] Reinmann, G. (2007). Innovationskrise in der Bildungsforschung: Von Interessenkämpfen und ungenutzten Chancen einer Hard-to-do-Science. In: Der Nutzen wird vertagt... Bildungswissenschaften im Spannungsfeld zwischen wissenschaftlicher Profilbildung und praktischem Mehrwert. Reinmann, G., Kahlert, J.(Hrsg.). Pabst, Lengerich.
- [494] Eid, M., Gollwitzer, M., Schmitt, M. (2010). Statistik und Forschungsmethoden. Mit Online-Materialien. Beltz, Weinheim.
- [495] Reinders, H. (2016). Qualitative Interviews mit Jugendlichen führen. Ein Leitfaden. de Gruyter, Berlin.
- [496] Qualitäts- und Unterstützungs Agentur - Landesinstitut für Schule NRW. Standorttypen für den fairen Vergleich. <https://www.schulentwicklung.nrw.de/e/vera3/informationen-fuer-lehrerinnen-und-lehrer/standorttypen-konzept/index.html> (letzter Zugriff am 25.7.2019).
- [497] Institut der Feuerwehr Nordrhein-Westfalen. Ansprechpartner Kreise / kreisfreie Städte. <https://www.idf.nrw.de/technik/kompetenzzentrum/kartenuebersicht.php> (letzter Zugriff am 16.7.2019).
- [498] Ditton, H., Müller, A. (2014). Feedback und Rückmeldungen. Waxmann, Münster.
- [499] Hertel, S., Klug, J., Schmitz, B. (2010). Quasi-experimentelle Versuchspläne. In: Handbuch Statistik, Methoden und Evaluation. Holling, H. (Hrsg.). Hogrefe, Göttingen.
- [500] Mayer, H. O. (2008). Interview und schriftliche Befragung. Entwicklung, Durchführung und Auswertung, 4. Aufl. Oldenbourg, München.
- [501] Klöckner, J., Friedrichs, J. (2014). Gesamtgestaltung des Fragebogens. In: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Baur, N., Blasius, J.(Hrsg.). Springer, Wiesbaden, 675–686.
- [502] Raab-Steiner, E., Benesch, M. (2015). Der Fragebogen. Von der Forschungsidee zur SPSS-Auswertung. Facultas, Wien.
- [503] Hecker, K. (2015). Kompetenzkonzepte des Bildungspersonals im Übergangssystem. Eine explorative Studie an verschiedenen Lernorten. Springer, Wiesbaden.
- [504] Stracke, I., Urhahne, D., Gräsel, C., Demuth, R. (2004). Computergestützte Concept Maps. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 53/8, 2–7.
- [505] Braun, E., Gusy, B., Leidner, B., Hannover, B. (2008). Das Berliner Evaluationsinstrument für selbsteingeschätzte, studentische Kompetenzen (BEvaKomp). Diagnostica 54/1, 30–42.
- [506] Lutter, A. (2011). Concept Map, Mindmap und Kartenabfrage: Methoden zur Diagnose und Evaluation von Schülervorstellungen im sozialwissenschaftlichen Unterricht. In: Was passiert im Klassenzimmer? Methoden zur Evaluation, Diagnostik und Erforschung des sozialwissenschaftlichen Unterrichts. Zurstrassen, B.(Hrsg.). Wochenschau-Verlag, Schwalbach

- [507] Freiman, T. (1999). Mind-Maps – mit Methode mehr Durchblick. *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie* 10/53, 27–29.
- [508] Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley, Massachusetts u.a.
- [509] Ihm, P. (1980). Explorative und konfirmatorische Datenanalyse - Gegensatz oder Ergänzung?. In: *Explorative Datenanalyse. Frühjahrstagung der GMDS; München, 21. - 22. März 1980*.
- [510] Nachtigall, C., Pohl, S., Hartenstein, S. (2010). Univariate deskriptive Statistik. In: *Handbuch Statistik, Methoden und Evaluation*. Holling, H. (Hrsg.). Hogrefe, Göttingen.
- [511] Bock, H. H. (1980). Explorative Datenanalyse. In: *Explorative Datenanalyse. Frühjahrstagung der GMDS ; München, 21. - 22. März 1980*.
- [512] Burkhardt, M., Sedlmeier, P. (2015). *Explorative und deskriptive Datenanalyse mit R, 1. Aufl.* Rainer Hampp, München.
- [513] Schuster, H. (2017). *Microsoft Excel Pivot-Tabellen: Das Praxisbuch. Ideen und Lösungen für die Datenanalyse mit PivotTables und PivotCharts mit intensivem Einstieg in PowerPivot für Version 2010, 2013 und 2016*. O'Reilly, Heidelberg.
- [514] Jambu, M. (1992). *Explorative Datenanalyse*. Gustav Fischer, Stuttgart u.a.
- [515] Schäfer, T. (2016). *Methodenlehre und Statistik. Einführung in Datenerhebung, deskriptive Statistik und Inferenzstatistik*. Springer, Wiesbaden.
- [516] Polasek, W. (1994). *EDA Explorative Datenanalyse. Einführung in die deskriptive Statistik, 2. Aufl.* Springer, Berlin.
- [517] Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences, 2. Aufl.* Erlbaum, New York u.a.
- [518] Holling, H., Gediga, G. (2011). *Statistik - Deskriptive Verfahren*. Hogrefe, Göttingen.
- [519] Hilgers, R.-D., Scheiber, V., Bauer, P. (2007). *Einführung in die Medizinische Statistik*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [520] Wortwolken. <https://www.wortwolken.com/> (letzter Zugriff am 17.10.2019).
- [521] Wagner, A. (2015). *Formelsprache im Chemieanfangsunterricht unter Berücksichtigung gitterförmig aufgebauter Stoffe und einer adäquaten Teilchensystematik*. Schöningh Verlag, Münster.
- [522] Bergische Universität Wuppertal. SommerUni. <https://www.sommer.uni-wuppertal.de/> (letzter Zugriff am 29.7.2019).
- [523] Bott, K. (2008). *Kriminalitätsvorstellungen in der Kindheit. Eine explorative, kriminalsoziologische Studie, 1. Aufl.* VS, Wiesbaden.
- [524] Steinke, I. (1999). *Kriterien qualitativer Forschung. Ansätze zur Bewertung qualitativ-empirischer Sozialforschung*. Juventa, Weinheim.
- [525] MINT EC. *Das nationale Excellence-Schulnetzwerk*. <https://www.mint-ec.de/> (letzter Zugriff am 8.8.2019).

- [526] Yurdanur, Y. Photo-LIKE. <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/index.php?id=4748> (letzter Zugriff am 29.7.2019).
- [527] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hrsg.) (2019). DGUV Information 213-098. Stoffliste zur DGUV Regel 113-018 „Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen“.
- [528] Meyer, H., Terhart, E., Helmke, A. (2007). Guter Unterricht - nur ein Angebot? Interview mit dem Unterrichtsforscher Andreas Helmke. Friedrich Jahresheft 2007, 62–63.
- [529] Stern, E. (i. P.) (2012). Entscheidend ist das Vorwissen. Forschung und Lehre 19/6, 452–453.
- [530] Grone-Lübke, W. v., Petersen, J. (2013). Motivieren können. Motivation in Theorie und Praxis. Ein praxisorientiertes Studien- und Arbeitsbuch. Brigg Pädagogik, Augsburg.
- [531] Dietrich, G., Kopp, F., Kreuz, A., Meyer, K., Rosenbusch, H. S., Schießl, O. (1974). Kooperatives Lernen in der Schule, 2. Aufl. Auer, Donauwörth.
- [532] Eckermann, T. (2017). Kinder und ihre Peers beim kooperativen Lernen. Differenz bearbeiten Unterschiede herstellen. Springer, Wiesbaden.
- [533] Borsch, F. (2015). Kooperatives Lernen. Theorie – Anwendung – Wirksamkeit. Kohlhammer, Stuttgart.
- [534] Kührt, P. (2001). "Future Guide" als didaktisches Prinzip - Zur Integration handlungsorientierter und multimedialer Lernumgebungen. Medien Pädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung 2, 1–12.
- [535] Helm, C. (2011). Lernförderliches Klima im/durch geöffneten Unterricht? Die Klimavariablen und ihr Beitrag zur Schulentwicklung. wissenplus 5-10, 50–54.
- [536] Konrad, K. (2014). Lernen lernen - allein und mit anderen. Konzepte, Lösungen, Beispiele. Springer, Wiesbaden.
- [537] Renkl, A. (1997). Lernen durch Lehren. Zentrale Wirkmechanismen beim kooperativen Lernen. DUV, Wiesbaden.
- [538] Comenius, J. A. (1957). Opera didactica omnia. Academia Scientiarum Bohemoslovaca, Prag.
- [539] Stern, E., Schumacher, R. (2004). Lernziel: Intelligentes Wissen. Universitas 59/2, 121–134.
- [540] Steffens, U., Höfer, D. (2016). Lernen nach Hattie. Wie gelingt guter Unterricht? Beltz, Weinheim.
- [541] Mandl, H., Friedrich, H. F. (Hrsg.) (2006). Handbuch Lernstrategien. Hogrefe, Göttingen u.a.
- [542] Arnold, R., Krämer-Stürzl, A., Siebert, H. (2011). Dozentenleitfaden. Erwachsenenpädagogische Grundlagen für die berufliche Weiterbildung, 2. Aufl. Cornelsen, Berlin.

- [543] Stary, J. (2004). Das didaktische Kernproblem. Verfahren und Kriterien der didaktischen Reduktion. In: Neues Handbuch Hochschullehre. A.1.2. Berendt, B., Voss, H.-P., Wildt, J. (Hrsg.). Raabe, Bonn.
- [544] Schlag, B. (1995). Lern- und Leistungsmotivation. Leske + Budrich, Opladen.
- [545] Herrmann, U. (2009). Neurodidaktik. Grundlagen und Vorschläge für gehirngerechtes Lehren und Lernen. Beltz, Weinheim.
- [546] Ralle, B., Fuccia, D.-S. (2014). Aktionsforschung als Teil fachdidaktischer Entwicklungsforschung. In: Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung. Krüger, D., Parchmann, I., Schecker, H. (Hrsg.). Springer, Berlin, Heidelberg, 43–55.
- [547] VCI. Unterrichtsförderung. <https://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsfoerderung/seiten.jsp> (letzter Zugriff am 8.11.2019).
- [548] VCI. Der Fonds. <https://www.vci.de/fonds/der-fonds/seiten.jsp> (letzter Zugriff am 8.11.2019).
- [549] Bergische Universität Wuppertal. Chemie mit Licht. <https://chemiemitlicht.uni-wuppertal.de/> (letzter Zugriff am 2.10.2019).
- [550] Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2019). Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung. Schule in NRW Nr. 9052.
- [551] Phenomen Based Learning. <http://www.phenomenaleducation.info/phenomenon-based-learning.html> (letzter Zugriff am 5.10.2019).
- [552] Huber, N., Habelitz-Tkotz, W. (2015). Stolpersteine auf dem Weg zu einem naturwissenschaftlichen Energie-Konzept. Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule 64/2, 29–36.
- [553] Reinmann, G. (2013). Entwicklung als Forschung? Gedanken zur Verortung und Präzisierung einer entwicklungsorientierten Bildungsforschung. In: Kompetenzentwicklung in unterschiedlichen Lernkulturen. Festschrift für Dieter Eulerzum 60. Geburtstag. Seufert, S., Metzger, C. (Hrsg.). Eusl, Paderborn.
- [554] Ministerium für Schule und Weiterentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2008). Richtlinien und Lehrpläne für die Grundschule in Nordrhein-Westfalen. Deutsch. Sachunterricht. Mathematik. Englisch. Musik. Kunst. Sport. Evangelische Religionslehre. Katholische Religionslehre. Ritterbach, Frechen.
- [555] Helmholtz-Gymnasium Bielefeld. JG 8-9 Differenzierungsbereich. <http://www.helmholtz-bi.de/lernen/jahrgangsstufen/mittelstufe/jg-8-9-differenzierungsbereich/> (letzter Zugriff am 9.10.2019).
- [556] Rhein-Gymnasium Köln. Biochemie. <https://www.rhein-gymnasium-koeln.de/index.php/unterricht-konzepte/wahlpflichtfer/biochemie> (letzter Zugriff am 9.10.2019).

9 Anhang

9.1 Analyseraster zur Schulbuchanalyse

Schulbuch	Themen	Experimente
Chemie heute S 1 Gesamtband Schroedel Verlag, 2017	<ul style="list-style-type: none"> –17.7 Regenerative Kraftstoffe – immer umweltfreundlich? –18.1 Grundstoffe für die Alkoholgewinnung im Zusammenhang <p>Anzahl: 2</p>	<p>Anzahl: 0</p>
	<ul style="list-style-type: none"> –14.1 Eisen – das wichtigste Metall –14.2 Rosten – Korrosion von Eisen –14.3 Oxidation – auch ohne Sauerstoff? –14.4 Wer oxidiert wen? – edle und unedle Metalle –Methode: Aufstellung von Redoxgleichungen –Praktikum: Redoxreaktionen und Korrosion von Eisen –14.5 Metalle schützen sich selbst – Passivierung –14.6 Kampf der Korrosion –Praktikum: Korrosionsschutz –Projekt: Korrosionsschutz bei der Autokarosserie –Basiswissen: Korrosion und Korrosionsschutz –Training: Korrosion und Korrosionsschutz –17.8 Mobilität auf neuen Wegen – elektrische Energiespeicher –Praktikum: Batterien selbst gebaut –17.9 Batterien –17.10 Akkumulatoren –Übersicht: Für jeden Zweck die richtige Batterie –17.11 Brennstoffzellen –Basiswissen: Mobilität – Krafterzeuge heute und morgen <p>Anzahl: 19</p>	<ul style="list-style-type: none"> –Korrosion von Eisennägeln –Forschungsauftrag Rostschutz –Strom aus Obst und Gemüse? –Münzbatterie –Bau einer Alkali-Mangan-Batterie <p>Anzahl: 5</p>
NEO Chemie Sekundarstufe 1 Gesamtband Schroedel Verlag, 2017	<ul style="list-style-type: none"> –2.1 Ein Verwandlungskünstler – Energie 1 –3.2 Mollig warm – Treibhauseffekt –3.4 Leben unter Wasser – Löslichkeit von Gasen –3.6 Für eine bessere Zukunft – Nachhaltigkeit –10.9 Hier brennt doch gar nichts – Brennstoffzellen <p>Anzahl: 5</p>	<p>Anzahl: 0</p>

Schulbuch	Themen	Experimente
	<ul style="list-style-type: none"> -7.3 Alte Liebe rostet doch – Korrosion und Korrosionsschutz -7.4 Schwimmen mit dem Strom – Elektrolyse -7.5 Dem Strom sei Dank – Aluminiumherstellung -Chemie kumulativ: Korrosion – nicht immer gefürchtet -Kompakt (: Elektrolyse, Korrosion usw.) -10.8 Energy to go – elektrochemische Stromquelle -10.9 Hier brennt doch gar nichts – Brennstoffzellen -Kompakt (: Elektrochemische Energiequellen usw.) <p>Anzahl: 8</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Spitzeversuch -Wasserleitungen aus Eisen und Kupfer -Tropfenelektrolyse -Das Teelicht -Salzwasserbatterie <p>Anzahl: 5</p>
Chemie 2000+ Sekundarstufe 1 Gesamtband C. C. Buchner Verlag, 2010	<ul style="list-style-type: none"> -Mindmap – Treibhauseffekt, Klimawandel -3 mm Ozon – der Filter für's Leben -Das Ozon und die UV-Strahlung (<i>fakultativ</i>) -Sonne – Wasser – Wasserstoff, die Solar-Wasserstoff-Technik (<i>fakultativ</i>) -Strom aus Licht – Photovoltaik (<i>fakultativ</i>) -Nachwachsende Rohstoffe <p>Anzahl: 6</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Modellversuch zum Treibhauseffekt -Erzeugung von Ozon und UV-Absorption (3 Experimente) <p>Anzahl: 2</p>
	<ul style="list-style-type: none"> -Salzlösungen unter Strom -Ionen und Elektrolyse -Metallüberzüge – nützlich und schön -Erzwungene Metallabscheidungen -Dem Rost auf der Spur -Das Rosten als Elektronenübertragung -Methodenseite: Aufstellen von Redoxgleichungen -Methodenseite: Spontane Metallabscheidung -Methodenseite: Unedel aber nicht rostend -Training -Grundwissen (: Elektrolyse usw.) -Strom ohne Steckdose -Einfache Batterien -Moderne Batterien und Akkus (<i>fakultativ</i>) -No Emission-Auto? -Brennstoffzellen -Strom aus Licht – Photovoltaik (<i>fakultativ</i>) <p>Anzahl: 17</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Elektrische Leitfähigkeit von Kochsalzkristallen -Elektrische Leitfähigkeit von destilliertem Wasser -Elektrische Leitfähigkeit von Salzen -zwei Versuche zur Elektrolyse -Ionenwanderung -Vekupfern -Schutzwirkung durch Metallüberzug -Überzug mit Graphit -Rostende Eisenwolle 1 -Rostende Eisenwolle 2 -Zinkperle in einer Kupfersulfatlösung -Strom aus der Petrischale -Zink-Luft-Batterie -Salzbatterie -Lithium-Kupfer-Zelle -Zink-Iod-Zelle -Modellversuch zur Brennstoffzelle -Leitfähigkeit von Metallen -Leitfähigkeit von Halbleitern <p>Anzahl: 20</p>

Schulbuch	Themen	Experimente
Elemente Chemie 1 Gesamtband Ernst Klett Verlag, 2009	<ul style="list-style-type: none"> –3.4 Kohlenstoffdioxid und Treibhaus-effekt –9.1 Pflanzenwachstum und Düngung –10.5 Der Kohlenstoffkreislauf –11.1 Zukunftssichere Energieversorgung –11.13 Exkurs Erdgas und Wasserstoff in der Energietechnik <p>Anzahl: 5</p>	Anzahl: 0
	<ul style="list-style-type: none"> –6.13 Metalle schützen und veredeln –6.14 Rost –6.15 Elektronenübergänge – Redoxreaktionen –6.16 Elektronenübergänge bei Elektrolysen –6.17 Exkurs: Korrosionsschutz durch Elektrolyse –6.18 Praktikum: Vergolden eines Kupfergegenstandes –6.19 Durchblick: Zusammenfassung und Übung –11.15 Mit dem Elektroauto unterwegs –11.16 Praktikum: Batterie –11.7 Energie aus Batterien und Brennstoffzellen –11.8 Exkurs: Energie aus Akkumulatoren –11.9 Durchblick: Zusammenfassung und Übung <p>Anzahl: 12</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Dem Rost auf der Spur – Redoxreaktionen in Lebensmitteln – Versuchsreihe mit drei Versuchen zum Thema 6.15 – Elektrolyse – Vergolden auf Kupfer – Elektronenübertragung – Zink-Kupfer-Batterie – Reihenschaltung galvanischer Zellen <p>Anzahl: 10</p>
Fokus Chemie Sekundarstufe 1 Gesamtband Cornelsen Verlag, 2010	<ul style="list-style-type: none"> – Wärme und Licht bei chemischen Reaktionen – Treibhauseffekt – lebensnotwendig und gefährlich? – Blick ins Weltall – Düngemittel – was braucht der Boden – Zukunftssichere Energieversorgung – Energieumwandlung im Fokus <p>Anzahl: 6</p>	Anzahl: 0
	<ul style="list-style-type: none"> – Chemie erlebt: Metalle – hart aber schutzbedürftig – Reaktionen von Metallen mit Salzlösungen – Chemie erlebt: Metallüberzüge – nicht nur Schutz vor Korrosion – Korrosion und Korrosionsschutz – Chemie erlebt: Salzlösungen und elektrischer Strom 	<ul style="list-style-type: none"> – Untersuche den Rostvorgang. – Ermittle den Einfluss der Wasserart auf die Korrosion. – Untersuche die Abhängigkeit der Korrosion vom Metall. – Erkunde dir Abhängigkeit der Korrosion von der Oberfläche des Metalls.

Schulbuch	Themen	Experimente
	<ul style="list-style-type: none"> – Elektrolysen – Im Brennpunkt: Technische Anwendungen der Elektrolyse – Weiter gedacht – Auf einen Blick (: Elektrolyse, Korrosion usw.) – Check up – Strom ohne Steckdose – Galvanische Zellen – Batterien – Akkumulatoren (<i>fakultativ</i>) – Im Brennpunkt: Leere Batterien – was passiert damit? – Brennstoffzellen – Systeme mit Zukunft <p>Anzahl: 15</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Erkunde die Korrosion von Eisen bei Kontak mit Zink. – Ermittle die Folgen von defektem Korrosionsschutz. – Leite elektrischen Strom durch eine Zinkiodidlösung. – Untersuche die Ionenwanderung. – Verzinke einen Eisennadel. – Verkupfere eine Münze. – Erkunde den Aufbau einer Zink-Kohle-Batterie. – Untersuche ein Daniell-Element. – Demonstriere die Funktionsweise einer Brennstoffzelle. <p>Anzahl: 13</p>
Chemie heute Einführungsphase Schroedel Verlag, 2014	<ul style="list-style-type: none"> – Der Treibhauseffekt – 6.2 Polymerisation – 7.1 Warum erscheinen Stoffe farbig? – 7.2 Molekülstruktur und Farbe ... <p>Anzahl: 3</p>	
und		Anzahl: 0
Chemie heute Qualifikationsphase Schroedel Verlag, 2014	<ul style="list-style-type: none"> – Redoxreaktionen und Redoxreihe – Galvanische Zellen – Spannung nur bei Kombination – Immer der Reihe nach – elektrochemische Spannungsreihe – Konzentrationsabhängigkeit des Elektrodenpotentials – Batterien – mobile Energiequellen – Akkumulatoren – immer wieder frisch geladen – Lithium-Ionen-Akkumulatoren – Brennstoffzellen – Energie am laufenden Band – Elektrolysen – erzwungene Redoxreaktionen – So viel Spannung muss sein – Zersetzungsspannung – Elektrolysen – quantitativ betrachtet – Technisch wichtige Elektrolysen – Korrosion – Redoxreaktionen auf Abwegen – Korrosionsschutz – Galvanotechnik – nicht nur für den Korrosionsschutz 	<ul style="list-style-type: none"> – Mg, Fe, Au werden mit $\text{HCl}_{\text{verd.}}$ versetzt – Kupferabscheidung im Labor – Redoxreihe – Unedler und edler Charakter von Metallen – Aufbau galvanischer Zellen: Daniell-Zelle – Von der Redoxreihe zur Spannungsreihe der Metalle – Erweiterung der Spannungsreihe – Konzentrationsabhängigkeit von Elektrodenpotentialen – Bestimmung von Elektrodenpotentialen gegen Silber-/Silberchlorid-Halbzelle – Zink-Kohle-Batterie – Aufbau einer kommerziellen Zink-Kohle-Batterie – Zink-Silberoxid-Batterie und Silber-Zink-Akku – Elektrolyse – elektrisch erzwungen – Elektrolyse und Zersetzungsspannung

Schulbuch	Themen	Experimente
		<ul style="list-style-type: none"> – Elektrolyse einer Zinkchlorid-Schmelze – Elektrolyse – Elektrodenmaterial und Überspannung – Wasserzerlegung – quantitativ – Korrosion und Korrosionsschutz von Eisen – Erzeugen und Einfärben einer Oxidschicht (Eloxalverfahren) – Verzinken eines Eisenblechs – Überzug aus Messing – Silberschrift auf einem Kupferblech
	Anzahl: 16	Anzahl: 22
Chemie 2000+ Einführungsphase C. C. Buchner Verlag, 2012 und Chemie 2000+ Qualifikationsphase C. C. Buchner Verlag, 2014	<ul style="list-style-type: none"> – Der Treibhauseffekt (<i>fakultativ</i>) – Photosmog – Stoffkreisläufe in der Troposphäre – 3 mm Ozon – der Filter für das Leben – Das biochemische 1*1 – Der Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur – Modellexperiment zum Kreislauf Photosynthese – Zellatmung – Stoffkreisläufe im Reagenzglas – Nachwachsende Rohstoffe – Nährstoffbilanz des Bodens und Düngung 	<ul style="list-style-type: none"> – 41 Modellversuch zum Traubhauseffekt – Ozon-Herstellung und Nachweise – Ozon-Nachweis beim Fotokopierer – Modellversuch zum Photosmog – Versuchsreihe aus drei Versuchen zur Photosynthese – Versuchsreihe aus 5 Versuchen zum Modellexperiment Photo-Blue-Bottle PBB
	<ul style="list-style-type: none"> – Halbleiter in Solarzellen – Aus Licht wird Strom – Photogalvanische Zellen – Hart oder weich, plastisch oder elastisch? – Radikalische Polymerisation – Radikalische Substitution – Andere Radikale, andere Produkte – Radikalkettenreaktion in Umwelt und Technik – Energiestufenmodell zur Lichtabsorption und Lichtemission – Wie entstehen Leuchtfarben? – Fluoreszenz und Phosphoreszenz (<i>fakultativ</i>) – Farbstoffe für Analytik und Solarzellen – Angeregte Zustände in künstlichen Lichtquellen – Organische Photovoltaizellen OPV – Nachhaltigkeit durch Solarenergienutzung – Photochromie und molekulare Schalter – Chamäleon-Farben³⁴ 	<ul style="list-style-type: none"> – Photogalvanische 2-Topf-Zelle – Photogalvanische 1-Topf-Zelle – Photogalvanische Kompaktzelle – Erwärmung von Kunststoff mit der Infrarotlampe – Bromierung von Heptan bei Blaulicht und bei Rotlicht – Versuchsreihe mit vier Versuchen zur Herstellung von Leuchtfarben – Herstellung: Fluoreszenzkollektoren aus Plexiglas[®] – Wirksamkeit in Solarzellen – Echtfarben-Emissionsspektren – Anthocyane als Photosensibilisatoren in Solarzellen – Versuchsreihe mit drei Versuchen zur Photochromie mit Spiropyran – Herstellung der intelligenten Folie

Schulbuch	Themen	Experimente
	<ul style="list-style-type: none"> – Intelligente Folie und photostationäres Gleichgewicht (fakultativ) – Die Umgebung macht's – das Phänomen der Solvatochromie – Carotinoide – Biochrome mit multiplen Funktionen – β-Carotin – ein Multitalent – Ein Fall für zwei: β-Carotin und Chlorophyll bei der Photosynthese – Sonnenlicht und Sonnenschutzmittel – knackig braun – immer gesund? – Nano-Titandioxid – UV-Absorber und Photokatalysator – Nicht nur Deckweiß – Farben durch Lichtabsorption – Warum sehen wir Blattgrün grün? <p>Anzahl: 34</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Versuchsreihe mit zwei photochemischen Versuchen zu β-Carotin – Fluoreszenzlöschung von Chlorophyll durch β-Carotin – Photochemischer Abbau von Chlorophyll und Photoprotektion durch β-Carotin – Versuchsreihe mit drei Versuchen zu Sonnenschutzmittel – Versuchsreihe mit vier Versuchen zu Photokatalysatoren <p>Anzahl: 41</p>
	<ul style="list-style-type: none"> – Wenn Elektronen Partner wechseln... – Das Donator-Akzeptor-Konzept bei Redoxreaktionen – Energiebilanz bei Redoxreaktionen (fakultativ) – Metalle – unterschiedlich gut oxidierbar – Redoxreihe der Metalle – Strom aus Redoxreaktionen – Das DANIELL-Element – Mehr oder weniger Spannung – Redoxpotential – Edle und unedle Metalle – Standardpotential und Spannungsreihe der Metalle – Redoxpaare der Halogene – Erweiterung der Spannungsreihe – Kompetenz erwerben: Messwerte recherchieren und im Hinblick auf Zusammenhänge analysieren und Ergebnisse verallgemeinern – Kompetenz erwerben: Anwenden der Spannungsreihe zur Formulierung von Voraussagen über den Ablauf von Redoxreaktionen ... – Weitere Redoxpaare (fakultativ) – Stromleitung in Lösungen und Metallen – Ionen und Elektroden: Ladungsträger in Lösungen und Metallen – Stromleitung in Halbleitern (fakultativ) 	<ul style="list-style-type: none"> – Metallblech in Bunsenbrennerflamme – Magnesiumpulver von schräg oben in die Brennerflamme – Eisenwolle mit Wasser/Chlorwasser/ Bromwasser im Abzug – Entfettete Kupfermünze in Silbernitrat-Lösung – Eisennagel in Oethel'sche-Lösung – Kupfersulfat-Lösung plus Zinkpulver – Silbernitrat-Lösung plus Kupferspäne – Zitronenbatterie – „Strom aus der Petrischale“ – Galvanische Zelle mit Kupfer und Zink – Kombination von 4 Halbzelle – Galvanische Zelle in Petrischalen – Galvanische Zelle mit Kupfer und Blei – Metalle mit Salzsäure in Reagenzgläsern – Zink (Zinksulfat)/Platin (Salzsäure) – Präparation einer Petrischale und Elektrolyse und galvanische Messung – Kaliumhalogenid-Lösungen mit Brom- oder Chlorwasser – Elektrolyse im U-Rohr

Schulbuch	Themen	Experimente
	<ul style="list-style-type: none"> – Halbleiter in Solarzellen (<i>fakultativ</i>) – Aus Licht wird Strom Photogalvanische Zellen (<i>fakultativ</i>) – Die Konzentration macht's – Konzentrationszellen – Redoxpotentiale sind berechenbar – Die NERNST-Gleichung – Kompetenz erwerben: Berechnen von Potenzialen und Ermitteln von Ionenkonzentrationen mithilfe der NERNST-Gleichung – Potentiometrische Konzentrationsbestimmung (<i>fakultativ</i>) – 150 Jahre jung – Die Taschenlampenbatterie – Moderne Batterien (<i>fakultativ</i>) – Akku leer? Laden! – Der Bleiakkumulator – Weiterentwicklung der Akkumulatortechnik (<i>fakultativ</i>) – Trendsetter Lithium-Ionen-Akkus (<i>fakultativ</i>) – Zur Nutzung gezähmt: die Knallgasreaktion – Brennstoffzellen – Wasser unter Strom – Elektrolyse und Faraday-Gesetze – Elektrolysen in der Metallurgie (<i>fakultativ</i>) – Das Donator-Akzeptor-Konzept – Vom Kochsalz zum Chlor – Die technische Chlor-Alkali-Elektrolyse – Wenn der Rost alles frisst – Korrosion von Metallen – Schutz vor Korrosionsschäden – Kompetenz trainieren – Grundwissen 	<ul style="list-style-type: none"> – Messung der Redoxpotentiale der Halogene in Petrischalen – Anfertigen einer Druckplatte – Abmessung des Standardpotentials von $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ – Untersuchung von ferro sanol® – An Siliciumscheibe Spannung anlegen – Zinkiodid mit Grafitelektroden, Anlegen einer Spannung und Temperaturerhöhung – An Wolframdraht Spannung anlegen – Photogalvanische 2-Topf-Zelle – Photogalvanische 1-Topf-Zelle – Photogalvanische Kompaktzelle – Konzentrationszelle aus zwei Zink-Halbzellen – Zinkstab in Wasser mit überbeschichtetem festen Zinksulfat – Elektrodenpotentiale verschiedener Silber-Halbzellen – Konzentrationszelle aus zwei Silber-Halbzellen – Bestimmung der Nickel-Ionenkonzentration in der Wasserprobe – Bestimmung der Chrom-Ionenkonzentration in der Wasserprobe – Silber-Konzentrationszelle bei Zugabe von festem Natriumchlorid – Elektrolyse und galvanische Messung mit unterschiedlich konzentrierter Salzsäure-Lösung – Versuchsreihe mit drei Versuchen zur Batterie – Modellversuch zur Zink-Luft-Zelle – Modell-Bleiakkumulator – Modellversuch: Lithium-Ionen-Akku – Versuch zur Elektrolyse – Vereinfachte Brennstoffzelle – HOFMANN'sche Wasserzersetzungsapparat – Elektrolyse von Natriumchlorid im U-Rohr – Versuchsreihe mit vier Versuchen zum Thema <i>Korrosion</i> – Versuchsreihe mit zwei Versuchen zur Untersuchung der Wirkung von Korrosionsschutzmaßnahmen
	Anzahl: 47	Anzahl: 52

Schulbuch	Themen	Experimente
Elemente Chemie Oberstufe Ernst Klett Verlag, 2015	<ul style="list-style-type: none"> –4.6 Kohlenstoffkreislauf –4.12 Erneuerbare Energiequellen –5.2 Pflanzenwachstum und Düngung –7.21 Energiespeicherung –8.6 Exkurs Radikalische Substitution –9.7 Reaktionsmechanismen im Vergleich –11.10 Exkurs Die Farbstoff-Solarzelle –11.1 Farbstoffe und Farbigkeit –11.2 Licht und Farbe –11.3 Kalorimetrie und Fotometrie –11.4 Struktur und Farbe –11.6 Farbstoffklassen <p>Anzahl: 7</p>	<ul style="list-style-type: none"> –Bromierung von Heptan –Bromierung von Toluol –Herstellung einer Farbstoff-Solarzelle <p>Anzahl: 3</p>
	<ul style="list-style-type: none"> –Mobile Energiequellen –Oxidation und Reduktion –Oxidationszahlen –Impulse Redoxgleichungen –Praktikum Redoxtitration –Die Redoxreihe –galvanische Elemente –Die elektrochemische Spannungsreihe –Ionenkonzentration und Spannung –Die Nernst-Gleichung –Exkurs Bestimmung extrem kleiner Konzentrationen –Impuls Berechnung einer Potenzialdifferenz –Elektrolysen in wässrigen Lösungen –Quantitative Betrachtung der Elektrolyse –Gewinnung von Zink –Gewinnung von Aluminium –Batterien –Praktikum Primärelemente –Akkumulator –Brennstoffzellen –Energiespeicherung –Praktikum Brennstoffzellen –Korrosion und Korrosionsschutz –Praktikum Korrosion und Korrosionsschutz 	<ul style="list-style-type: none"> –Oxidation von Fe^{2+}-Ionen –Reduktion von Fe^{3+}-Ionen –Bromwasser zu Kupferpulver –Bromdampf und Magnesiumband –Kaliumpermanganat und verd. Schwefelsäure und Natriumsulfitlösung –verd. Kaliumpermanganatlösung mit Natronlauge und Wasserstoffperoxid –Titration einer Oxalsäurelösung –Bestimmung von Sauerstoff in einer Gewässerprobe –Eisennagel in Kupfersulfatlösung –Metalle in Sulfatlösungen –Metalle in verd. Salzsäure –Kupfer- und Zinkblech in Zinksulfatlösung –Messung des Standardpotentials im U-Rohr –Konzentrationselemente –Kupfer-Grafit-Element –wässrige Lösung von Zinkchlorid wird an Grafit Elektroden elektrolysiert –Hoffmann-Zersetzungsapparat –Elektrolytzellen: Silbernitratlösung und Silberelektrode/ Kupferelektrode) –Volta-Element –Leclanche-Element –Bleiplatten in Schwefelsäure –Knallgaszelle –Zinkstab in verd. Schwefelsäure –Rosten von Eisen –Eisen-Sauerstoff-Element

Schulbuch	Themen	Experimente
		<ul style="list-style-type: none"> – Rostbildung unter einem Salzwassertropfen – Rostbildung an Lokalelementen – Korrosionsschutz von Metallüberzügen – Kathodischer Korrosionsschutz
	Anzahl: 24	Anzahl: 29
Chemie Oberstufe Cornelsen Verlag, 2017	<ul style="list-style-type: none"> – Chemisches Gleichgewicht – UV und VIS-Spektroskopie – Alkane – radikalische Substitutionsreaktion – Substitutionsreaktion an Alkylbenzolen – Belastung der Atmosphäre – Physiologie. Bedeutung der Glucose im Stoffwechsel – Farbigkeit und Molekülstruktur – Pigmente – Lackfarben – Dispersionsfarben – Licht und Farbe 	<ul style="list-style-type: none"> – Bromierung von Heptan – Fluoreszenz von Pflanzensäften, Chlorophyll und Waschpulver – Fluoreszenz von Fluorescein – Phosphoreszenz
	Anzahl: 7	Anzahl: 4
	<ul style="list-style-type: none"> Elektrolyte – Echte Elektrolyte – Potenzielle Elektrolyte – Starke und schwache Elektrolyte – Elektrolytische Leitfähigkeit Elektrodenpotenzial: – Elektrochemische Elektrode – Galvanische Zelle – Standard-Elektrodenpotenzial – Geschichte: Galvanische Zellen – Zellspannung von galvanischen Zellen – Richtung elektrochemischer Reaktion Mobile elektrochemische Spannungsquelle – Primärzellen – Umwelt: Moderne Brennstoffzellen – Sekundärzellen Elektrochemische Korrosion – Technik: Korrosion Elektrolyse – Elektrolyse in wässriger Lösung – Faraday'sche Gesetze – Technische Elektrolysen in wässriger Lösung – Schmelzflusselektrolyse zur Aluminiumherstellung – Komplex gedacht 	<ul style="list-style-type: none"> – Leitfähigkeit von Salzen – Leitfähigkeitsänderung beim Lösen von Ionensubstanzen – Konzentrationsabhängigkeit des Elektrodenpotenzials – Temperaturabhängigkeit des Elektrodenpotenzials – Verlaufsrichtung elektrochemischer Reaktionen – Bildung einer Wasserstoff-Sauerstoff-Zelle – Funktionsweise eines Bleiakкумуляtors – Korrosion durch Lokalelementbildung – Lokalelementbildung und Reaktionsgeschwindigkeit – Korrosion und Korrosionsschutz – Korrosionsschutz durch „Feuerverzinkung“ – Elektrolyse einer Zinkchloridlösung – Elektrolyse von Wasser – Elektrolyse einer Natriumchloridlösung – Elektrolyse einer Kupfer(II)-sulfatlösung an Kupferelektroden (Kupferbäumchen)
	Anzahl: 19	Anzahl: 14

9.2 Transkriptionszeichen

Pause		
Pausen	(.)	Mikropause
	(2.0)	Geschätzte Pausen in Sekunden
Sprachklang		
Dehnung	: :: :::	Je nach Länge der Dehnung untersch. viele Doppelpunkte
Verzögerungssignale	äh; öh	
Lachen	hahaha; hehe ...	
Rezeptionssignale	hm; nee; aha ...	
	ja=a, nei=en	zweisilbig
Akzentstellen	akZENT	
	Ak!ZENT!	extra stark
Zeichensetzung		
Zeichensetzung	.	
Aufzählung	,	
Frage	?	
Wörtliche Rede	„“	
Sonstige Regeln		
Handlungen/Ereignisse	((schnieft)); ((hustet))	
Name	Fach <i>Chemie</i>	
Interpretierende Kommentare	<<empört>> ; <<erstaunt>>; <<zögernd>>	
Verständlichkeit	()	unverständliche Passagen
	(uv3)	geschätzte Länge der unverständlichen Passagen in Sekunden
	(sicher); al(s)o	nicht mit Sicherheit identifizierbare Wortlaute oder Silben
	z.B. welche/solche	mögliche Alternativen, zwischen denen nicht sicher entschieden werden kann
	...	Unbedeutende Passagen

9.3 Transkriptionsköpfe – Informationen zu den Interviews

Projekt¹⁷⁵	Erfassung der Lehrerperspektive auf die Photochemie
Interview-Nr.	I01
Name der Audiodatei	HG_I01
Ort der Aufnahme	Schule in Dortmund
Dauer der Aufnahme	12:37 Minuten
Befragte Person	Lehrperson K
Interviewer	Yasemin Yurdanur (I)
Besonderheiten	K unterrichtet momentan einen Grundkurs Chemie. 3 der Schülerinnen und Schüler haben Chemie als drittes, schriftliches Abiturfach.
Interview-Nr.	I02
Name der Audiodatei	MG_I02
Datum der Aufnahme	07.04.2017
Ort der Aufnahme	Schule in Neuss
Dauer der Aufnahme	25:03 Minuten
Befragte Person	Lehrperson B
Interviewer	Yasemin Yurdanur (I)
Besonderheiten	B unterrichtet momentan zwei Grundkurse Chemie. Ein Schüler hat Chemie als drittes, schriftliches Abiturfach, und ein Schüler hat es als viertes, mündliches Abiturfach.
Interview-Nr.	I03
Name der Audiodatei	GT_I03
Ort der Aufnahme	Schule in Paderborn
Dauer der Aufnahme	18:52 Minuten
Befragte Person	Lehrperson H
Interviewer	Yasemin Yurdanur (I)
Interview-Nr.	I04
Name der Audiodatei	GT_I04
Ort der Aufnahme	Schule in Paderborn
Dauer der Aufnahme	18:52 Minuten
Befragte Person	Lehrperson S
Interviewer	Yasemin Yurdanur (I)

¹⁷⁵ Die Kopfzeile wurde in Anlehnung an [366] erstellt.

9.4 Arbeitsmaterialien

9.4.1 Arbeitsblätter

Sek. I Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft?

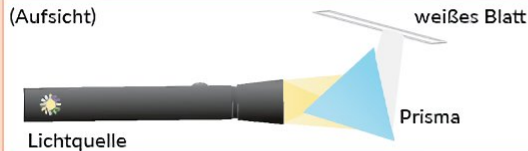
benötigtes Vorwissen

Einstieg und Teil 1: kein Vorwissen benötigt

Teil 2: einfaches Teilchenmodell aus dem Chemie-Anfangsunterricht

Hinweise zur Vorbereitung der Experimente unter http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/lehre/article_supplements/chemkon_se_2017/

Einstieg: Licht - eine Energieform



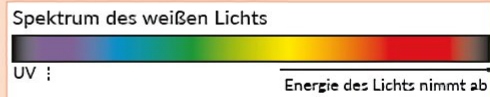
Experiment

Betrachte einen schmalen Strahl aus a) Sonnenlicht, b) weißem, c) grünem, d) rotem, e) blauem und f) violetterem Licht einer Taschenlampe durch ein Prisma (siehe Abbildung). Notiere deine Beobachtungen.

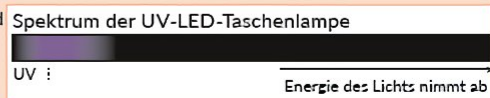
A1 Ergänze den Lückentext mit folgenden Begriffen:

Weiβes Licht, grünes, rotes, Rotes Licht, Violett, Farben, Prismas, Regenbogens, Energieform, energiereicher, energieärmer, Spektralfarben, Spektrum, UV-LED-Lampe

_____ lässt sich mithilfe eines _____ in alle _____ des _____ zerlegen. Die _____ des weißen Lichts setzen sich wie rechts dargestellt zusammen. Licht ist eine _____.



Violettes Licht ist _____ als _____ Licht und _____ Licht.



_____ ist _____ als grünes. Die _____ strahlt Licht aus, in dessen _____ alle Farben außer _____ fehlen.

Farbe - Teil 1

Experiment: Betrachte die Blattgrünextrakt-Lösung und die β -Carotin-Lösung im Tageslicht und im Dunkeln bei Bestrahlung mit einer UV-LED- und einer grünen LED-Taschenlampe. Notiere deine Beobachtungen.

Beobachtete Farben:

Lampe	Tageslicht	grünes Licht	UV-Lampe
Blattgrün			
β -Carotin			

Weitere Experimente online: „Weinender Kastanienzweig“ und „Leuchtende Textmarker“.



A2 Bezeichne die Aussagen mit Wahr oder falsch und begründe mit deinen Beobachtungen:

- Die Farbe, in der wir einen Stoff sehen, hängt nicht von dem Licht ab, das auf den Stoff fällt.
- Im Sonnenlicht zeigen Stoffe durch **Absorption** von Licht nur **Farben**, die im Sonnenlicht enthalten sind.
- Im Licht der UV-LED-Lampe erzeugen Stoffe durch **Emission** von Licht nur **Leuchtfarben (Fluoreszenz)**, die im Licht der UV-LED-Lampe enthalten sind.
- Leuchtfarben entstehen, indem Stoffe energie-reicheres Licht in energieärmeres umwandeln.

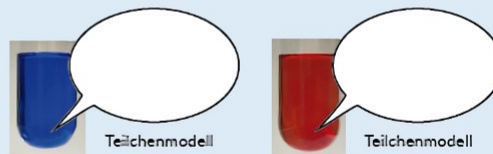
Farbe - Teil 2

Experiment: Bestrahle jede der drei Lösungen 1 min lang mit einer UV-LED-Taschenlampe. Notiere die Farben der Lösungen gleich nach der Bestrahlung.

Farben der Lösungen:

Xylol-Lösung	Aceton-Lösung	Ethanol-Lösung

A3 Unmittelbar nach der Bestrahlung liegt in allen drei Lösungen der gleiche Stoff, Merocyanin, gelöst vor. Er wurde durch Zufuhr von Lichtenergie gebildet. Zeichne Teilchenmodelle für die beiden abgebildeten Lösungen. Verwende für die Teilchen Kreise, die du mit Buchstaben M, X, A und E kennzeichnest.



A4 Beobachte die Farben der drei Lösungen 3 min nach dem Ausschalten der Lampe. Nenne die Unterschiede und entwickle eine Vermutung für ihre Erklärung.

A5 „Die Farbe eines Stoffes ist eine charakteristische (unveränderliche) Eigenschaft des Stoffes.“ Beurteile diese Aussage, indem du die Ergebnisse der Experimente und der Auswertungen von dieser ganzen Seite

Sek. I

Photo-Blue-Bottle

Ein Modellexperiment für Stoff- und Energieumsätze

benötigtes Vorwissen → Oxidation als Sauerstoffaufnahme (und Reduktion) | Luftzusammensetzung | Reaktionsschemata | Photosynthese (Biologie)

Das Photo-Blue-Bottle-Experiment

E1 Untersuche mit den dir bereitgestellten Geräten (Heizplatte, Taschenlampe mit Farbwechsel, UV-Taschenlampe), mit welchen Energieformen (Wärme, Licht) du eine Stoffumwandlung (chemische Reaktion) in dem Schraubdeckelglas antreiben kannst. Dabei solltest du die Bildung eines blauen Stoffes in der gelben Lösung beobachten. Dokumentiere deine Beobachtungen mithilfe der Tabelle.

Hinweis: Lichtfarben des sichtbaren Spektrums

Energieform	Farbe/Temperatur	Beobachtung

Photo-Blue-Bottle: G → B

Photo-Blue-Bottle: B → G

E2 Bewerte die folgenden Aussagen mit W(ahr), f(alsch) oder U(nsicher). Begründe mit Hilfe von experimentellen Beobachtungen. Plane Experimente, mit denen es möglich ist die mit U bewerteten Aufgaben zu klären.

Die Reaktion Gelb(e Lösung) → Blau(e Lösung) ...

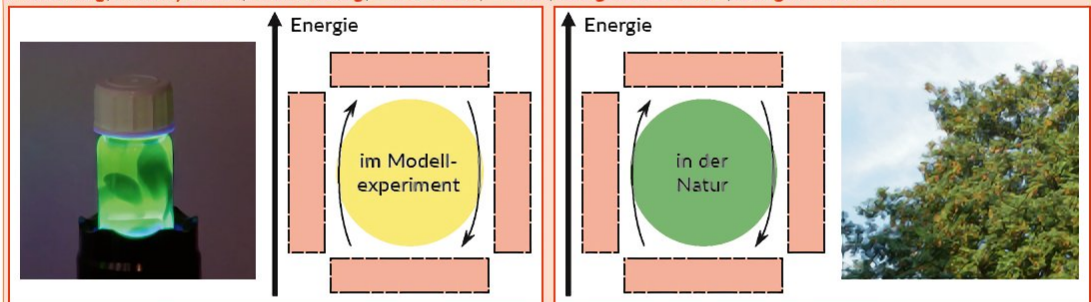
- ... benötigt Energiezufuhr.
- ... funktioniert mit jeder Farbe aus dem sichtbaren Licht.
- ... findet nicht statt, wenn keine Luft über der Lösung ist.
- ... läuft nur bei Temperaturen über 5 °C ab.
- ... verläuft unter Freisetzung von Energie.
- ... benötigt keine Luft.

Die Reaktion Blau(e Lösung) → Gelb(e Lösung) ...

- ... verläuft durch einfaches Schütteln.
- ... verläuft auch, wenn keine Luft über der Lösung ist.
- ... läuft **nicht** bei Energiezufuhr in Form von Licht ab.
- ... benötigt Luft.
- ... verläuft unter Freisetzung von Energie.
- ... benötigt nur den Sauerstoff aus der Luft.

Auswertung: Von Photo-Blue-Bottle zur Photosynthese

A1 Die Reaktionszyklen Gelb → Blau → Gelb im Photo-Blue-Bottle-Experiment sind ein Modell für den natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung. Ergänze die Rechtecke in der Abbildung mit folgenden Begriffen: **gelbe Lösung, Zellatmung, Photosynthese, blaue Lösung, + Sauerstoff, + Licht, energiereiche Stoffe, energiearme Stoffe**



A2 Entscheide und begründe, welche der Pfeile in den Abbildungen von A1 eine Oxidation und welche eine Reduktion darstellen.

A3 Gib Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modellexperiment und dem natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung an.

A4 Beurteile das Modellexperiment, indem du Vor- und Nachteile nennst.

Für besonders Schnelle:

A5 Nenne alle Energieformen, die du bisher in den naturwissenschaftlichen Fächern kennengelernt hast. Gib eine Einsatzmöglichkeit und die Funktion der jeweiligen Energieform an.

Photo-Blue-Bottle

Ein Modellexperiment für Stoff- und Energieumsätze

Luftzusammensetzung Reaktionsschemata

Photosynthese (Biologie)

Sek. I

benötigtes Vorwissen

Oxidation als Sauerstoffaufnahme (und Reduktion)

Das Photo-Blue-Bottle-Experiment

Auswertung A

A1 Ergänze die rechteckigen Felder in der Abbildung mit folgenden Begriffen:

gelbe Lösung, Zellatmung, Photosynthese, blaue Lösung, + Sauerstoff, + Licht, energiereiche Stoffe, energiearme Stoffe



A2 Entscheide und begründe welche der Pfeile in der Abbildung eine Oxidation und welche eine Reduktion darstellen.

A3 Gib Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem Modellexperiment und dem natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung an.

Für besonders Schnelle:

A4/B3 Nenne alle Energieformen, die du bisher in den naturwissenschaftlichen Fächern kennengelernt hast. Gib eine Einsatzmöglichkeit und die Funktion der jeweiligen Energieform an.

Auswertung B

B1 Ergänze die Lücken mit folgenden Begriffen:

Energie, Modellexperiment, Zucker, gelbe, freiwerdende, Oxidation, Energieumwandlung, energiearme, energiereiche, Lichtenergie, Rückreaktion, Zellatmung, energiereichen

Die Photosynthese ist sowohl ein Prozess der

..... als auch der Stoffumwandlung:

..... wird in chemische umgewandelt.

..... Stoffe (Kohlenstoffdioxid, Wasser)

werden unter Freisetzung von Sauerstoff in energiereiche

(.....) umgewandelt.

Im wird durch Lichtenergie die ener-

giearme, gelbe Lösung in die, blaue

Lösung umgewandelt. Die

findet durch Schütteln statt: Die blaue Lösung wird durch

(Sauerstoffaufnahme) wieder in

die Lösung umgewandelt. Die in der

blauen Lösung gespeicherte

wird freigesetzt. Diese Umwandlung modelliert die natürliche

Die Energie

aus den Stoffen brauchen Lebewe-

sen und Pflanzen um z.B. zu wachsen.

B2 Beurteile das Modellexperiment, indem du Vor- und Nachteile nennst.

Sek. II (Bio & Ch)

benötigtes Vorwissen → Photosynthese (Bio, Sek. I)

Photo-Blue-Bottle

Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur

Energiefluss und Stoffkreisläufe (Bio, Sek. I)

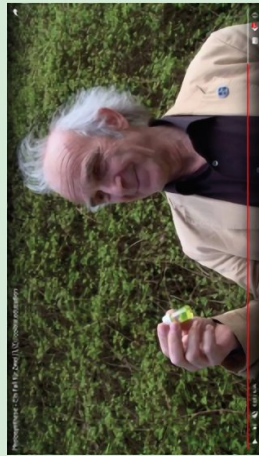
Reaktionsschemata (Chemie, Sek. I)

Photosynthese (Bio, Sek. II)

P(hoto)-B(lue)-B(ottle)-Experiment

Auswertung A

A1



Erklären Sie mit Hilfe des Lehrfilms „Photosynthese – Ein Fall für Zwei – Teil 1“ den Vorgang des Farbwechsels der Lösung und beschreiben Sie die Energieumwandlung innerhalb eines Reaktionszyklus Gelb → Blau → Gelb.

A2 Erläutern Sie, warum das PBB-Experiment* ein Modellexperiment* für den natürlichen Kreislauf Photosynthese*/Zellatmung* ist.

A3 Beurteilen Sie das Modellexperiment PBB im Hinblick auf seine Qualität und Grenzen der Veranschaulichung des natürlichen Kreislaufs Photosynthese/Zellatmung.

Zusatz für den Biologieunterricht:

A4 Reduzieren Sie die in dem Lehrfilm (und in der Auswertung aus B1) aufgeführten Kreisläufe so weit, dass das Modellexperiment auch in der Unterstufe im Biologieunterricht eingesetzt werden kann. Hilfreiche Begriffe: energiearme/energiereiche Stoffe, Licht, Photosynthese, Zellatmung, Sauerstoff, gelbe/blau Lösung.

E1 Untersuchen Sie mit den Ihnen bereitgestellten Geräten (Heizplatte, Taschenlampe mit Farbwechsell, UV-Taschenlampe), wie Sie im Schraubdeckelglas eine Stoffumwandlung antreiben können. Diese wird durch die Bildung eines blauen Stoffes in der gelben Lösung sichtbar.



Hinweis: Lichtfarben des sichtbaren Spektrums

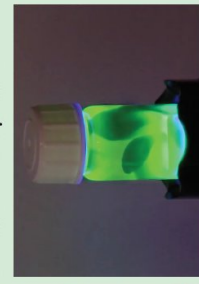


E2 **W**ahre oder **F**alsche Aussage? Überprüfen Sie Ihre Entscheidungen jeweils, wenn möglich, experimentell oder schlagen Sie ein Experiment vor.

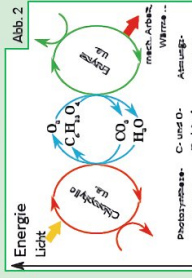
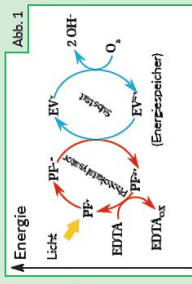
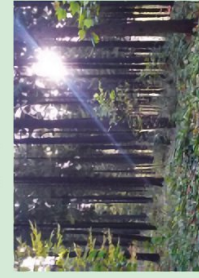
- Die Reaktion Gelbe Lösung → Blau(e Lösung) benötigt Energiezufuhr.
- Die Reaktion Gelb → Blau funktioniert nicht mit Licht jeder Farbe aus dem sichtbaren Spektrum.
- Die Reaktion Blau → Gelb benötigt nur Bewegungsenergie.
- Der Reaktionszyklus Gelb → Blau → Gelb ist nur zweimal möglich.
- Die Reaktion Blau → Gelb benötigt Sauerstoff.
- Die Reaktionszyklen im Photo-Blue-Bottle-Experiment simulieren den natürlichen Kreislauf Photosynthese*/Zellatmung*.
- Die Reaktion Gelb → Blau läuft nur bei Temperaturen über 5 °C ab.

Auswertung B

B1 im Modellexperiment



in der Natur



Nennen Sie die sich entsprechenden Stoffe und Stoffkreisläufe beim PBB-Experiment* (Abb. 1) und beim natürlichen Kreislauf Photosynthese*/Zellatmung* (Abb. 2).

B2 Benennen Sie alle in den Zyklen vorkommenden Energieformen und beschreiben Sie die Energieumwandlung während eines Photosynthese/Zellatmung-Kreislaufs.

B3 Erläutern Sie, warum das PBB-Experiment ein Modellexperiment* für den natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung ist. Zeigen Sie Grenzen des Modellperiments auf.

Zusatz für den Biologieunterricht:

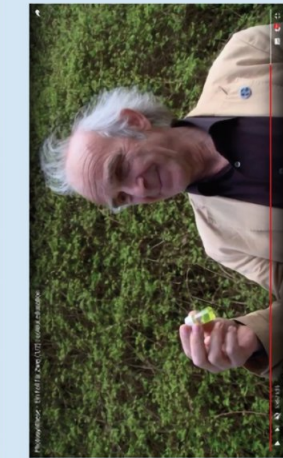
B4 Abb.2 ist eine mögliche Modelldarstellung für den natürlichen Kreislauf Photosynthese/Zellatmung. Entwickeln Sie diese unter Bezugnahme auf Ihre Erkenntnisse aus B3 weiter.

Sek. II

benötigtes Vorwissen → **galvanische Zelle** | Ein Modellexperiment zur Energieumwandlung und -speicherung in einer lichtgetriebenen Konzentrationszelle | **Konzentrationszelle** | Photosynthese (Biologie, Sek. I) | NERNST-Gleichung (nur für E3)

Photo-Blue-Bottle

PBB - Lehrfilmanalyse



L1

Recherchieren Sie im Lehrfilm „Ein Fall für Zwei - Teil1“ die sich entsprechenden Stoffe und Stoffkreisläufe beim PBB-Experiment und beim natürlichen Kreislauf Photosynthese* /Zellatmung* und unterscheiden Sie zwischen energiereichen und energiereichen Stoffen.

L2 Maßgeblich für die Konzentrationszelle ist das Verhältnis $\frac{d(EV^-)}{d(EV^+)}$ des Substrats. Skizzieren und beschriften Sie in Anlehnung an den Lehrfilm einen Versuchsaufbau zur photoelektrochemischen Konzentrationszelle*. Stellen Sie die Oxidations- und Reduktionsreaktion des Substrats dar.

L3 Beschreiben Sie den Vorgang der Energieumwandlung und -speicherung in der photoelektrochemischen Konzentrationszelle.

L4 Erklären Sie den Zusammenhang zwischen der galvanischen Zelle aus dem Lehrfilm und der Photosynthese.

Für besonders Schnelle:
L5|E5 Zeigen Sie Grenzen des Modellperiments* auf.

P(hoto)-B(lue)-B(ottle)-Basisexperiment

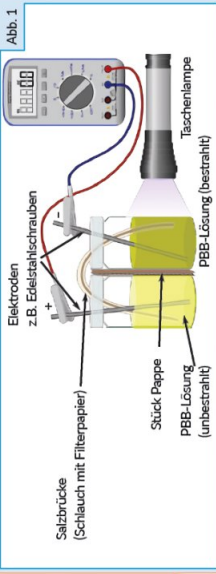
B1 Untersuchen Sie mit den Ihnen bereitgestellten Geräten (Heizplatte, Taschenlampe mit Farbwechsel, UV-Taschenlampe), wie Sie im Schraubdeckelglas eine Stoffumwandlung antreiben können. Diese wird durch die Bildung eines blauen Stoffes in der gelben Lösung sichtbar.



Inhalt:
3 Chemikalien (EV²⁺, PF⁺, EDTA⁻)
+ Wasser
+ Luft

PBB - Energieumwandlung und -speicherung

E1 Photoelektrochemische Konzentrationszelle*



Bauen Sie wie in Abb.1 das Experiment auf und schalten Sie die Lampe ein. Beobachten Sie 3 min die Färbung und die Spannung. Schalten Sie die Lampe aus und beobachten Sie weitere 3 min. Nennen Sie alle im Experiment vorkommenden Energieformen.

E2 Beim Spannungsaufbau läuft in Lösung folgende Reduktion ab: $EV^{2+} + e^- \xrightarrow{\text{Licht}} EV^+$. Maßgeblich für die Konzentrationszelle ist das Verhältnis $\frac{d(EV^+)}{d(EV^{2+})}$. Erläutern Sie unter Angabe von Reaktionsgleichungen die an den Elektroden stattfindenden chemischen Vorgänge in der Konzentrationszelle.

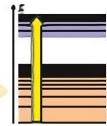
E3 In der Konzentrationszelle wird eine Spannung von 200 mV gemessen. Berechnen Sie $\frac{d(EV^+)}{d(EV^{2+})}$ in der bestrahlten Halbzelle ($\mu(EV^{2+}/EV^+) = -0,45 \text{ V}$). Nehmen Sie an, dass in der unbestrahlten Halbzelle gilt: $\frac{d(EV^+)}{d(EV^{2+})} = 10^{10}$. Vergleichen Sie die Konzentrationsverhältnisse $\frac{d(O_2)}{d(H_2)}$ in den beiden Halbzellen und begründen Sie den Unterschied.

E4 Das Experiment E1 funktioniert auch mit Sonnenlicht. Beurteilen Sie die Bezeichnung der PBB-Konzentrationszelle als „Solarakku“ und diskutieren Sie die gesellschaftliche Relevanz der Gewinnung und Speicherung elektrischer Energie aus Solarenergie.

Sek. II

Solvatochromie

Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Farbstoffs in verschiedenen Lösemitteln



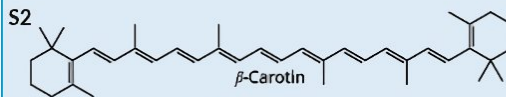
benötigtes Vorwissen	Zwischenmolekulare Wechselwirkungen	Chemisches Gleichgewicht	Energiestufenmodell	Spektrum und Lichtabsorption	Polarität	Molekülstruktur und Farbigkeit
----------------------	-------------------------------------	--------------------------	---------------------	------------------------------	-----------	--------------------------------

* vgl. Fachbegriffe und Materialien unter http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/lehre/article_supplements/chemkon_se_2017/

Einstiegsexperiment und Auswertungsaufgaben für alle Gruppen

Gruppe 1: Struktur - Farbigkeit

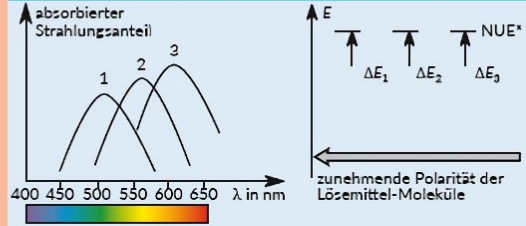
S1 Kennzeichnen Sie den Chromophor, die auxochromen* und antiauxochromen* Substituenten in den Strukturformeln von Spiropyran und Merocyanin. Begründen Sie, warum Spiropyran in Lösung farblos ist.



Das orange β -Carotin absorbiert blaues Licht ($\lambda_{max} = 444 \text{ nm}$) und das blaue Merocyanin gelbes Licht ($\lambda_{max} = 600 \text{ nm}$). Vergleichen Sie die Länge der Chromophore in den beiden Molekülen und erschließen Sie den Einfluss der Auxochrome auf die Lichtabsorption.

S3 Zeichnen Sie eine mesomere Grenzstruktur* zu dem angegebenen Merocyanin-Zwitterion und beurteilen Sie, welche der beiden Grenzstrukturen in einem polaren Lösemittel bevorzugt vorliegt.

Gruppe 2: Energiestufenmodell



E1 Ordnen Sie den drei Absorptionsmaxima* von Merocyanin die verwendeten Lösemittel zu und begründen Sie Ihre Entscheidung.

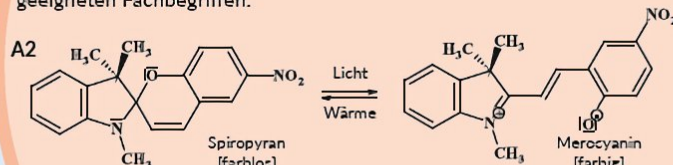
E2 Zeichnen Sie in das rechte Diagramm mithilfe von E1 die Höchste Besetzte Energiestufe HBE im Merocyanin-Zwitterion in den drei Lösungen ein.

E3 Recherchieren Sie die Begriffe bathochrome bzw. hypsochrome Verschiebung* und positive bzw. negative Solvatochromie*. Erklären Sie mit diesen Begriffen Ihre Beobachtungen.

Experiment

Lösen Sie in drei verschiedenen Reagenzgläsern jeweils 0,5 mg Spiropyran in je 5 mL Xylol, Aceton und Ethanol. Bestrahlen Sie jede Lösung 1 min lang mit einer violetten LED-Taschenlampe. Dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen. Stellen Sie dann die Proben an einen dunklen Ort.

A1 Geben Sie jeweils die Strukturen der drei Lösemittel-Moleküle an und vergleichen Sie die Polaritäten. Begründen Sie Ihre Feststellung mit geeigneten Fachbegriffen.



Geben Sie an, durch welche der folgenden Merkmale sich die Moleküle von Merocyanin und Spiropyran unterscheiden: *Summenformel, Polarität, Länge des Chromophors* und Planarität des Moleküls**.

A3 Stellen Sie eine Hypothese zur Erklärung der unterschiedlichen Farben der drei Lösungen auf.

N1 Skizzieren und benennen Sie die zwischenmolekularen Wechselwirkungen* zwischen Merocyanin-Zwitterionen und den jeweiligen Lösemittel-Molekülen.

N2 Betrachten Sie die Lösungen, die im Dunkeln gestanden haben, erneut und stellen Sie anhand der Farben fest, ob ausschließlich Spiropyran oder auch Merocyanin vorliegt. Erklären Sie die Beobachtungen mit Hilfe Ihrer Ergebnisse aus N1.

G1 Formulieren Sie eine allgemeine Gleichgewichtskonstante* für das Spiropyran-Merocyanin-Gleichgewicht.

G2 Im Dunkeln haben sich in den drei Lösungen inzwischen chemische Gleichgewichte* eingestellt. Schätzen Sie die Anteile des farbgebenden Merocyanins in Xylol und Ethanol und geben Sie anschließend eine größer-kleiner-Relation für die beiden Gleichgewichtskonstanten an.

G3 Messen Sie die Zeit, in der sich das chemische Gleichgewicht Spiropyran-Merocyanin in Xylol nach dem Ausschalten der LED-Lampe einstellt. Stellen Sie eine Hypothese auf, wie sich die Zeit bis zur Einstellung des Gleichgewichts bei 0 °C und bei 50 °C ändert und überprüfen Sie Ihre Hypothese experimentell.

N3 Formulieren Sie einen Je-Desto-Satz zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Polarität der Nano-Umgebung und der Stabilisierung des Merocyanin-Zwitterions.

Gruppe 3: Gleichgewicht

Gruppe 4: Nano-Umgebung

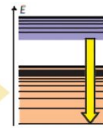
Absorbieren von *absorbere* (lat.): verschlingen, Emission von *emittere* (lat.): aussenden

Sek. II

Photolumineszenz

Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

benötigtes Vorwissen	Zwischenmolekulare Wechselwirkungen	Energiestufenmodell	Spektrum und Lichtabsorption	Molekülstruktur und Farbigkeit
----------------------	-------------------------------------	---------------------	------------------------------	--------------------------------



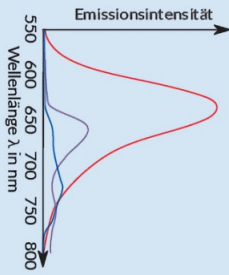
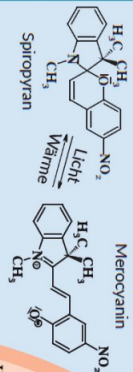
* vgl. Fachbegriffe und Materialien unter http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/lehre/article_supplements/chemkon_se_2017/

Gruppe L: Lumineszenz in Lösung

Einstiegsexperiment und Auswertungsaufgaben für alle Gruppen

Gruppe M: Lumineszenz in Matrix

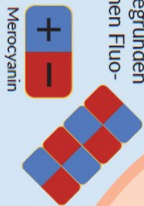
E2 Lösen Sie in drei verschiedenen Reagenzgläsern jeweils 5 mg Xylol, Aceton und Ethanol. Beobachten Sie jede der Lösungen 1 min lang im Dunkeln unter Bestrahlung mit UV-Licht und stellen Sie danach die Farben der Lösungen bei Tageslicht fest. Dokumentieren Sie alle Beobachtungen.



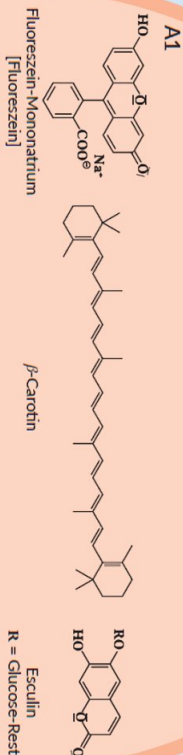
L1 Ordnen Sie die drei Emissionsspektren* von Merocyanin den verwendeten Lösemitteln zu und begründen Sie Ihre Entscheidung.

L2 Skizzieren und benennen Sie die zwischenmolekularen Wechselwirkungen zwischen Merocyanin-Zitterionen und den jeweiligen Lösemittel-Molekülen.

L3 Recherchieren Sie den Begriff Aggregation* und erklären Sie Ihr mithilfe des nebenstehenden Modells. Begründen Sie damit die unterschiedlichen Fluoreszenzintensitäten der drei Lösungen.



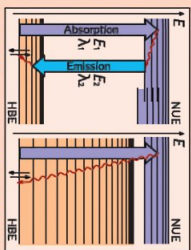
E1 Stellen Sie folgende Lösungen her:
 a) ca. 1 mg Fluorescein-Mononatriumsalz in 30 ml Wasser b) ca. 5 mg Esculin in 30 ml Wasser und c) den Inhalt einer β -Carotin-Kapsel in 30 ml Heptan. Bestrahlen Sie im Dunkeln die Lösungen mit einer violetten LED-Lampe und dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen.



Vergleichen Sie die strukturellen Merkmale der Moleküle und beurteilen Sie die intramolekularen Bewegungsmöglichkeiten (Schwingungen und Rotationen) in den Chromophoren* der Moleküle.

A2 Recherchieren Sie im Flash-Modul Ein Fall für Zwei* nach einer Erklärung, warum β -Carotin im Vergleich zu Chlorophyll nicht fluoresziert. Prüfen Sie, inwiefern diese Erklärung auch auf Ihre Beobachtungen aus E1 zutrifft.

A3 Vergleichen Sie die Energiestufendiagramme* und ordnen Sie diese begründet den β -Carotin-, Esculin- und Fluorescein-Molekülen zu.
 Hinweis: Die waagerechten Linien stellen die erlaubten Schwingungszustände des Moleküls innerhalb einer Energiestufe dar.



A4 Setzen Sie jeweils das richtige Zeichen „ $n >$ “ und „ $n <$ “ zwischen den folgenden Paare aus dem linken Energiestufendiagramm* von A3 und begründen Sie:

E_1 E_2 λ_1 λ_2

M3 Erklären Sie, warum eine kalte Probe länger phosphoresziert als eine warme Probe.
 M4 Deuten Sie die Funktion der Weinsäure in E3 unter Bezugnahme auf Ihre Beobachtungen.

E3 Geben Sie in zwei Rggl, je 5 g Weinsäure und erhitzen Sie vorsichtig über der rauschenden Brennerflamme. Sobald eine klare Schmelze vorliegt, werden a) 1 mg Fluorescein und b) 5 mg Esculin hinzugefügt. Verteilen Sie durch Schwenken und Drehen die Schmelze an der Innenwand und lassen Sie sie erstarren.
 Bestrahlen Sie die Probe im Dunkeln mit UV-Licht i) bei Raumtemperatur, ii) nach Abkühlen im Eisbad auf 0 °C, iii) nach Erwärmen im Wasserbad auf 70 °C und beobachten Sie diese beim und direkt nach Ausschalten der Lampe.

M1 Recherchieren Sie den Lehrfilm "Photolumineszenz"*. Ordnen Sie die Leuchterscheinungen aus E3 den Begriffen Fluoreszenz* und Phosphoreszenz* zu und zeichnen Sie je ein Energie-diagramm.

M2 Erklären Sie mithilfe Ihrer Lösung von M1, warum die durch Phosphoreszenz emittierten Photonen im Vergleich zu den durch Fluoreszenz emittierten bathochrom* verschoben sind.

9.4.2 Einzelarbeitsblätter

Sek I

Name: _____

Datum: _____

Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft ?!

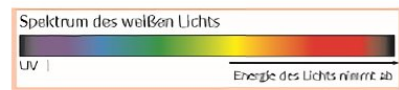
Einstieg: Licht – Eine Energieform

<p>(Aufsicht)</p>	<p>Experiment Betrachte einen schmalen Strahl aus a) Sonnenlicht, b) weißem, c) grünem, d) rotem, e) blauem und f) violetterm Licht einer Taschenlampe durch ein Prisma (siehe Abbildung). Notiere deine Beobachtungen.</p>
-------------------	---

Beobachtungen

A1 Ergänze den Lückentext mit folgenden Begriffen: *Weißes Licht, grünes, rotes, Rotes Licht, Violett, Farben, Prismas, Regenbogens, Energieform, energiereicher, energieärmer, Spektralfarben, Spektrum, UV-LED-Lampe*

..... lässt sich mithilfe eines in
 alle des zerlegen.



Die des weißen Lichts setzen sich wie
 rechts dargestellt zusammen. Licht ist eine



Violettes Licht ist als Licht und
 Licht. ist als grünes. Die

Strahlt Licht aus, in dessen alle Farben außer fehlen.

Sek I

Name: _____

Datum: _____

Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft ?!

Farbe – Teil 1

Experiment

Betrachte die Blattgrünextrakt-Lösung und die β -Carotin-Lösung im Tageslicht und im Dunkeln bei Bestrahlung mit einer UV-LED- und einer grünen LED-Taschenlampe. Notiere deine Beobachtungen.

Beobachtete Farben

	Tageslicht	UV-Licht	grünes Licht
Blattgrün			
β -Carotin			

A2 Bezeichne die Aussagen mit wahr oder falsch und begründe mit deinen Beobachtungen:

- Die Farbe, in der wir einen Stoff sehen, hängt nicht von dem Licht ab, das auf den Stoff fällt.
- Im Sonnenlicht zeigen Stoffe durch Absorption (Aufnahme) auf Licht nur Farben, die im Sonnenlicht enthalten sind.
- Im Licht der UV-LED-Lampe erzeugen Stoffe durch Emission (Ausstrahlen) von Licht nur Leuchtfarben (Fluoreszenz), die im Licht der UV-LED-Lampe enthalten sind.
- Leuchtfarben entstehen, indem Stoffe energiereicheres Licht in energieärmeres Licht umwandeln.

Weitere Experimente *online*

„Weinender Kastanienzweig“ und „Leuchtende Textmarker“.



Sek I

Name: _____

Datum: _____

Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft?!

Farbe – Teil 2

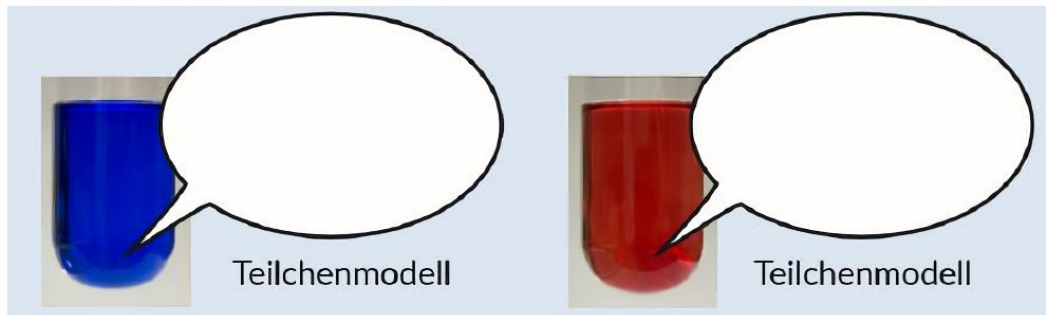
Experiment

Bestrahle jede der drei Lösungen 1 min lang mit einer UV-LED-Taschenlampe. Notiere die Farben der Lösungen gleich nach Bestrahlung.

Beobachtete Farben der Lösungen

Xylol-Lösung	Aceton-Lösung	Ethanol-Lösung

A3 Unmittelbar nach der Bestrahlung liegt in allen drei Lösungen der gleiche Stoff, Merocyanin, gelöst vor. Er wurde durch Zufuhr von Lichtenergie gebildet. Zeichne Teilchenmodelle für die beiden abgebildeten Lösungen. Verwende für die Teilchen Kreise, die du mit Buchstaben M, X, A und E kennzeichnest.

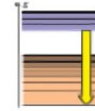


A4 Beobachte die Farben der drei Lösungen 3 min nach Ausschalten der Taschenlampe. Nenne die Unterschiede und entwickle eine Vermutung für Ihre Erklärung.

A5 „Die Farbe eines Stoffes ist eine charakteristische (unveränderliche) Eigenschaft des Stoffes.“ Beurteile diese Aussage, indem du all deine Ergebnisse der Experimente und der Auswertungen berücksichtigst.

Sek II Name: _____

Datum: _____

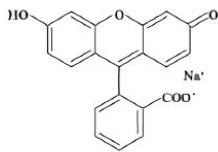


Photolumineszenz
Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

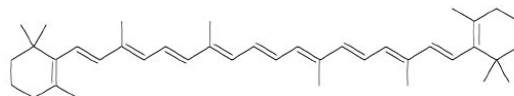
Einstiegsexperiment und Auswertungsaufgaben für alle Gruppen

E1 Stellen Sie folgende Lösungen her:
 a) ca. 1 mg Fluoreszein-Mononatriumsalz in 30 mL Wasser
 b) ca. 5 mg Esculin in 30 mL Wasser und
 c) den Inhalt einer β -Carotin-Kapsel in 30 mL Heptan.
 Bestrahlen Sie im Dunkeln die Lösungen mit einer violetten LED-Lampe und dokumentieren Sie Ihre Beobachtungen.

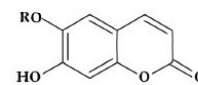
A1 Vergleichen Sie die strukturellen Merkmale der Moleküle und beurteilen Sie die intramolekularen Bewegungsmöglichkeiten (Schwingungen und Rotationen) in den Chromophoren* der Moleküle.



Fluoreszein-Mononatrium
[Fluoreszein]



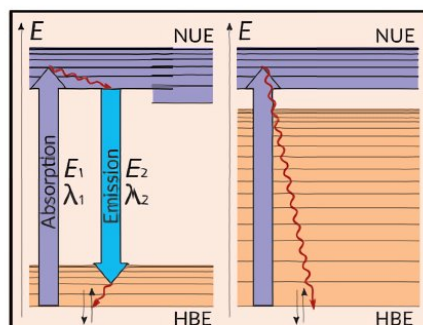
β -Carotin



Esculin
R = Glucose-Rest

A2 Recherchieren Sie im Flash-Modul *Ein Fall für Zwei** nach einer Erklärung, warum β -Carotin im Vergleich zu Chlorophyll nicht fluoresziert. Prüfen Sie, inwiefern diese Erklärung auch auf Ihre Beobachtungen aus E1 zutrifft.

A3 Vergleichen Sie die Energiestufendiagramme* und ordnen Sie diese begründet den β -Carotin-, Esculin- und Fluoreszein-Moleküle zu. *Hinweis:* Die waagerechten Linien stellen die erlaubten Schwingungszustände des Moleküls innerhalb einer Energiestufe dar.

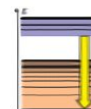


A4 Setzen Sie jeweils das richtige Zeichen „>“ und „<“ zwischen die folgenden Paare aus dem linken Energiestufendiagramm* von A3 und begründen Sie:

E_1 E_2 λ_1 λ_2

Sek II Name: _____

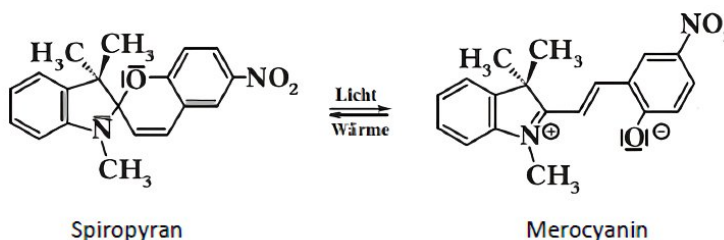
Datum: _____



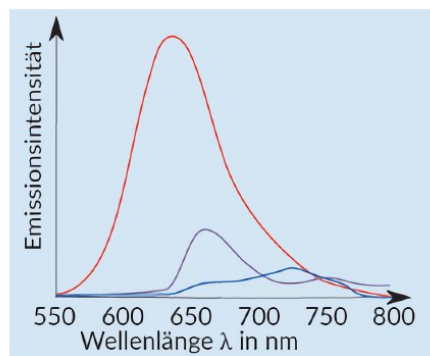
Photolumineszenz Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

Gruppe L: Lumineszenz in Lösung

E2 Lösen Sie in drei verschiedenen Reagenzgläsern jeweils 0,5 mg Spiropyran in je 5 mL Xylol; Aceton und Ethanol. Beobachten Sie jede der Lösungen 1 min lang im Dunkeln unter Bestrahlung mit UV-Licht und stellen Sie danach die Farben der Lösungen bei Tageslicht fest. Dokumentieren Sie alle Beobachtungen.

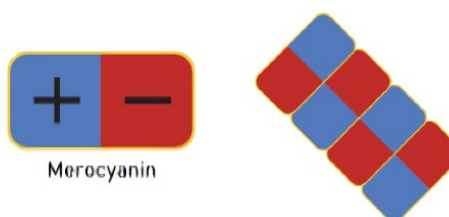


L1 Ordnen Sie die drei Emissionsspektren* von Merocyanin den verwendeten Lösemitteln zu und begründen Sie Ihre Entscheidung.



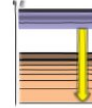
L2 Skizzieren und benennen Sie die zwischenmolekularen Wechselwirkungen zwischen Merocyanin-Zwitterionen und den jeweiligen Lösemittel-Molekülen.

L3 Recherchieren Sie den Begriff Aggregation* und erklären Sie ihn mithilfe des nebenstehenden Modells. Begründen Sie damit die unterschiedlichen Fluoreszenzintensitäten der drei Lösungen.



Sek II Name: _____

Datum: _____



Photolumineszenz Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

Gruppe M: Lumineszenz in Matrix

E3 Geben Sie in zwei Reagenzgläser je 5 g Weinsäure und erhitzen Sie vorsichtig über der rauschenden Brennerflamme. Sobald eine klare Schmelze vorliegt, werden a) 1 mg Fluoreszein und b) 5 mg Esculin hinzugefügt. Verteilen Sie durch Schwenken und Drehen die Schmelze an der Innenwand und lassen Sie sie erstarren. Bestrahlen Sie die Probe i) bei Raumtemperatur, ii) nach Abkühlen im Eisbad auf 0°C, iii) nach Erwärmen im Wasserbad auf 70 °C im Dunkeln mit UV-Licht und beobachten Sie die Probe während und direkt nach dem Ausschalten.

M1



Recherchieren Sie den Lehrfilm „Photolumineszenz“*. Ordnen Sie die Leuchterscheinungen aus E3 den Begriffen Fluoreszenz und Phosphoreszenz zu und zeichnen Sie je ein Energiediagramm.

M2 Erklären Sie mithilfe Ihrer Lösung von M1, warum die durch Phosphoreszenz emittierten Photonen im Vergleich zu den durch Fluoreszenz emittierten bathochrom* verschoben sind.

M3 Erklären Sie, warum eine kalte Probe länger phosphoresziert als eine warme Probe.

M4 Deuten Sie die Funktion der Weinsäure in E3 unter Bezugnahme auf Ihre Beobachtungen.

9.5 Lehrerhandreichungen

9.5.1 Erwartungshorizont zum AB 1, 6 und 7

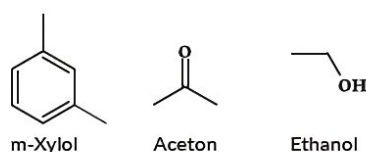
Lösungen zu den Arbeitsblättern

Solvatochromie

Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Farbstoffs in verschiedenen Lösemitteln

Erwartete Beobachtung zum Experiment: Nach dem Bestrahlen der drei Lösungen färbt sich die Spiropyran-Xylol-Lösung blau, die Spiropyran-Aceton-Lösung violett und die Spiropyran-Ethanol-Lösung rot.

A1



Das Ethanol-Molekül ist aufgrund seiner Hydroxy-Gruppe am polarsten und zur Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen fähig. Verantwortlich dafür sind die große Elektronegativitätsdifferenz zwischen dem Sauerstoff- und dem Wasserstoff-Atom sowie der kleine Atomradius des Sauerstoff-Atoms. Der unpolare Kohlenwasserstoff-Rest, die Ethyl-Gruppe, ist vergleichsweise klein. Dennoch lösen sich in Ethanol sowohl Stoffe aus polaren als auch aus unpolaren Molekülen.

Das Aceton-Molekül ist zwar auch polar, jedoch nicht so stark wie das Ethanol-Molekül. Die Elektronegativitätsdifferenz zwischen dem Sauerstoff- und dem Kohlenstoff-Atom ist geringer als zwischen dem Sauerstoff- und dem Wasserstoff-Atom. Keines der Wasserstoff-Atome aus dem Aceton-Molekül ist fähig, Wasserstoffbrückenbindungen zu bilden. Wie Ethanol löst auch Aceton sowohl Stoffe aus polaren als auch aus unpolaren Molekülen.

Das Xylol-Molekül besitzt keine polarisierende funktionelle Gruppe wie die anderen beiden Lösemittel-Moleküle. Es ist unpolar. In Xylol lösen sich nur Stoffe aus unpolaren Molekülen.

A2 Sie unterscheiden sich in der Länge des Chromophors, in ihrer Polarität und ihrer Planarität, jedoch nicht in der Summenformel.

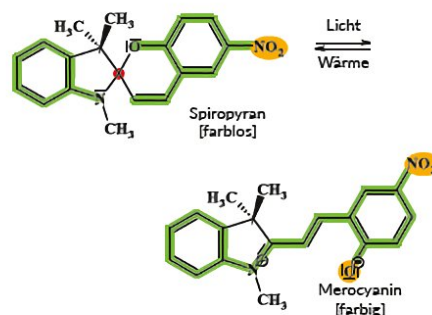
Zur Planarität: Das Spiropyran-Molekül ist nicht planar. Es besteht aus zwei planaren cyclischen Bereichen, die über das rot markierte Kohlenstoffatom (vgl. Abbildung zu S1), miteinander verknüpft sind und nicht in einer Ebene liegen. Im Gegensatz dazu liegen die Atome des Chromophors im Merocyanin-Zwitterion komplett in einer Ebene, d.h. es ist planar.

A3 Offene Lösung.

Erwartete Hypothese: Die Farbe der jeweiligen Lösung ist abhängig von der Polarität der Lösemittel-Moleküle.

Gruppe 1: Struktur-Farbigkeit

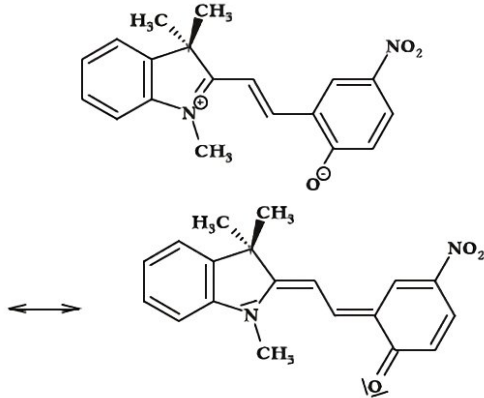
S1



Die grün markierten Chromophore bestehen aus Kohlenstoff-Atomen, die an konjugierten Doppelbindungen beteiligt sind, sowie aus Stickstoff- und Sauerstoff-Atomen mit freien Elektronenpaaren. Anhand der Markierung in den Molekülstrukturen ist erkennbar, dass der Chromophor im Spiropyran-Molekül (links) durch das rot markierte Kohlenstoff-Atom, das an vier Einfachbindungen beteiligt ist (das Spirozentrum), unterbrochen wird. Dadurch sind beide Chromophore im Spiropyran-Molekül zu kurz, um Farbigkeit zu erzeugen. Bei den orange markierten Gruppen handelt es sich um die Auxochrome bzw. Antiauxochrome.

S2 Chromophore sind das charakteristische Strukturmerkmal farbgebender Moleküle. Je größer die Ausdehnung des Chromophors ist, desto längerwelliger wird das von dem Molekül absorbierte Licht. Das β -Carotin-Molekül hat 11 konjugierte Doppelbindungen, das Merocyanin-Zwitterion 8 konjugierte Doppelbindungen. Der Chromophor des β -Carotin-Moleküls zwar länger als der des Merocyanin-Zwitterions, jedoch das Absorptionsmaximum des Merocyanins ist im Vergleich zu dem des β -Carotins nach größeren Wellenlängen (bathochrom) verschoben. Daraus kann gefolgert werden, dass für die Farbigkeit der Stoffe nicht nur die Anzahl der konjugierten Doppelbindungen ausschlaggebend ist, sondern auch die auxochromen und antiauxochromen Substituenten. Substituenten mit einem +M-Effekt sind Elektronen-Donatoren (Auxochrome), Substituenten mit -M-Effekt sind Elektronen-Akzeptoren (Antiauxochrome). Auxochrome und Antiauxochrome bewirken einen besseren Bindungsausgleich im delokalisierten Elektronensystem des Chromophors. Das hat eine bathochrome Verschiebung des Absorptionsmaximums zur Folge.

S3



In einem polaren Lösemittel liegt die zwitterionische Grenzstruktur von Merocyanin bevorzugt vor. Das Zwitterion besitzt eine positive Ladung am Stickstoffatom und eine negative Ladung am Sauerstoff-Atom. Es entstehen relativ starke Wechselwirkungen, wie Dipol-Dipol Anziehungskräfte und ggf. Wasserstoffbrückenbindungen, zwischen Lösemittel-Molekülen und den geladenen Stickstoff- bzw. Sauerstoff-Atomen. Dies stabilisiert die Zwitterionen.

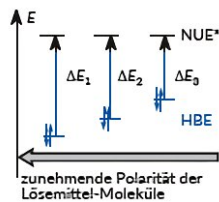
Gruppe 2: Energiestufenmodell

E1 1: Ethanol: Da Merocyanin in dem Lösemittel Ethanol eine rote Farbe zeigt, ist die Farbe des absorbierten Lichts grün (Komplementärfarbe zu Rot), sodass die Wellenlänge der absorbierten Strahlung bei ca. 500 nm liegt. (Anmerkung: Dem Aufgabenblatt entnimmt man ca. 500 nm, der genaue Wert ist 530 nm.)

3: Xylol: Da Merocyanin in dem Lösemittel Xylol eine blaue Farbe zeigt, ist die Farbe des absorbierten Lichts orange, sodass die Wellenlänge der absorbierten Strahlung bei ca. 620 nm liegt.

Es folgt: 2: Aceton.

E2



Da die Wellenlänge der absorbierten Strahlung der Ethanol-Lösung am geringsten ist, ist die Energie der absorbierten Photonen am größten. Damit in der Grafik die Anregungsenergie ΔE_1 am größten ist, muss die HBE am tiefsten eingezeichnet werden.

Da die Wellenlänge der absorbierten Strahlung in der Xylol-Lösung am größten ist, ist die Energie der absorbierten Photonen am kleinsten. In der Grafik muss demnach die HBE am höchsten eingezeichnet werden.

Die Situation in der Aceton-Lösung liegt dazwischen. Also: $\Delta E_1 > \Delta E_2 > \Delta E_3$

E3 Merocyanin zeigt negative Solvatochromie. D.h. es liegt eine hypochrome Verschiebung des Absorptionsmaximums vor. Mit steigender Polarität der Lösemittel verschiebt sich die Farbe der Lösung von blau nach rot.

Hinweis: Definitionen für bathochrome bzw. hypochrome Verschiebung sowie für positive und negative Solvatochromie finden sich im Glossar.

Gruppe 3: Chemisches Gleichgewicht

$$G1 \quad K = \frac{c(\text{Merocyanin})}{c(\text{Spiropyran})}$$

G2 Da das Merocyanin-Teilchen, die offenkettige Komponente des Gleichgewichts, durch die zwitterionische Struktur polarer ist als sein Isomer, das Spiropyran-Teilchen, sollte die Konzentration der polaren Komponente des Gleichgewichtes mit steigender Polarität der Lösemittel-Moleküle und nach dem Prinzip "Gleiches löst sich in Gleichem" auch zunehmen.

D.h. der Anteil der farbgebenden Merocyanin-Zwitterionen sollte in der Lösung mit polaren Ethanol-Molekülen größer sein als in der Lösung mit unpolaren Xylol-Molekülen. Demzufolge gilt:

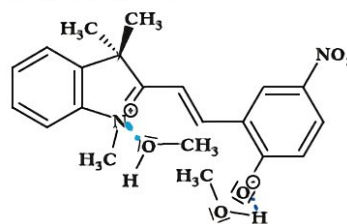
$$K_{\text{Ethanol}} = \frac{c(\text{Merocyanin})}{c(\text{Spiropyran})} > K_{\text{Xylol}} = \frac{c(\text{Merocyanin})}{c(\text{Spiropyran})}$$

G3 Aus der Reaktionsgleichung in **A2** ist zu entnehmen dass durch eine Temperaturerhöhung die Isomerisierung von Merocyanin zu Spiropyran beschleunigt wird. Dementsprechend sollte durch die Abkühlung auf 0 °C die Isomerisierung von Merocyanin zu Spiropyran verlangsamt bzw. gehemmt werden.

Anmerkung: Experimente bei unterschiedlichen Temperaturen bestätigen diese Annahme.

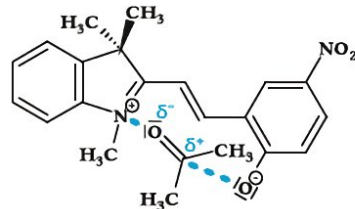
Gruppe 4: Nano-Umgebung

N1 Situation in Ethanol:



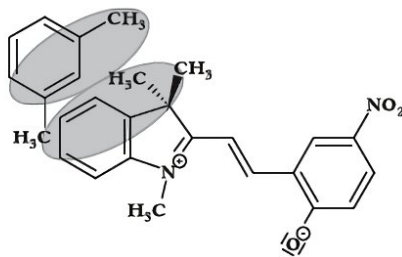
----- Wasserstoffbrückenbindungen
 Dipol-Dipol-Wechselwirkungen

Situation in Aceton:



••• Dipol-Dipol-Wechselwirkungen

Situation in Xylol:



● VAN-DER-WAALS-Kräfte

N2 Die Xylol-Lösung hat seine Farbe von blau auf farblos geändert, die Aceton-Lösung hat eine schwache violette Farbe und die Ethanol-Lösung hat eine rosa-rötliche Farbe. Somit müsste der Anteil der farbgebenden Merocyanin-Zwitterionen in der Ethanol-Lösung am größten und in der Xylol-Lösung am geringsten sein. Das Merocyanin-Teilchen hat mit seiner zwitterionischen Struktur im Vergleich zu seinem Isomer, dem Spiropyran-Teilchen, die Möglichkeit Wasserstoffbrückenbindungen zu bilden. Je polarer die Lösemittel-Moleküle sind, desto eher können die vergleichsweise stärkeren Wechselwirkungen zwischen den Merocyanin-Teilchen und den Lösemittel-Molekülen ausgebildet werden.

N3 Je polarer die Lösemittel-Moleküle sind, desto besser wird das Merocyanin-Teilchen im Vergleich zum seinem Isomer, dem Spiropyran-Teilchen, stabilisiert.

Photolumineszenz

Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

A1 Alle drei Moleküle weisen ein ausgedehntes System konjugierter Doppelbindungen – einen Chromophor – auf. Im β -Carotin-Molekül ist der Chromophor linear, wohingegen im Fluoreszein- und Esculin-Molekül auch aromatische Ringe Teile des Chromophors sind. Außerdem sind bei den zuletzt genannten Molekülen Elektronen-Donator- und Elektronen-Akzeptor-Gruppen (Auxochrome und Antiauxochrome) Bestandteile des Chromophors. Aufgrund der kondensierten aromatischen Ringe sind die Schwingungs- und Rotationsfreiheiten dieser beiden Moleküle stark eingeschränkt. Der Chromophor im β -Carotin-Molekül hingegen ist „offener“ für Schwingungen und Rotationen.

A2 Das Farbstoff-Molekül β -Carotin besitzt viele Rotations- und Schwingungsfreiheiten, dadurch kann es die aufgenommene Lichtenergie sehr gut in Rotationen und Schwingungen – also in Wärme – umwandeln. Das Chlorophyll-Molekül ist hingegen, ähnlich wie z.B. das Fluoreszein-Molekül, in seinen Schwingungs- und Rotationsfreiheiten stark eingeschränkt, sodass Chlorophyll im Gegensatz zu β -Carotin Licht emittiert.

A3 Das rechte Energiestufendiagramm ist dem β -Carotin-Molekül zuzuordnen. Die höchste besetzte Energiestufe HBE enthält viele Schwingungszustände, die bis nahe an die niedrigste unbesetzte Energiestufe NUE heran reichen. Das entspricht den vielen inneren Bewegungsmöglichkeiten im β -Carotin-Molekül. Bei den Fluoreszein- und Esculin-Molekülen sind aufgrund der eingeschränkten intramolekularen Schwingungen (und Rotationen) wesentlich weniger Schwingungsniveaus in der HBE erlaubt, der Abstand zwischen der HBE und der NUE ist relativ groß.

A4 Die Energie des absorbierten Photons (Lichtquants) aus dem violetten Licht ist größer als die des bei der Fluoreszenz emittierten Photons aus blauem bzw. grünem Licht. Dies stimmt mit den beobachteten Farben beim Versuch und mit den Längen der Pfeile in der Skizze überein. Die Energie des absorbierten Photons ist größer als die des emittierten: $E_1 > E_2$.

Die Wellenlänge des Lichts ist umgekehrt proportional zur Energie des Lichts. Das absorbierte Licht hat eine kürzere Wellenlänge als das emittierte: $\lambda_1 < \lambda_2$.

Gruppe "Lumineszenz in Lösung"

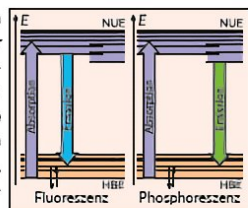
L1 Das Spektrum mit der höchsten Emissionsintensität (rote Kurve) ist der ethanolischen Lösung, das Spektrum mit der zweithöchsten Intensität (violette Kurve) der Lösung in Aceton und die Kurve mit der geringsten Intensität (blaue Kurve) der Lösung in Xylol zuzuordnen. Die Begründung für diese Zuordnung liegt in den experimentellen Beobachtungen: Die ethanolische Lösung leuchtet am stärksten, die Lösung in Xylol am schwächsten.

L2 Siehe Lösung zu N1 des Arbeitsblatts "Solvochromie".

L3 Aggregation bedeutet wörtlich Anhäufung oder Ansammlung. Angewendet auf Merocyanin bedeutet Aggregation eine „Gruppenbildung“ mehrerer Merocyanin-Zwitterionen, die sich durch Ion-Ion-Wechselwirkungen zwischen den positiven bzw. negativen Ladungen zweier Merocyanin-Zwitterionen gegenseitig anziehen. Im abgebildeten Modell sieht man, dass sich die Zwitterionen so anlagern, dass jeweils zwei unterschiedlich geladene Seiten des Zwitterions nebeneinanderliegen. Diese Aggregation schränkt die Moleküle in ihrer intramolekularen Eigenbewegung (Schwingungen und Rotationen) ein. Dadurch wird die Desaktivierung durch Schwingungsrelaxation gehemmt und die Desaktivierung durch Emission von Licht, also durch die Fluoreszenz, begünstigt. Die unterschiedlichen Fluoreszenzintensitäten sind daher auf die unterschiedlich starke Aggregation in den verschiedenen Lösungen zurückzuführen. Je polarer die Lösemittel-Moleküle, desto stärker die Fluoreszenzintensität der Lösungen.

Gruppe "Lumineszenz in Matrix"

M1 Die Proben, die im Dunkeln nur während der Bestrahlung mit der LED-Lampe leuchten, zeigen Fluoreszenz. Die Proben, die noch kurz nach dem Bestrahlen, nachleuchten, weisen zusätzlich Phosphoreszenz auf.



M2 Der angeregte Triplett-Zustand T_1 , der bei der Phosphoreszenz vor der Lichtemission eingenommen wird, ist gegenüber dem angeregten Singlett-Zustand S_1 energieärmer. Dadurch sind die bei der Phosphoreszenz ausgesandten Photonen bathochrom verschoben.

M3 Die Desaktivierung $S_1 \rightarrow S_0$ (S_0 : Grundzustand) durch Fluoreszenz erfolgt sehr schnell (ca. 1 ns). Die reversiblen Übergänge zwischen T_1 und S_1 sind wärmeabhängig. Der Übergang $S_1 \rightarrow T_1$ ist exotherm, der Übergang $T_1 \rightarrow S_1$ endotherm. In einer warmen Probe haben viel mehr Moleküle die Möglichkeit von T_1 über S_1 nach S_0 zu desaktivieren, in einer stark gekühlten Probe jedoch nicht. Die Moleküle werden so im Triplett-Zustand gehalten und können nur durch Phosphoreszenz in den Grundzustand zurückkehren. Dadurch leuchtet eine kalte Probe länger nach als eine warme.

M4 Die Aufgabe der Weinsäure ist es, die Moleküle des Esculins bzw. Fluoreszeins fest einzuschließen, sodass diese in ihren Schwingungs- und Rotationsfreiheiten weiter eingeschränkt werden. Erst dieser Einschluss erlaubt es den Fluorophor-Molekülen in den Triplett-Zustand zu wechseln.

"Farbe - (k)eine Stoffeigenschaft"

Erwartete Beobachtung zum Experiment: In a) und b) werden auf das weiße Papier die Regenbogenfarben projiziert.

Auf das weiße Papier wird in c) grünes und in d) blaues Licht projiziert.

A1 Weißes Licht lässt sich mithilfe eines Prismas in alle Farben des Regenbogens zerlegen. Die Spektralfarben des weißen Lichts setzen sich wie rechts dargestellt zusammen. Licht ist eine Energieform. Violette Licht ist energiereicher als grünes Licht und rotes Licht. Rotes Licht ist energieärmer als grünes. Die UV-LED-Lampe strahlt Licht aus, in dessen Spektrum alle Farben außer Violett fehlen.

Farbe - Teil 1

Beobachtete Farben

Lampe	Tageslicht	grünes Licht	UV-Lampe
Blattgrün	grün	grün	rot
β -Carotin	gelb-orange	braun	keine

A2

F Die Farbe, in der wir einen Stoff sehen, hängt nicht von dem Licht ab, das auf den Stoff fällt.

W Im Sonnenlicht zeigen Stoffe durch **Absorption** von Licht nur **Farben** die im Sonnenlicht enthalten sind.

F Im Licht der UV-LED-Lampe erzeugen Stoffe durch **Emission** von Licht nur **Leuchtfarben (Fluoreszenz)**, die im Licht der UV-LED-Lampe enthalten sind.

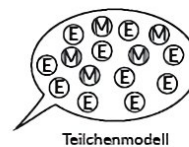
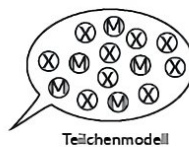
W Leuchtfarben entstehen, indem Stoffe energie-reicheres Licht in energieärmeres umwandeln.

Farbe - Teil 2

Farben der Lösungen

Xylol-Lösung	Aceton-Lösung	Ethanol-Lösung
blau	violett	rosa-rot

A3



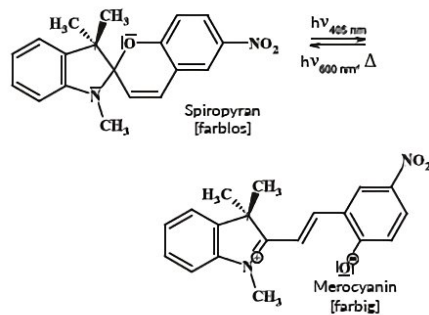
A4 Offene Lösung.

Unterschiede: Die Farben der Lösungen sind Blau (in Toluol), Violett (in Aceton), bzw. Rot (in Ethanol).

Zu erwartende Vermutung: Die Farbe ist abhängig vom Lösemittel.

Anmerkung für die Lehrenden:

Spiropyran reagiert durch das Bestrahlen zu seinem Isomer Merocyanin. Die Rückreaktion kann unter anderem auch durch Wärmeenergie (aus der Umgebung) ablaufen, sodass sich nach dem Bestrahlen das thermische Gleichgewicht wieder einstellt:



A5 Diese Aussage trifft nicht zu. Im Experiment wurde beobachtet, dass die Farbe des, durch das Bestrahlen entstandene, Merocyanin in allen drei Lösungen unterschiedlich ist. Das heißt, dass die Farbe eines Stoffes X von dem Lösungsmittel, in dem er gelöst ist, abhängen kann und somit nicht charakteristisch ist.

9.5.2 Hinweise zur Vorbereitung der Experimente in AB 1, 6 und 7

Arbeitsblätter

1. „Farbe - (k)eine charakteristische Stoffeigenschaft“

6. „Solvatochromie – Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Farbstoffs in verschiedenen Lösemitteln“

7. „Photolumineszenz – Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)“

Alle aufgeführten Experimente sollten vor der Umsetzung mit den Schülerinnen und Schülern im Unterricht zuerst von dem Lehrenden selbst durchgeführt werden, um so die Materialien und Durchführung der Experimente effektiver der jeweiligen Lerngruppe anzupassen.

Die Chemikalien sind für den Einsatz im Schulunterricht zugelassen. Zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilungen nutzen Sie bitte die RISU in ihrer jeweils aktuellen Fassung sowie die Stofflisten der DGUV, welche Sie online finden.

Hinweise zum Experiment im Einstieg (AB1)

Besonders gut lässt sich weißes Licht mit einem Prisma in Spektralfarben zerlegen, wenn man das Prisma mit einer Seitenkante sehr nah an die Taschenlampe hält und entlang einer Seitenfläche des Prismas bestrahlt (s. Abb. auf dem Arbeitsblatt).

Der Teil b) soll mit einer Taschenlampe mit Glühbirne durchgeführt werden. Die Lichtintensität der Glühbirne muss ausreichend sein, damit alle Farben im Spektrum erkannt werden können.

Hinweis zum Experiment in Teil 1 (AB1)

Chemikalien: β -Carotin-Lösung, Blattgrünextrakt

Materialien für eine Schülergruppe: Filterpapier, UV-LED-Taschenlampe, grüne LED-Taschenlampe, 2 Bechergläser (alternativ: 2 Petrischalen oder zwei Pipetten)

β -Carotin-Kapseln erhält man kostengünstig im Drogeriemarkt. Zur Herstellung der β -Carotin-Lösung wird der Inhalt einer Kapsel in ca. 100 mL Heptan gelöst.

Durch das Zerreiben von grünen Blättern mithilfe eines Mörsers mit etwas Sand in Ethanol oder Aceton kann Blattgrünextrakt bzw. Chlorophyll gewonnen werden.

Da Ethanol (oder Aceton) schnell verdunstet, wird empfohlen in das Blattgrünextrakt mit dem gewählten Lösemittel zusätzlich noch pro 10 mL Lösung zwei Tropfen Speiseöl hinzuzugeben.

Alternativ zum selbst hergestellten Blattgrünextrakt kann auch grünes Kürbiskernöl verwendet werden.

Herstellung der Spiropyran-Lösungen (AB1 Teil 2, AB 6, AB 7 Gruppe L)

Chemikalien: Spiropyran, Ethanol, Aceton, Heptan oder Xylol

Materialien für eine Schülergruppe: UV-LED-Taschenlampe, 3 Reagenzgläser, 3 Pipetten

Pro Gruppe werden je 3 mL der drei Lösungen (Spiropyran gelöst in Ethanol, Aceton bzw. Heptan oder Xylol) benötigt. Für 15 Gruppen à 2 Lernenden mit je 1 mL Puffer für Verluste ergibt dies je Lösung 60 mL.

In 60 mL eines der Lösemittel werden 3 mg Spiropyran gelöst. Die Löslichkeit von Spiropyran nimmt mit steigender Polarität der Lösemittel-Moleküle ab. Um Spiropyran in Ethanol schneller vollständig zu lösen, sollte die Probe ein wenig erwärmt werden.

Zur intensiveren Färbung der Lösungen durch das Bestrahlen können 6 mg Spiropyran je 60 mL Lösemittel verwendet werden. Jedoch sollten für die Herstellung von 60 mL Spiropyran-Heptan-Lösung maximal 3 mg Spiropyran gelöst werden. Diese Lösung trübt sich nach einigen Bestrahlungsvorgängen durch die Bildung fein verteilter, schwarzer Feststoffteilchen und es bildet sich eine Suspension. Bei Zugabe von mehr als 3 mg Spiropyran sollte dies bereits nach 1-2 Bestrahlungsvorgängen zu beobachten sein.

9.5.3 Hinweise zur Vorbereitung der Experimente in AB 2, 3/4 und 5

Arbeitsblätter

2. „Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zu Stoff- und Energieumsätzen“
3. „Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur (Chemieunterricht)“
4. „Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur (Biologieunterricht)“
5. „Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zur Energieumwandlung und -speicherung in einer lichtgetriebenen Konzentrationszelle“

Alle aufgeführten Experimente sollten vor der Umsetzung mit den Schülerinnen und Schülern im Unterricht zuerst von dem Lehrenden selbst durchgeführt werden, um so die Materialien und Durchführung der Experimente effektiver der jeweiligen Lerngruppe anzupassen.

Die Chemikalien sind für den Einsatz im Schulunterricht zugelassen. Zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilungen nutzen Sie bitte die RISU in ihrer jeweils aktuellen Fassung sowie die Stofflisten der DGUV, welche Sie online finden.

Herstellung der PBB-Lösung

Folgende Chemikalien werden eingewogen:

Hinweis: Im Chemikalienpaket sind sie bereits eingewogen.

2,8 g EDTA
Ethyldimaintetraessigsäure-dinatriumsalz

561 mg Ethylviologen
1,1'-Diethyl-4,4'-bipyridiniumdibromid

15 mg Proflavin
3,6-Diaminoacridin-hemisulfat

Die oben genannten Chemikalien werden in der Reihenfolge ihrer Angabe in einem Becherglas unter Rühren in 500 mL dest. Wasser gelöst.

In der so erhaltenen Photo-Blue-Bottle-Lösung (PBB-Lösung) liegen folgende Konzentrationen vor:

$c(\text{EV}^{2+}) = 0,003 \text{ mol/L}$
 $c(\text{PF}^*) = 0,000045 \text{ mol/L}$
 $c(\text{EDTA}) = 0,0049 \text{ mol/L}$

Die gelbe, schwach fluoreszierende Lösung wird in eine braune 500 mL Enghalsflasche gefüllt. Falls keine braune Flasche vorhanden ist, kann auch eine aus farblosem Glas genutzt werden, wenn sie mit Alufolie lichtdicht eingepackt wird.

Wenn für jede Lerngruppe die PBB-Lösung neu angesetzt wird, reicht sie für ca. 3 Lerngruppen á 30 Lernenden (Arbeitsblatt 5) bzw. für ca. 12 Lerngruppen á 30 Lernenden (Arbeitsblätter 2, 3, und 4).

Unter Lichtausschluss ist die Lösung 3 - 4 Monate haltbar, sodass mit der angesetzten Lösung mehr Lerngruppen arbeiten können.

9.5.4 Hinweise zu den verwendeten Chemikalien

Gefahrstoffdaten abgerufen am 18.12.2017

Die Angaben zu Tätigkeitsverboten entstammen der Stoffliste zur DGUV Regel 113-018 „Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen“ März 2017, sofern vorhanden (<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/213-098.pdf>)

Dinatriumdihydrogenethylendiamintetraacetat (EDTA-di-Natriumsalz)

CAS-Nr.: 6381-92-6



ACHTUNG

H332: Gesundheitsschädlich bei Einatmen.
H373: Kann die Organe schädigen bei längerer oder wiederholter Exposition.
----- Expositionsweg: Inhalativ
----- Betroffene Organe: Atmungsapparat

P260: Staub/Rauch/Gas/Nebel/Dampf/Aerosol nicht einatmen.

Quelle: GESTIS Stoffdatenbank
[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/013030.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/013030.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)

Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4

Ethylviologen (Ethylviologen dibromide 99%)

CAS-Nr.: 53721-12-3



ACHTUNG

H302: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken.
H312: Gesundheitsschädlich bei Hautkontakt.
H315: Verursacht Hautreizungen.
H319: Verursacht schwere Augenreizung.
H332: Gesundheitsschädlich bei Einatmen.
H335: Kann die Atemwege reizen.

P261: Einatmen von Staub/ Rauch/ Gas/ Nebel/ Dampf/ Aerosol vermeiden.
P280: Schutzhandschuhe/ Schutzkleidung tragen.
P305 + P351 + P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

Quelle: Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich zu *Ethylviologen dibromide* vom 14.12.2012

1,3,3-Trimethylindolino-6'- nitrobenzopyrylospiran (Spiropyran)

CAS-Nr.: 1498-88-0

Nicht eingestuft / Nicht klassifiziert

Quelle: Sicherheitsdatenblatt der TCI-Chemicals zu 1,3,3-Trimethylindolino-6'-nitrobenzopyrylospiran vom 23.07.2015

Esculin

CAS-Nr.: 531-75-9

Kein gefährlicher Stoff oder gefährliches Gemisch gemäss der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Quelle: Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich zu *Esculin hydrate* vom 22.12.2015

Fluoreszein Natriumsalz

CAS-Nr.: 518-47-8

Kein gefährlicher Stoff oder gefährliches Gemisch gemäss der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Quelle: Sicherheitsdatenblatt der Fa. Carl Roth zu *Fluorescein-Natrium (C.I. 45350) extra konz.* vom 13.01.2017

Proflavin Hemisulfat

CAS-Nr.: 1811-28-5

Kein gefährlicher Stoff oder gefährliches Gemisch gemäss der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008

Quelle: Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich zu *Proflavine hemisulfate salt hydrate* vom 27.09.2016

DL-Weinsäure

CAS-Nr.:133-37-9



GEFAHR

H318: Verursacht schwere Augenschäden.

P280: Schutzhandschuhe/ Augenschutz/ Gesichtsschutz tragen.
P305 + P351 + P338: BEI KONTAKT MIT DEN AUGEN: Einige Minuten lang behutsam mit Wasser spülen. Vorhandene Kontaktlinsen nach Möglichkeit entfernen. Weiter spülen.

Quelle: Sicherheitsdatenblatt der Fa. Sigma-Aldrich zu *DL-Weinsäure* vom 12.05.2014

Tätigkeitsverbot für Schülerinnen und Schüler bis einschließlich Jahrgangsstufe 4

9.5.5 Glossar zu den Arbeitsblättern

Glossar mit Fachbegriffen

zu den Arbeitsblättern für die Sekundarstufe II

Absorptionsmaximumsiehe *Absorptionsspektrum***Absorptionsspektrum**

Das Absorptionsspektrum einer Lösung ist die grafische Auftragung des absorbierten elektromagnetischen Strahlungsanteils. Als Maß für die Absorption gilt die *Extinktion E*. Im Absorptionsspektrum wird die Extinktion *E* gegen die Wellenlänge λ aufgetragen. Das Absorptionsmaximum gibt die Wellenlänge an, bei der die Extinktion am größten ist. Absorptionsspektren spielen eine große Rolle bei der Strukturaufklärung von Molekülen, die Farbigkeit verursachen.

Aggregation

vgl. "Zusatzinformationen zur aggregationsinduzierten Lumineszenz"

Auxochrome

Donator-Gruppen, die einen +M-Effekt auf das System *delokalisierte Elektronen* in konjugierten Doppelbindungen ausüben, bezeichnet man bei Farbstoff-Molekülen als Auxochrome. Beispiele: $\text{H}\bar{\text{O}}-\text{R}_2\bar{\text{N}}-$

Antiauxochrome

Akzeptor-Gruppen, die einen -M-Effekt auf das System *delokalisierte Elektronen* in konjugierten Doppelbindungen ausüben, bezeichnet man bei Farbstoff-Molekülen als Antiauxochrome. Beispiel: $\text{C}=\text{O}$
|
R

Bathochrome Verschiebung

Eine bathochrome Verschiebung ist die Verschiebung des *Absorptionsmaximums* oder *Emissionsmaximums* nach größeren Wellenlängen. Sie wird auch als Rotverschiebung bezeichnet.

Chemisches Gleichgewicht

Im Zustand des chemischen Gleichgewichts liegen Reaktionsprodukte und Ausgangsstoffe in bestimmten, konstanten Konzentrationen nebeneinander vor. Stoff- und Energieumsatz sind nicht beobachtbar. Der Zustand kann nur in einem geschlossenen System eingenommen werden, in dem die Reaktion, die zur Ausbildung des Gleichgewichtszustands führt, auch umkehrbar (reversibel)

ist. Auf der Teilchenebene herrscht beim chemischen Gleichgewicht kein Stillstand; sowohl die Hin- als auch die Rückreaktion laufen weiter ab, aber ihre Reaktionsraten sind gleich.

Chromophor

Ein Chromophor besteht aus mehreren konjugierten Doppelbindungen und stellt das gemeinsame strukturelle Merkmal von organischen, farbgebenden Molekülen dar. Im Chromophor sind die Elektronenpaare aus Doppelbindungen und freien Elektronenpaaren delokalisiert.

Delokalisierte Elektronen

Delokalisierte Elektronen sind über mehr als zwei Atome verteilt. Dies trifft für Elektronenpaare aus konjugierten Doppelbindungen (und gegebenenfalls freien Elektronenpaaren aus benachbarten Heteroatomen) zu.

EDTA

Kurzbezeichnung von Ethylendiamintetraessigsäure; vgl. auch *Opferdonator*.

Emissionsspektrum

Das Emissionsspektrum einer Probe ist die grafische Auftragung der Intensität des emittierten Lichts / der elektromagnetischen Strahlung gegen die Wellenlänge λ des Lichts. Das Emissionsmaximum gibt die Wellenlänge an, bei der die Emissionsintensität am größten ist. Siehe auch *Absorptionsspektrum*.

Emissionsmaximumsiehe *Emissionsspektrum***Extinktion**

Die Extinktion ist ein Maß für den Anteil der von einer Stoffprobe absorbierten Strahlung. $E = \log \frac{I_0}{I}$. (I_0 : Intensität der in die Probe eintretenden Strahlung, I : Intensität der aus der Probe austretenden Strahlung.)

Energiefestendiagramm

Das Energiefestendiagramm ist eine grafische Darstellung des *Energiefestendiagramms*.

Energiefestendiagramm

Nach dem Energiefestendiagramm können Elektronen in Molekülen nur bestimmte erlaubte Energiefestufen

(Energieniveaus) besetzen. Die erlaubten Energiefestufen werden mit je einem Elektronenpaar „von unten nach oben“ aufgefüllt. Durch Absorption eines Lichtquants geeigneter Energie kann ein Elektron aus der *höchsten besetzten Energiefestufe (HBE)* in die *niedrigste unbesetzte Energiefestufe (NUE)* angehoben werden. Das Molekül geht dabei aus dem Grundzustand in den elektronisch angeregten Zustand über. Mit dem Energiefestufenmodell kann die Farbigkeit durch Lichtabsorption (normale Farbe) und Lichtemission (Leuchtfarben) erklärt werden.

Farbigkeit

Stoffe erscheinen im sichtbaren Licht farbig, wenn sie einen Teil dieses Lichts absorbieren. Die wahrgenommene Farbe kommt durch die Überlagerung der nicht absorbierten Farben zustande. Neben dieser Art von Farbigkeit, die durch *Lichtabsorption* entsteht, gibt es auch Leuchtfarben, die durch *Lichtemission* zustande kommen (Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Chemolumineszenz, Elektrolumineszenz).

Gleichgewichtskonstante

Die Gleichgewichtskonstante ist eine charakteristische Größe für das *chemische Gleichgewicht* einer reversiblen Reaktion bei einer bestimmten Temperatur. Sie nimmt den Wert des Massenwirkungsquotienten beim chemischen Gleichgewicht ein.

Höchste besetzte Energiefestufe HBEsiehe *Energiefestendiagramm***Hypsochrome Verschiebung**

Eine hypsochrome Verschiebung ist die Verschiebung des *Absorptionsmaximums* oder *Emissionsmaximums* nach kleineren Wellenlängen. Sie wird auch als Blauverschiebung bezeichnet.

Konzentrationszelle

Eine Konzentrationszelle ist eine galvanische Zelle, bei der die beiden Halbzellen die gleichen Redoxpaare enthalten und sich nur durch die Konzentrationen der gelösten, an den Redoxreaktionen beteiligten Stoffen (i.d.R. Ionen) unterscheiden.

(Mesomere) Grenzstruktur, Grenzformel

Grenzformeln sind Valenzstrichformeln, mit denen Grenzsituationen der Elektronenverteilung in Teilchen (Molekülen oder Molekül-Ionen) mit delokalisierten Elektronen beschrieben werden. Zwischen mesomere Grenzstrukturen schreibt man Mesomeriepfeile \leftrightarrow .

Modellexperiment

Um komplexe Vorgänge in der Natur und in der Technik besser verstehen zu können, nutzt man Modellexperimente. In einem Modellexperiment werden bestimmte wesentliche Merkmale eines realen Prozesses in einem einfacheren System wiedergegeben. Das *Photo-Blue-Bottle-Experiment* ist ein Modell für den vollständigen Kreislauf des Kohlenstoffs bei der *Photosynthese* und *Zellatmung*.

NERNST-Gleichung

WALTER NERNST beschrieb den Zusammenhang zwischen Ionenkonzentration und Elektronenpotenzial E durch die nach ihm benannte NERNST-Gleichung. Das Elektronenpotenzial E ist das Potenzial, das sich an einer Elektrode einstellt, wenn keine Standardbedingungen vorliegen:

$$E = E^0 + \frac{R \cdot T}{F \cdot z} \cdot \ln \left(\frac{c(\text{Ox})}{c(\text{Red})} \right)$$

Hierbei bedeuten:

$$R = 8,3144 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

$$F \text{ FARADAY-Konstante } F = 96487 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$$

T Temperatur in K

z Anzahl der übertragenden Elektronen

$\{c\}$ Stoffmengenkonzentration der gelösten Teilchen (ohne Einheit)

Ox und Red bezeichnen jeweils die oxidierte bzw. reduzierte Form eines konjugierten Redoxpaares. Da in einer galvanischen Zelle die Größen R und F konstant sind, lassen sich die Größen für eine definierte Temperatur (z.B. $T = 298 \text{ K}$) zu einer Konstanten zusammenfassen. Damit ergibt sich folgende vereinfachte NERNST-Gleichung (für $T = 298 \text{ K}$):

$$E = E^0 + \frac{0,059 \text{ V}}{z} \cdot \ln \left(\frac{c(\text{Ox})}{c(\text{Red})} \right)$$

Lichtabsorption

Lichtabsorption bedeutet die Aufnahme von elektromagnetischer Strahlung aus dem sichtbaren Bereich durch einen Stoff. Bei der Lichtabsorption werden die Teilchen des Stoffes elektronisch angeregt,

wobei i.d.R. ein Elektron aus der höchsten besetzten Energiestufe in die niedrigste unbesetzte Energiestufe angehoben wird. Wenn die Energie des absorbierten Lichts vom Stoff in Wärme umgewandelt wird, erscheint er in der Farbe, die sich durch Überlagerung der nicht absorbierten Teile des weißen Lichts ergibt.

Lichtemission

Lichtemission bedeutet die Ausstrahlung von elektromagnetischer Strahlung aus dem sichtbaren Bereich durch einen Stoff. Sie wird z.B. als Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Chemolumineszenz oder Elektrolumineszenz sichtbar. Bei der Emission von Licht gehen die Teilchen des Stoffes aus dem elektronisch angeregten Zustand in den Grundzustand über.

Negative Solvatochromie

Siehe auch *Solvatochromie*. Bei der negativen Solvatochromie erfolgt mit steigender Polarität der Lösemittel-Moleküle eine *hypsochrome Verschiebung* des *Absorptionsmaximums*. Die gesehene Farbe verschiebt sich dabei zum Beispiel von Blau nach Rot.

Niedrigste unbesetzte Energiestufe NUE

siehe *Energiestufendiagramm*

Opferdonator

Opferdonoren (Opferdonatoren) sind Stoffe, die als Reduktionsmittel eingesetzt und dabei irreversibel verbraucht werden. EDTA ist ein oft eingesetzter Opferdonor, dessen Moleküle mehrfach reduzieren können. Durch die Elektronenübertragung von EDTA-Molekülen auf Photokatalysator-Dikationen (PF^{2+}) werden im *Photo-Blue-Bottle-Experiment* die Photokatalysator-Monokationen (PF^+) regeneriert.

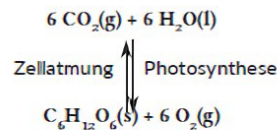
Photokatalysator

Sonnenlicht kann nur dann als Energiequelle genutzt werden, wenn geeignete lichtabsorbierende Farbstoffe vorhanden sind. Diese Aufgabe erfüllen in der Natur die grünen Blattfarbstoffe, die Chlorophylle. Sie vermitteln zwischen der Lichtenergie und den Elektronen der an der Photosynthese beteiligten Moleküle. Photokatalysator-Moleküle werden durch Absorption von Lichtquanten (Photonen) geeigneter Energie elektronisch angeregt. Dabei

werden Elektronen an die Substrat-Moleküle, die dabei reduziert werden, abgegeben.

Photosynthese

Die Photosynthese ist der wichtigste Biosyntheseprozess in der belebten Natur und im Stoffkreislauf des Kohlenstoffs auf unserem Planeten. Nur die grünen Pflanzen sind in der Lage, aus anorganischem Kohlenstoffdioxid organische Verbindungen wie Glucose aufzubauen. Pflanzen sind in der Lage, bei Licht mithilfe von Chlorophyllen (Blattfarbstoffe) aus Kohlenstoffdioxid und Wasser in vielen Schritten Sauerstoff zu entwickeln. Hierbei entsteht als weiteres Produkt Glucose (Traubenzucker) $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$. Die Photosynthese und ihre Rückreaktion, die *Zellatmung*, laufen stark vereinfacht nach der folgenden Reaktionsgleichung ab:



Planarität des Moleküls

Ist ein Molekül planar, so bedeutet dies, dass im Hinblick auf die räumliche Anordnung alle Atome des Moleküls (bei Farbstoff-Molekülen zumindest alle Atome des *Chromophors*) in einer Ebene liegen.

Positive Solvatochromie

Siehe auch *Solvatochromie*. Bei der positiven Solvatochromie erfolgt mit steigender Polarität der Lösemittel-Moleküle eine *bathochrome Verschiebung* des *Absorptionsmaximums*. Die gesehene Farbe verschiebt sich dabei zum Beispiel von Rot nach Blau.

„Solarakku“(Solarakkumulator)

Ein Akkumulator ist eine wieder-aufladbare galvanische Zelle. Gängige Akkus werden durch Anlegen einer Spannung aufgeladen. Der „Solarakku“ aus dem PBB-Experiment wird mit Sonnenlicht aufgeladen. So wird Sonnenenergie in chemische und letztendlich in elektrische Energie umgewandelt.

Solvatochromie

Die Beeinflussung der Farbe eines Farbstoffs durch das Lösemittel (Solvens) wird als Solvatochromie

bezeichnet. Solvatochrome Farbstoffe können als Indikatoren für die Polarität der Moleküle eines Lösemittels eingesetzt werden.

Zellatmung

vgl. *Photosynthese*

9.5.6 Vorschläge zur unterrichtlichen Umsetzung

„Benötigtes Vorwissen“

Sowohl für die Lehrperson als auch für die Schülerinnen und Schüler wird das zur Bearbeitung der Arbeitsblätter „benötigte Vorwissen“ im Kopfbereich des jeweiligen Arbeitsblatts angegeben. Die angegebenen Fachbegriffe gehören zu den lehrplangebundenen Basiskonzepten der Oberstufe, beispielsweise in NRW.

Zu den Arbeitsblättern 2a, 3/4 und 5

Mithilfe der Arbeitsblätter wird durch das jeweilige Einstiegsexperiment und die dazugehörigen Auswertungsaufgaben ein nötiges Grundgerüst aus prozess- und inhaltsbezogenen Kompetenzen für die weiterführende arbeitsteilige Gruppenarbeit aufgebaut. Dadurch soll vor der Spezialisierung in der Gruppenarbeit ein Konsens unter allen Lernenden erzeugt werden. In der Phase des Austausches werden so Verständnisprobleme mangels Grundwissen vermieden. Sinnvollerweise sollten die Arbeitsblätter in *drei Phasen* bearbeitet werden:

- i) In der ersten Phase wird in Gruppenarbeit arbeitsgleich Basiswissen zum Photo-Blue-Bottle-Experiment erworben.
- ii) In der zweiten Phase fokussieren sich die gleichen Kleingruppen auf die für sie vorgesehenen Aufgaben (rechte Spalte oder linke Spalte).
- iii) In der dritten Phase tauschen die Gruppen die erworbenen Erkenntnisse untereinander aus.

Ein Vorschlag für die zweite Phase wäre die traditionelle Teilung des Kurses z. B. in die „Wand- und Fensterseite“, sodass mehrere Kleingruppen die rechte bzw. linke Spalte des Arbeitsblatts bearbeiten. Anschließend kann die dritte Phase unterschiedlich gestaltet werden. Das Kugellager ist eine geeignete Unterrichtsmethode, bei der z.B. im Innenkreis Mitglieder der einen Gruppe und im Außenkreis Mitglieder der anderen Gruppe stehen, wobei nach einer gegenseitigen Vorstellung des erworbenen Wissens die Kreise sich drehen, d. h. die Gesprächspartner rotieren. Alternativ können in dieser Phase zwei Gruppen, die unterschiedliche Aufgaben bearbeitet haben, zusammenkommen und sich gegenseitig ihre Ergebnisse und Erkenntnisse vortragen.

Auf dem **Arbeitsblatt 3/4** wird der natürliche Kreislauf Photosynthese / Zellatmung in Abbildung 2 der Aufgabe B1 stark vereinfacht dargestellt. Beim Einsatz des Arbeitsblatts im Chemieunterricht können die Schülerinnen und Schülern darauf aufmerksam gemacht werden. Für den Biologieunterricht stehen zusätzlich die Aufgaben A4 und B4 zur Auswahl. Bei der Bearbeitung dieser Aufgaben setzen die Schülerinnen und Schüler sich mit der Reduktion in der modellhaften Darstellung des natürlichen Stoffkreislaufs Photosynthese / Zellatmung auseinander, sodass dabei die Modellkompetenz gefördert wird.

Zu den Arbeitsblättern 1, 6 und 7

In den Arbeitsblättern wird durch das jeweilige Einstiegsexperiment und die dazugehörigen Auswertungsaufgaben ein nötiges Grundgerüst aus prozess- und inhaltsbezogenen Kompetenzen für die weiterführende arbeitsteilige Gruppenarbeit aufgebaut. Dadurch soll vor der Spezialisierung in der Gruppenarbeit ein Konsens unter allen Lernenden erzeugt werden. In der Phase des Austausches werden so Verständnisprobleme mangels Grundwissen vermieden. Sinnvollerweise sollten die Arbeitsblätter in *drei Phasen* bearbeitet werden:

- i) In der ersten Phase wird in Gruppenarbeit arbeitsgleich Basiswissen erworben.
- ii) In der zweiten Phase fokussieren sich die gleichen Kleingruppen auf jeweils ein zu erschließendes Schlüsselkonzept.
- iii) In der dritten Phase tauschen die Gruppen die erworbenen Erkenntnisse untereinander aus.

Das **Arbeitsblatt 6** sieht die Bildung von vier Kleingruppen vor, sodass in der zweiten Phase durch die Zuteilung der Aufgaben die vier Schlüsselkonzepte „Struktur-Farbigkeit“, „Energienstufenmodell“, „Gleichgewicht“ und „Nano-Umgebung“ bearbeitet werden. In der dritten Phase kommen im Sinne der Methode des Gruppenpuzzles Experten aus den vier unterschiedlichen Stammgruppen zusammen und vermitteln im sogenannten Expertenkongress jeweils ihre Erkenntnisse. Eine andere Möglichkeit wäre der Vortrag der Stammgruppen im Plenum.

Im Vergleich dazu werden zur Bearbeitung des **Arbeitsblatts 7** zwei Stammgruppen gebildet, wobei Gruppe L die Lumineszenz in Lösung und Gruppe M Lumineszenz in Weinsäurematrix untersucht. Ein Vorschlag wäre die traditionelle Teilung des Kurses z. B. in die „Wand und Fensterseite“, sodass mehrere Kleingruppen die rechte bzw. linke Spalte des Arbeitsblatts bearbeiten. Anschließend kann die dritte Phase unterschiedlich gestaltet werden. Das Kugellager ist eine geeignete Unterrichtsmethode, bei der z.B. im Innenkreis Mitglieder der Gruppe L und im Außenkreis Mitglieder der Gruppe M stehen, wobei nach einer gegenseitigen Vorstellung des erworbenen Wissens die Kreise sich drehen, d.h. die Gesprächspartner rotieren. Alternativ können in dieser Phase jeweils eine Gruppe L und eine Gruppe M zusammenkommen und sich gegenseitig ihre Ergebnisse und Erkenntnisse vortragen.

Das **Arbeitsblatt 1** ist ein Vorschlag für den Anfangsunterricht. Bereits hier sollte im Modus des forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens vermittelt werden, dass das Alltagsphänomen Farbe auf zwei ganz unterschiedliche Arten zustande kommt, nämlich durch Absorption oder durch Emission von sichtbarem Licht. Die Aufgaben aus dem Einstieg und aus Teil 1 des Arbeitsblatts können bereits vor, die Aufgaben aus Teil 2 erst nach der Einführung des einfachen Teilchenmodells bearbeitet werden. Dieses Arbeitsblatt sollte daher entweder in zwei zeitversetzten Stunden behandelt

werden oder erst nach Einführung des Teilchenmodells. Das sollte traditionsgemäß im Zusammenhang mit anderen Phänomenen als der Farbe, beispielsweise den Aggregatzustandsänderungen, dem Lösungsvorgang, der Diffusion in Gasen oder der Dichte eingeführt werden.

Weitere Hinweise

Die rechten und die linken Spalten bzw. die Blöcke von Vertiefungsaufgaben auf den Arbeitsblättern können zum größten Teil inhaltlich unabhängig voneinander bearbeitet werden. Deshalb ist es nach der ersten Phase möglich, dass Schülerinnen und Schüler nur eine Spalte bzw. einen Block von Vertiefungsaufgaben des jeweiligen Arbeitsblatts bearbeiten.

Die Lehrperson hat die Möglichkeit, das jeweilige Arbeitsblatt als einen Arbeitsapparat zu betrachten und je nach Bedarf einzelne Aufgaben aus diesem auszuwählen und in ihrem Unterricht im Zusammenhang mit den Experimenten einzusetzen oder die Konzepte nach dem Schema i) - iii) zu übernehmen und dabei aber einzelne Aufgaben aus dem Arbeitsapparat zu eliminieren.

In jedem Fall sind eine sinnvolle *Einstiegsphase* und eine *Sicherungsphase* zu entwickeln. Letztere dient zudem zur Diagnose des Lernertrags der Schülerinnen und Schüler in ihren kooperativen Lernphasen.

9.6 Forschungsinstrumente

9.6.1 Feedbackbogen für Schüler der Sek. 1

Kreuze bei den entsprechenden Aussagen jeweils die Ziffer an, die deiner Meinung nach am ehesten zutrifft. Begründe gegebenenfalls.

10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Trifft zu 90-100 % zu.					Trifft zu 0-10 % zu.				

14	Die Aufgaben sind anspruchsvoll/schwierig.								
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
16	Das ausgewählte Thema und die entsprechenden Experimente fand ich interessant und sie haben mir Spaß gemacht.								
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Begründung									
17	Ich konnte beim Bearbeiten der Aufgaben zu den Experimenten mein Wissen aus dem Unterricht zuvor anwenden.								
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Dieses Wissen konnte ich nutzen									
18	Ich habe beim Bearbeiten der Aufgaben und Durchführen der Experimente Neues dazugelernt.								
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Das habe ich gelernt:									
19	Wir sollten noch mehr Experimente mit der Energieform Licht kennenlernen und im Unterricht durchführen.								
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Begründung									
113	Vervollständige die Aussage, indem du entsprechend ankreuzt: „Zukünftig sollten im Chemieunterricht Experimente mit der Energieform Licht im Vergleich zu den Experimenten mit Wärme oder elektrischer Energie ... sein.“								
Begründung									

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

9.6.2 Deckblatt der Lernstandserhebungen



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**



**CHEMIE
UND IHRE
DIDAKTIK**

Lernstandserhebung der Schülerinnen und Schüler

Thema des Arbeitsblatts

Liebe/r Schüler/in,

aufgrund der Datensicherheit bitten wir dich einen anonymen Code zu bilden. Dazu gibst Du den zweiten und dritten Buchstaben des Vornamens deiner Mutter und deinen Geburtstag an.

(z.B. Muttername **Laura** Grünbaum, Geburtsdatum der/s Schüler/in **23.04.1997**: **AU23**)

Dein Code:

--	--	--	--

Schule											
Klasse											
Geschlecht											
Magst du das Fach Chemie? Kreuze eine Ziffer an und begründe kurz.											
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; width: 15%;">1</td> <td style="text-align: center; width: 15%;">2</td> <td style="text-align: center; width: 15%;">3</td> <td style="text-align: center; width: 15%;">4</td> <td style="text-align: center; width: 15%;">5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Nein!</td> <td colspan="3" style="text-align: center;">—————</td> <td style="text-align: center;">Ja!</td> </tr> </table>		1	2	3	4	5	Nein!	—————			Ja!
1	2	3	4	5							
Nein!	—————			Ja!							
Begründung:											

9.6.3 Lernstandserhebung zum AB 1

A. Kreuze an.

Wie gut kennst du dich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	<u>*Jetzt kenne ich mich besser damit aus.</u>
	1	2	3	4	5	
UV-LED-Lampe						
Absorption von Licht						
Fluoreszenz						
Emission von Licht						
Spektralfarben						
Farbspektrum						
Energieform						
charakteristische Eigenschaft						
Leuchtfarbe						
energiearmes Licht						
energiereiches Licht						
Glasprisma						
β -Carotin						
Teilchenmodell						
Antriebsenergie						

B. Beurteile die folgenden Aussagen.

Nr.	Wie gut kannst du das?	sehr gut				sehr schlecht	<u>*Jetzt kann ich das besser.</u>
		1	2	3	4	5	
1	Ich kann das Teilchenmodell nutzen, um Stoffeigenschaften zu beschreiben.						
2	Ich kann Lichtenergie beim Experimentieren nutzen und weiß auch, wofür ich die Lichtenergie nutze.						
3	Ich kann durch meine Beobachtungen beim Experimentieren Ähnlichkeiten und Unterschiede wahrnehmen.						
4	Ich kann energiearmes Licht von energiereichem Licht unterscheiden.						
5	Ich kann Beobachtungen von Auswertungen unterscheiden.						

C. Kreuze an.

Nr.	Aussage	richtig	falsch	keine Ahnung
1	Jeder Stoff hat, unabhängig davon worin er gelöst wird, immer eine einzige bestimmte Farbe.			
2	Leuchtfarben entstehen, indem Stoffe energiearmes Licht in energiereiches Licht umwandeln.			
3	Blaues Licht ist energiereicher als rotes Licht.			
4	Mit Lichtenergie kann man die Farbe einer Lösung ändern.			
5	Weißes Licht kann man nicht aufspalten in die Spektralfarben.			
6	Der grüne Stoff in den Baumblättern leuchtet unter violettem Licht rot.			

D. Erstelle hier eine **Mind Map** zum Thema „**Farbe und Licht**“. Du darfst die komplette Seite benutzen. *Ergänze deine Mind Map mit dem neu erlernten Wissen.

9.6.4 Lernstandserhebung zum AB 2

A. Kreuze an.

Wie gut kennst du dich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	<u>*Jetzt kenne ich mich besser damit aus.</u>
	1	2	3	4	5	
UV-LED-Lampe						
Absorption von Licht						
Modellexperiment						
Energieumwandlung						
Oxidation						
Reaktionszyklus						
Energieform						
Farbspektrum						
Verbrennung						
energiearm						
energiereich						
Aktivierungsenergie						
Reaktionsschemata						
Reduktion						
Antriebsenergie						

B. Beurteile die folgenden Aussagen.

Nr.	Wie gut kannst du das?	sehr gut				sehr schlecht	<u>*Jetzt kann ich das besser.</u>
		1	2	3	4	5	
1	Ich kann Stoffumwandlungen beobachten und beschreiben.						
2	Ich kann Energieumwandlungen beschreiben und erklären.						
3	Ich kann Stoffumwandlungen in Verbindung mit Energieumsätzen als chemische Reaktion deuten.						
4	Ich kann Lichtenergie beim Experimentieren nutzen und weiß auch wofür ich die Lichtenergie nutze.						
5	Ich kann Oxidation und Reduktion voneinander unterscheiden.						
6	Ich kann den Kreislauf Photosynthese/Zellatmung mit einem Modellexperiment beschreiben.						
7	Ich kann energiearmes Licht von energiereichem Licht unterscheiden.						
8	Ich kann Beobachtungen von Auswertungen unterscheiden.						

D. Erstelle hier eine **Mind Map** zum Thema „**Stoff- und Energieumsatz**“. Du darfst die komplette Seite benutzen. *Ergänze deine Mind Map mit dem neu erlernten Wissen.

9.6.5 Lernstandserhebung zum AB 3/4

A. Kreuze an.

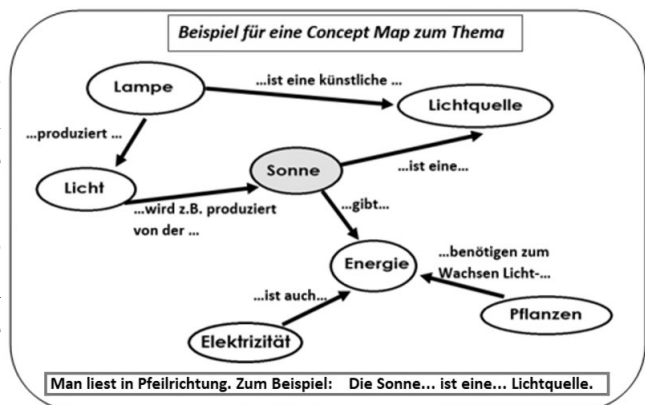
Wie gut kennen Sie sich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	*Jetzt kenne ich mich besser damit aus.
	1	2	3	4	5	
UV Licht						
Lichtabsorption						
Modellexperiment						
Photokatalysator						
Reaktionszyklus						
Solarakku						
Solarenergie						
Energieumwandlung						
Energiespeicherung						
Photosynthese						
Oxidation						
Reduktion						
Antriebsenergie (Dies ist nicht gleichzusetzen mit der Aktivierungsenergie.)						

B. Kreuze an.

Nr.	Ich kann ...	sehr gut				sehr schlecht	*Jetzt kann ich das besser.
		1	2	3	4	5	
1	Hypothesen mithilfe von geplanten Versuchen oder fachlicher Argumentation überprüfen.						
2	die Umwandlung von Solarenergie in chemische Energie erklären.						
3	die Grenzen eines Modells aufzeigen.						
4	ein Modell auf einen natürlichen Vorgang anwenden.						

D. Erstellen Sie eine **Concept Map** zum Thema „Energie“. Rechts sehen Sie ein Beispiel zum Thema „Sonne“. Sie dürfen die komplette Seite dafür verwenden.

* Ergänzen Sie Ihre Concept Map mit dem neu erlernten Wissen oder erstellen Sie eine neue Concept Map.



9.6.6 Lernstandserhebung zum AB 5

A. Kreuze an.

Wie gut kennen Sie sich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	<u>*Jetzt kenne ich mich besser damit aus.</u>
	1	2	3	4	5	
UV Licht						
Lichtabsorption						
Modellexperiment						
Konzentrationszelle						
NERNST-Gleichung						
Solarakku						
Solarenergie						
Energieumwandlung						
Energiespeicherung						
Pluspol						
Minuspol						
Anode						
Kathode						
Redoxreaktion						
Photosynthese						
Elektronendonator						
Elektronenakzeptor						
Oxidation						
Reduktion						
photoelektrochemische Konzentrationszelle						
Antriebsenergie (Dies ist nicht gleichzusetzen mit der Aktivierungsenergie.)						

B. Kreuze an.

Nr.	Ich kann ...	sehr gut				sehr schlecht	<u>*Jetzt kann ich das besser.</u>
		1	2	3	4	5	
1	den Aufbau einer Konzentrationszelle beschreiben.						
2	die Funktionsweise einer photoelektrochemischen Konzentrationszelle erklären.						
3	die Umwandlung von Solarenergie in chemische Energie und diese in elektrische Energie erklären.						
4	die Speicherung von Solarenergie erklären.						

5	die NERNST-Gleichung zum Berechnen von Daten nutzen.						
6	den Zusammenhang zwischen der galvanischen Zelle und der Photosynthese erklären.						
7	über die gesellschaftliche Relevanz und die Bedeutung der Gewinnung und Speicherung elektrischer Energie aus Solarenergie diskutieren.						
8	eine Konzentrationszelle in nachvollziehbarer und übersichtlicher Form skizzieren.						
9	ein Modell auf einen elektrochemischen Vorgang anwenden.						
10	die Grenzen eines Modells aufzeigen.						
11	Hypothesen mithilfe von geplanten Versuchen oder fachlicher Argumentation überprüfen.						

D. Erstellen Sie eine **Concept Map** zum Thema „**Energie**“. Rechts sehen Sie ein Beispiel zum Thema „Sonne“ (s. Kap. 9.6.4). Sie dürfen die komplette Seite dafür verwenden.

* Ergänzen Sie Ihre Concept Map mit dem neu erlernten Wissen oder erstellen Sie eine neue Concept Map.

9.6.7 Lernstandserhebung zum AB 6

A. Kreuze an.

Wie gut kennen Sie sich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	*Jetzt kenne ich mich besser damit aus.
	1	2	3	4	5	
UV Licht						
Lichtabsorption						
Komplementärfarbe						
Wellenlänge						
Energiestufenmodell						
Lichtemission						
Absorptionsmaximum						
Absorptionsspektrum						
Emissionsspektrum						
konjugierte Doppelbindungen						
mesomere Grenzstrukturen						
System delokalisierte Elektronen/ Delokalisiertes Elektronensystem						
Elektronen-Donator bzw. -Akzeptor						

Aromatische Verbindungen						
Spektrum						
Chromophor						
Solvatochromie						
chemisches Gleichgewicht						
bathochrom						
Aggregation						
hypsochrom						
Farbigkeit						
molekularer Schalter						
Polarität						
Gleichgewichtskonstante						
auxochrome und antiauxochrome Substituenten						
Antriebsenergie (Dies ist nicht gleichzusetzen mit der Aktivierungsenergie.)						

B. Beurteilen Sie die folgenden Aussagen.

Nr.	Ich kann ...	sehr gut				sehr schlecht	*Jetzt kann ich das besser.
		1	2	3	4	5	
1	Stoffeigenschaften mit zwischenmolekularen Wechselwirkungen erklären.						
2	den Zusammenhang zwischen Farbigkeit und Molekülstruktur (mithilfe von mesomeren Grenzstrukturen, Delokalisation von Elektronen, Donator-Akzeptor-Gruppen) erklären.						
3	die Farbigkeit ausgewählter organischer Verbindungen vergleichen und erklären.						
4	Absorptionsspektren auswerten und erklären.						
5	den Zusammenhang zwischen Lichtabsorption und Farbigkeit erklären.						
6	Strukturen organischer Verbindungen (z. B. Farbstoffe) visualisieren und beschreiben.						
7	die Beeinflussung der Gleichgewichtslage erläutern.						
8	Massenwirkungsgesetze für ausgewählte Gleichgewichtsreaktionen formulieren.						

C. Beurteilen Sie die folgenden Aussagen.

Nr.	Aussage	richtig	falsch	keine Ahnung
1	Die Molekülstruktur eines Stoffes sagt etwas über die Beweglichkeit seiner Moleküle aus, jedoch nichts über die Farbigkeit eines Stoffes.			
2	Eine bathochrome Verschiebung, die Verschiebung des Absorptionsmaximums nach größeren Wellenlängen, wird auch als Rotverschiebung bezeichnet.			
3	Die Lösungsfarbe eines Farbstoffs ist abhängig von der Polarität der Lösemittel-Moleküle.			
4	Die Wellenlänge des absorbierten Lichts eines Moleküls ist abhängig von der Länge des Chromophors im Molekül.			
5	Solvatochromie bedeutet, dass die Farbe des Lösemittels die Lösungsfarbe des Farbstoffs beeinflusst.			
6	Die Gleichgewichtslage zwischen zwei Isomeren in einer Lösung kann nicht die Farbe der Lösung beeinflussen.			

D. Erstellen Sie eine **Concept Map** zum Thema „**Farbigkeit**“. Rechts sehen Sie ein Beispiel zum Thema „Sonne“ (s. Kap. 9.6.4). Sie dürfen die komplette Seite dafür verwenden.

* Ergänzen Sie Ihre Concept Map mit dem neu erlernten Wissen oder erstellen Sie eine neue Concept Map.

9.6.8 Lernstandserhebung zum AB 7

A. Kreuze an.

Wie gut kennen Sie sich damit aus?	sehr gut				sehr schlecht	* <u>Jetzt kenne ich mich besser damit aus.</u>
	1	2	3	4	5	
UV Licht						
Lichtabsorption						
Fluoreszenz						
Komplementärfarbe						
Wellenlänge						
Energiestufenmodell						
Lichtemission						
elektronischer Grundzustand						
Spin						
höchste besetzte Energiestufe						
niedrigste unbesetzte Energiestufe						
Triplet-Zustand						
Schwingungszustände						
Absorptionsbande						
Absorptionsmaximum						

Absorptionsspektrum						
Emissionsspektrum						
konjugierte Doppelbindungen						
mesomere Grenzstrukturen						
System delocalisierter Elektronen/ delocalisiertes Elektronensystem						
Elektronen-Donator und -Akzeptor						
aromatische Verbindungen						
Photolumineszenz						
Phosphoreszenz						
Auxochrome, Antiauxochrome						
Farbvertiefer						
Farbspektrum						
elektronisch angeregter Zustand						
Substituent						
Chromophor						
bathochrome Verschiebung						
Aggregation						
hypsochrome Verschiebung						
Farbigkeit						
Antriebsenergie (Dies ist nicht gleichzusetzen mit der Aktivierungsenergie.)						

B. Beurteilen Sie die folgenden Aussagen.

Nr.	Ich kann ...	sehr gut				sehr schlecht	* <u>Jetzt kann ich das besser.</u>
		1	2	3	4	5	
1	Stoffeigenschaften mit zwischenmolekularen Wechselwirkungen erklären.						
2	den Zusammenhang zwischen Farbigkeit und Molekülstruktur (mithilfe von mesomeren Grenzstrukturen, Delocalisation von Elektronen, Donator-Akzeptor-Gruppen) erklären.						
3	die Farbigkeit ausgewählter organischer Verbindungen vergleichen und erklären.						
4	Emissionsspektren auswerten und interpretieren.						
5	den Zusammenhang zwischen Lichtabsorption und Farbigkeit erklären.						
6	Strukturen organischer Verbindungen (z. B. Farbstoffe) beschreiben und visualisieren.						

C. Beurteilen Sie die folgenden Aussagen.

Nr.	Aussage	richtig	falsch	keine Ahnung
1	Es gibt Stoffe, die sowohl durch Lichtabsorption als auch durch Lichtemission eine dem menschlichen Auge sichtbare Farbe hervorbringen.			
2	Moleküle gelangen durch die Bestrahlung mit energiereichem Licht in den elektronisch angeregten Zustand.			
3	Den elektronisch angeregten Zustand erreicht das Molekül durch Lichtemission.			
4	Das abklingende Nachleuchten einer Probe nach Ausschalten der UV-LED-Lampe wird in der Regel als Fluoreszenz bezeichnet.			
5	Eine Weinsäure-Matrix kann dafür sorgen, dass die Moleküle des fluoreszierenden Stoffes sich viel schneller bewegen, wodurch der Stoff viel stärker fluoresziert.			
6	Die Molekülstruktur eines Stoffes sagt etwas über die Beweglichkeit seiner Moleküle aus, jedoch nichts über die Farbigekeit eines Stoffes.			
7	Solvatochromie bedeutet, dass die Farbe des Lösemittels die Farbe des zu lösenden Stoffes beeinflusst.			
8	Die Gleichgewichtslage zwischen zwei Isomeren in einer Lösung kann nicht die Farbe der Lösung beeinflussen.			

D. (s. Kap. 9.6.6)

9.7 Deskriptive Statistik zur Hauptstudie

9.7.1 Unterscheidung nach Sekundarstufe

Probandengruppe	Item	Stichprobe	Mittelwert	Standardabweichung
Schüler (alle)	I1	273	7,92	2,026
	I2	261	8,59	1,503
	I4	480	5,95	2,276
	I6	490	7,69	1,994
	I7	445	6,84	2,264
	I8	464	7,74	1,935
	I9	463	7,17	2,340
	I13	471	2,23	0,594
Schüler (Sek I)	I1	20	7,15	2,368
	I4	206	5,08	2,382
	I6	210	7,50	2,146
	I7	185	6,02	2,489
	I8	209	7,63	2,113
	I9	208	6,90	2,575
	I13	198	2,20	0,642

Probandengruppe	Item	Stichprobe	Mittelwert	Standardabweichung
Schüler (Sek II)	I1	253	7,98	1,989
	I2	261	8,59	1,503
	I4	274	6,61	1,955
	I6	280	7,83	1,864
	I7	260	7,43	1,887
	I8	255	7,83	1,774
	I9	255	7,40	2,107
	I13	273	2,26	0,556

9.7.2 Unterscheidung nach Lehrpersonen

Probandengruppe	Item	Stichprobe	Mittelwert	Standardabweichung
Lehrer (alle)	I1	28	8,32	2,229
	I2	28	9,04	1,347
	I3	29	8,45	1,404
	I4	29	7,66	1,653
	I5	23	2,03	0,332
	I6	48	8,73	1,125
	I7	39	7,64	1,842
	I8	40	7,78	1,968
	I9	42	8,07	2,053
	I12	34	8,06	1,999
	I13	65	2,32	0,589
	Lehrer (ohne Workshop)	I1	28	8,32
I2		28	9,04	1,347
I3		29	8,45	1,404
I4		29	7,66	1,653
I5		23	2,03	0,332
I6		29	8,69	1,168
I7		25	8,32	1,464
I8		26	7,85	2,092
I9		28	8,21	2,217
I12		29	7,97	2,079
I13		30	2,27	0,640
Lehrer (ohne Workshop)		I6	19	8,79
	I7	14	6,43	1,869
	I8	14	7,64	1,781
	I9	14	7,79	1,718
	I12	5	8,60	1,517
	I13	35	2,37	0,547

9.7.3 Unterscheidung nach der durchführenden Person

Probanden- gruppe	ausführende Person	Item	Stichprobe	Mittelwert	Standardabweichung
Schüler	Forscher	I1	163	7,99	2,023
		I2	152	8,78	1,434
		I4	341	5,76	2,265
		I6	344	7,96	1,015
		I7	302	6,85	2,302
		I8	322	8,01	1,830
		I9	321	7,35	2,270
		I13	330	2,25	0,609
	Lehrer	I1	110	7,81	2,034
		I2	109	8,32	1,563
		I4	139	6,41	2,245
		I6	146	7,05	2,039
		I7	143	6,83	2,189
		I8	142	7,13	2,032
		I9	142	6,79	2,455
		I13	141	2,18	0,556
Lehrer	Forscher	I1	12	7,50	2,316
		I2	12	9,42	0,996
		I3	12	8,75	1,138
		I4	12	7,08	1,564
		I5	10	1,99	0,182
		I6	12	9,33	0,888
		I7	11	8,45	1,635
		I8	11	8,18	2,401
		I9	12	9,00	1,348
		I12	13	8,08	2,431
		I13	13	2,31	0,630
	Lehrer	I1	16	8,94	2,016
		I2	16	8,75	1,528
		I3	17	8,24	1,562
		I4	17	8,06	1,638
		I5	13	2,05	0,419
		I6	17	8,24	1,147
		I7	14	8,21	1,369
		I8	15	7,60	1,882
		I9	16	7,63	2,579
		I12	16	7,88	1,821
		I13	17	2,24	0,664

9.7.4 Unterscheidung nach Arbeitsblatt

Probanden- gruppe	Arbeitsblatt	Item	Stichprobe	Mittelwert	Standardabweichung
Schüler	1	I1	20	7,15	2,368
		I4	89	5,49	2,436
		I6	91	7,36	2,224
		I7	69	6,61	2,658
		I8	91	7,66	2,001
		I9	90	6,69	2,709
		I13	84	2,17	0,637
	2	I4	117	4,76	2,299
		I6	119	7,61	2,088
		I7	116	6,27	2,360
		I8	118	7,61	2,203
		I9	118	7,06	2,468
		I13	114	2,22	0,648
	3 / 4	I1	74	7,69	1,687
		I2	74	8,38	1,514
		I4	73	6,63	1,867
		I6	75	7,85	1,761
		I7	75	7,37	1,730
		I8	70	7,87	1,632
		I9	70	7,53	2,041
		I13	69	2,25	0,553
	5	I1	99	8,06	2,147
		I2	102	8,73	1,443
		I4	100	6,68	1,699
		I6	101	8,34	1,595
		I7	100	7,23	2,083
		I8	100	8,04	1,705
		I9	100	7,81	1,785
		I13	101	2,29	0,554
	6	I1	55	8,25	1,878
		I2	67	8,43	1,626
		I4	64	7,34	2,010
I6		67	7,19	2,039	
I7		67	7,88	1,813	
I8		67	7,27	1,904	
I9		67	6,69	2,337	
I13		67	2,28	0,572	
7	I1	25	7,92	2,379	
	I2	18	9,22	1,114	
	I4	37	5,08	1,906	
	I6	37	7,54	2,076	
	I7	18	7,11	1,410	
	I8	19	8,61	1,754	
	I9	18	7,28	2,562	
	I13	36	2,14	0,543	

9.8 Organisation der Hauptstudie

9.8.1 Postalische Einladung zur Teilnahme an der Feldstudie



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Bergische Universität Wuppertal, Prof. Dr. M. W. Tausch
Gaußstr. 20, 42119 Wuppertal

Prof. Dr. Michael W. Tausch
Yasemin Yurdanur

Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
Chemie und Ihre Didaktik
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Raum	V.11.027
Telefon	+49 (0)202 43 92 506
Fax	+49 (0)202 43 92 496
Mail	yurdanur@uni-wuppertal.de
Internet	www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de

Datum 13. Dezember 2017

Das aktuelle Angebot an die MINT-EC Schulen in NRW

Liebe Lehrerinnen und Lehrer,

erneuerbare Energien wie die Solarenergie werden im Hinblick auf unsere Energieversorgung in Deutschland und auch global eine wachsende Rolle einnehmen. Deshalb sind wir der Ansicht, dass entsprechend der Beschlüsse der Kultusministerkonferenz über die Bildungsstandards des Faches Chemie in der Schule eine chemische Grundbildung erfolgen muss, die zur aktiven Teilhabe an gesellschaftlicher Meinungsbildung über naturwissenschaftliche Entwicklungen erforderlich ist.

In Wuppertal wurden zahlreiche Experimente entwickelt, an denen die Energieform Licht beteiligt ist. Tausende von Schülerinnen und Schülern haben in unserer Chemie-Labothek diese Experimente mit Begeisterung und großem Interesse durchgeführt, wobei sie hohe Lernerträge erzielten. Nun besteht der nächste Schritt darin, dass photochemische Inhalte nicht mehr nur als Exkurs vom regulären Schulstoff betrachtet, sondern direkt in den alltäglichen Unterricht integriert werden sollen. Dafür haben wir neue Arbeitsmaterialien in Form von experimentellem Equipment, Arbeitsblättern, Modellanimationen, Lehrfilmen u.a. entwickelt, die sich an den aktuellen Kompetenzerwartungen in den Kernlehrplänen des Landes NRW orientieren.

Was genau bieten wir an?

Auf den folgenden Seiten finden Sie die Liste der Themen, der Arbeitsmaterialien und die Listen der nötigen Chemikalien und Geräte, die Sie von uns erhalten können. Zusätzlich schicken wir Ihnen Evaluationsbögen mit denen wir den Lernertrag und die Meinung Ihrer Schülerinnen und Schüler zur Qualitätsoptimierung erfassen möchten. Wir bieten bis zum 10.01.2018 den ersten 20 interessierten Schulen in NRW eine Ausstattung gratis an, wenn sie sich bereit erklären, diese einzusetzen und an der bis Ende 2018 laufenden Evaluation teilzunehmen.

Wir bedanken uns für Ihr Interesse und freuen uns auf Ihre Rückmeldung!

Mit freundlichen Grüßen,

Prof. Dr. Michael W. Tausch

Yasemin Yurdanur

Themen der Arbeitsmaterialien im Bereich Photochemie

Ansprechpartner/in an Ihrer Schule: _____

Telefonnummer und/oder E-Mail: _____

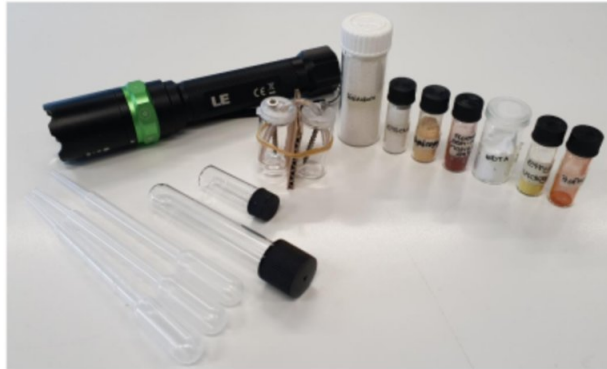
Bitte kreuzen Sie hier die für Ihre Schule gewünschten Themen an. Auf den nächsten Seiten finden Sie ein Beispiel zu den Arbeitsblättern und Listen der ausgewählten Chemikalien und Geräte, die Sie bei uns dazu bestellen können.

Thema	Inhaltsfeld laut Kernlehrplan in NRW	Stufe	benötigtes Vorwissen	Kreuzen Sie hier an.
1. Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft ?	Stoffe und Stoffveränderungen	I 7.Kl.	-für Teil 1: kein Vorwissen benötigt -für Teil 2: Einfaches Teilchenmodell	
2. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zu Stoff- und Energieumsätzen	Stoff- und Energieumsätze bei chemischen Reaktionen	I 7-8.Kl.	- Oxidation -Luftzusammensetzung -Reaktionsschemata -Photosynthese (Biologie, Sek I)	
3. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur (<i>Chemieunterricht</i>)	Kohlenstoffverbindungen und Gleichgewichtsreaktionen	II EP	-Reaktionsschemata -Photosynthese (Biologie, Sek I) -Energiefluss und Stoffkreisläufe (Biologie, Sek I)	
4. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur (<i>Biologieunterricht</i>)	Ökologie (Dieses Thema ist auch für den Biologieunterricht geeignet.)	II QP	-Reaktionsschemata -Photosynthese (Biologie, Sek I) -Energiefluss und Stoffkreisläufe (Biologie, Sek I)	
5. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zur Energieumwandlung und -speicherung in einer lichtgetriebenen Konzentrationszelle	Elektrochemie	II QP	-galvanische Zelle -Konzentrationszelle -NERNST-Gleichung (nur für eine unabhängige Aufgabe) -Photosynthese (Biologie, Sek I)	
6. Solvatochromie – Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Farbstoffs in verschiedenen Lösemitteln	Organische Produkte-Werkstoffe und Farbstoffe	II QP	-zwischenmolekulare Wechselwirkungen -Polarität -chemisches Gleichgewicht -Energiestufenmodell -Spektrum und Lichtabsorption -Molekülstruktur und Farbigekeit	
7. Photolumineszenz – Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)	Organische Produkte-Werkstoffe und Farbstoffe	II QP	-zwischenmolekulare Wechselwirkungen -Energiestufenmodell -Spektrum und Lichtabsorption -Molekülstruktur und Farbigekeit	

Alle Arbeitsblätter finden Sie auch **online** unter folgendem Link:

[Link wird Anfang Februar 2018 freigeschaltet]

In der folgenden Abbildung ist die komplette von der Universität gestellte Ausstattung zu sehen. Die Gerätschaften und Chemikalien werden für eine Lerngruppe á 30 Lernende vorbereitet.



Die drei folgenden Themen benötigen zum Teil gleiche Chemikalien und Materialien:

1. Farbe – (K)eine charakteristische Stoffeigenschaft?
6. Solvatochromie – Unterschiedliche Farben von Lösungen eines Farbstoffs in verschiedenen Lösemitteln
7. Photolumineszenz – Leuchtfarben (Fluoreszenz und Phosphoreszenz)

Chemikalien und Geräte	Thema	Kreuzen Sie hier an.
Esculin (1 g)	6,7	
Fluoreszein Natriumsalz (1 g)	6,7	
Spiropyran (1 g)	1,6,7	
Schraubdeckelgläser (40 Stück)	1,6,7	
Pipetten (40 Stück)	1,6,7	
Weinsäure (30 g)	6	
Taschenlampe mit Farbwechsel		

Hinweise:

Die Chemikalien sind für den Einsatz im Schulunterricht erlaubt. Zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung nutzen Sie bitte die RISU und die Stofflisten der DGUV, welche Sie auch online finden.

Die Gewichtsmengen der bestellbaren Chemikalien reichen, wenn für jede Lerngruppe die Lösungen neu angesetzt werden, für mindestens 10 Lerngruppen á 30 Lernenden. Da jedoch die Lösungen 3-4 Monate haltbar sind, können mit den angesetzten Lösungen sogar viel mehr Lerngruppen arbeiten.

Die vier folgenden Themen benötigen zum Teil gleiche Chemikalien und Materialien:

2. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zu Stoff- und Energieumsätzen
3. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur
(Chemieunterricht)
4. Photo-Blue-Bottle – Ein Modellexperiment zum Kohlenstoffkreislauf in der belebten Natur
(Biologieunterricht)
5. Das Modellexperiment Photo-Blue-Bottle – Energieumwandlung und -speicherung

Chemikalien und Geräte	Thema	Kreuzen Sie hier an.
Ethylviologen (561 mg)	2,3,4,5	
EDTA (2,8 g)	2,3,4,5	
Proflavin (15,5 mg)	2,3,4,5	
Konzentrationszellen (16 Stück)	5	
kleine Schraubdeckelgläser (40 Stück)	2,3,4,5	
Pipetten (40 Stück)	2,3,4,5	
Taschenlampen mit Farbwechsel		

Hinweise:

Die Chemikalien sind für den Einsatz im Schulunterricht erlaubt. Zur Erstellung der Gefährdungsbeurteilung nutzen Sie bitte die RISU und die Stofflisten der DGUV, welche Sie auch online finden.

Die Gewichtsmengen der bestellbaren Chemikalien reichen, wenn für jede Lerngruppe die Lösungen neu angesetzt werden, für ca. 3 Lerngruppen á 30 Lernenden (5. Arbeitsblatt) und für ca. 12 Lerngruppen á 30 Lernenden (2., 3., und 4. Arbeitsblatt). Da jedoch die Lösungen 3-4 Monate im Dunkeln haltbar sind, können mit den angesetzten Lösungen sogar viel mehr Lerngruppen arbeiten.

9.8.2 Postalische Bestätigung der Teilnahmeberechtigung an der Feldstudie



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
Chemie und Ihre Didaktik
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Raum	V.11.075
Telefon	+49 (0)202 43 92 306
Fax	+49 (0)202 43 92 496
Mail	yurdanur@uni-wuppertal.de
Internet	www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de

Liebe Lehrerinnen und Lehrer,

vielen Dank für Ihre Rückmeldung!

Sie gehören zu den ersten 20 Schulen, die Ihr Interesse an unserem Angebot gezeigt haben.

Deshalb freuen wir uns Ihnen mitteilen zu dürfen, dass Sie die Chemikalien und Geräte, die Sie in den dafür vorgesehenen Listen angekreuzt haben, gratis von uns erhalten.

Damit haben Sie sich auch bereit erklärt, an der bis Ende 2018 laufenden Evaluation teilzunehmen, d.h. die Materialien einzusetzen und uns bis zum 08.01.2019 die von Ihren Schülerinnen und Schülern ausgefüllten Evaluationsbögen zu zusenden.

Sie erhalten von uns:

- Die Gratis-Ausstattung mit Chemikalien und Geräten
- Den Internet-Link für die Arbeitsblätter und weiteren Materialien + die Zugangsdaten dafür
- Die Feedbackbögen für die Lehrperson und den Lernenden
- Hinweise und Anleitung zur Feldstudie
- Eine praktische Einführung in die Experimente durch uns hier an der *Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, Gebäude V, Ebene 11, Raum V.11.075, Chemiedidaktik* an einem der folgenden Termine: 20.01.2018, 10.30 -13 Uhr, 02.02.2018, 15.30-18.00 Uhr oder 03.02.2018, 10.30 -13 Uhr. Im Anschluss können Sie die Materialien gleich mitnehmen.

Es wäre sinnvoll und hilfreich für Sie, einen der Termine zur praktischen Einführung wahrzunehmen, weil Sie schnell und effizient mit den Experimenten und Materialien vertraut würden und das Paket mit Geräten, Chemikalien und didaktischen Materialien gleich mitnehmen könnten. Sie würden einen Einblick in die Einsatzmöglichkeiten der Arbeitsmaterialien bekommen. Sollten Sie nicht kommen können oder wollen, schicken wir Ihnen die Materialien dennoch wie versprochen Ende Februar 2018 zu.

Da Sie beim Experimentieren hauptsächlich Lichtenergie einsetzen werden, bekommen Sie eine Taschenlampe (mit UV-Licht und der Farbwechselfunktion) gratis von uns. Jedoch ist es empfehlenswert für Gruppenarbeiten ca. 6-7 UV-LED-Taschenlampen und Taschenlampen mit Farbwechsel (oder beide Funktionen in einer Taschenlampe) zusätzlich anzuschaffen. Es handelt sich hierbei um eine Summe von ca. 200-300 €. Sie können einen Antrag dafür an die FCI (→ Lehrkooperationen) stellen. Rufen Sie am besten vorher die FCI an, um eventuell mehr über Fördergelder zu erfahren.

Wir bitten Sie, uns möglichst zeitnah per e-mail mitzuteilen, ob Sie und welchen Termin Sie zur praktischen Einführung wahrnehmen möchten. Bitte geben Sie uns – wenn bereits möglich – die Klassenstufen/Kurse an, die an der Feldstudie bis Ende 2018 teilnehmen werden.

Wir warten gespannt auf Ihre Antwort und freuen uns auf die Zusammenarbeit mit Ihnen.

Mit freundlichen Grüßen,

Yasemin Yurdanur und Prof. M. W. Tausch



**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Prof. Dr. Michael W. Tausch
Yasemin Yurdanur

Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
Chemie und Ihre Didaktik
Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

Raum	V.11.075
Telefon	+49 (0)202 43 92 506
Fax	+49 (0)202 43 92 496
Mail	yurdanur@uni-wuppertal.de
Internet	www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de
Datum	19.01.2018

Liebe Chemielehrerinnen und Chemielehrer,

hiermit erhalten Sie die von Ihnen gewünschte Ausstattung.

Zusatzinformationen

Alle Arbeitsmaterialien (Arbeitsblätter und digitalen Ergänzungen dazu) finden Sie unter folgendem Link:

<http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/lehre/photo-like/index.html>

Für einige Dateien benötigen Sie folgende Zugangsdaten:

Benutzername: my_photo

Passwort: LIKE

Damit die Teilnahme an der Evaluation und der Einsatz der Materialien so gut wie möglich abläuft, können Sie telefonisch oder per Mail bei allen möglichen Fragen mich kontaktieren.

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Mit freundlichen Grüßen,

Yasemin Yurdanur

9.8.3 Hinweise zur Feldstudie



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL



CHEMIE
UND IHRE
DIDAKTIK

Hinweise zur Feldstudie

Vorgehensweise:

1. **Vor-Test:** Teilen Sie den Schülerinnen und Schülern die Lernstandserhebung aus und geben Sie Ihnen für diesen Vor-Test ausreichend Zeit (ca. 20-30 min). Die mit einem Sternchen* markierten Stellen und der Feedbackbogen sind erst für den Nach-Test nötig! Sammeln Sie den Lernstandserhebungsbogen nicht wieder ein. Die Schülerinnen und Schüler dürfen diesen jedoch nicht verlieren.
2. **Unterricht zum ausgewählten Thema:** Führen Sie Ihren Unterricht mit dem entsprechenden Arbeitsblatt, den Materialien und Chemikalien durch.
3. **Nach-Test und Feedback:** Die Schülerinnen und Schüler füllen den Lernstandserhebungsbogen den sie behielten, erneut aus, indem sie alle Aufgaben noch einmal ergänzend (gekennzeichnet durch *) bearbeiten. Dieses Mal sollte eine andere Farbe zum Schreiben verwendet werden. Zusätzlich füllen die Lernenden den Feedbackbogen aus. Die Lehrperson füllt den „Feedbackbogen für die Lehrerinnen und Lehrer“ aus. Hinweis: Bitte achten Sie zur Berücksichtigung der Reliabilität des Tests darauf, dass die Lernenden zur Bearbeitung der Aufgabe C (Themen 2,3,4,5) bzw. D (Themen 1,6,7) auf dem Fragebogen die Liste unter Aufgabe A nicht zu Hilfe nehmen. Je nach Gestaltung Ihres Unterrichts können bestimmte Feedback-Fragen oder Test-Aufgaben irrelevant für Sie und Ihre Schülerinnen und Schüler sein.
4. Bitte füllen Sie die Tabelle auf der Rückseite aus und legen Sie diese den Evaluationsbögen (Lernstandserhebungsbogen + Feedbackbogen) bei. Jede Lehrperson füllt für jedes ausgewählte und behandelte Thema einen separaten Feedbackbogen aus.
5. Senden Sie diese Unterlagen an folgende Adresse und benachrichtigen Sie mich darüber per Mail:
Yasemin Yurdanur
Bergische Universität Wuppertal
Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften
Chemie und Ihre Didaktik
Gaußstraße 20
42119 Wuppertal

Hinweis

Die Bearbeitung eines kompletten Arbeitsblattes würde die Umsetzung eines Gesamtkonzepts, die erfahrungsgemäß ca. zwei bis drei Doppelstunden in Anspruch nimmt, bedeuten. Natürlich hat die Lehrperson die Möglichkeit, je nach Bedarf einzelne Aufgaben zu eliminieren. Es ist nicht verpflichtend, alle Aufgaben des Arbeitsblatts zu nutzen. Wichtig und entscheidend ist der Einsatz der Experimente im Zusammenhang mit den ausgewählten Aufgaben. Bitte beachten Sie die Zusatzmaterialien zu den Arbeitsblättern auf der angegebenen Internetseite, wovon einige zur Bearbeitung der Aufgaben nötig sind.

Vielen Dank!

Informationen von der Lehrperson zur Umsetzung der Feldstudie

Thema des ausgewählten Arbeitsblatts	
Anzahl der teilnehmenden Schülerinnen und Schüler	
Dauer des Vor-Tests (1)	
Dauer des Unterrichts zum ausgewählten Thema (2)	
Dauer des Nach-Tests + Feedback (3)	
Zeitlicher Abstand zwischen der letzten Unterrichtsstunde zum Thema und des Nach-Tests.	
Schildern Sie Ihre Vorgehensweise, Unterrichtsphasen und Methoden.	
Welche Aufgaben des entsprechenden Arbeitsblatts sollten die Schülerinnen und Schüler bearbeiten?	

9.8.4 Zusätzliche Hinweise zu den Experimenten

<p>AB 7 - E3</p> <p>Die Weinsäure-Schmelze sollte nicht zu lange in der Flamme gehalten werden. Dadurch wird verhindert, dass die Schmelze eine braune Farbe annimmt. Sobald die Weinsäure-Schmelze vorliegt, wird Esculin bzw. Fluoreszein hinzugefügt. Wenn ein "Standard-Reagenzglas" zwei Finger breit mit Weinsäure gefüllt wird, reicht die Menge an Fluoreszein, die auf dem Foto zu sehen ist, völlig aus. Vom Esculin sollte ca. fünf- bis siebenfach so viel genutzt werden. Danach darf die Schmelze nicht mehr in die Flamme gehalten werden! Bevor sie fest wird, sollte sie schnell in der Innenwand verteilt werden.</p>	
<p>AB 1 - Teil 2; AB 6; AB 7 - E2</p>	
<p>Durch die Bestrahlung mit ultraviolettem Licht nehmen die drei Lösungen jeweils eine Farbe an. Durch das Bestrahlen mit grünem Licht werden die Lösungen farblos bzw. nehmen die Lösungen jeweils ihre ursprüngliche Farbe an.</p>	
<p>AB 1 - Teil 2; AB 2 - E1; AB 3/4 - E1; AB 5 - E1; AB 6; AB 7 - E2</p>	
<p>Zum Bestrahlen der Lösungen sollte die Taschenlampe direkt an das Glas gehalten werden, in dem sich die Lösung befindet. Aus einer größeren Entfernung muss sonst viel länger bestrahlt werden.</p>	
<p>AB 2 - E1; AB 3/4 - E1; AB 5 - E1</p>	
<p>Die drei Chemikalien (Proflavin, Ethylviologen, EDTA) liegen in den kleinen Glasbehältern bereits entsprechend der Photo-Blue-Bottle-Lösung abgewogen vor. Nachdem die kleinen Glasbehälter geleert worden sind, sollte der Rest der Chemikalien in den Glasbehältern mit Wasser (Lösemittel der Photo-Blue-Bottle-Lösung) in die Photo-Blue-Bottle-Lösung ausgespült werden. So wird die komplette abgewogene Menge an Chemikalien genutzt.</p>	
<p>AB 7 - E3</p>	
<p>Das Nachleuchten (die Phosphoreszenz) der Fluoreszein-Weinsäure-Matrix ist im Vergleich zu der Esculin-Weinsäure-Matrix länger und deutlicher wahrzunehmen. Die Esculin-Weinsäure-Matrix leuchtet (je nach Herstellung) sogar nur kürzer als eine Sekunde nach.</p>	
<p>AB 1 Einstieg</p>	
<p>Wenn das Prisma mit der längeren Kante senkrecht zum Boden aufgestellt wird und die Strahlen auf eine Seitenfläche einfallen, ist der zu erwartende Effekt viel besser zu erreichen. Der Abstand des Blattes sollte so lange variiert werden, bis das Spektrum auf diesem zu sehen ist.</p>	
<p>AB 1 - Teil 1, Teil 2; AB 7 - E1, E2, E3</p>	
<p>Für diese Experimente können zum Beobachten der Lösungen im Dunkeln aus den Taschenlampenverpackungen, Schuhkartons etc. kleine "Dunkelkammern" gebastelt werden. Von oben wird bestrahlt und von der Seite kann durch ein Guckloch beobachtet werden.</p>	

Curriculum Vitae

Ausbildung

- 2009 **Helmholtz-Gymnasium Dortmund**
Allgemeine Hochschulreife (1,1)
- 2009-14 **Universität Paderborn**
Lehramtsstudium der Fächer Chemie (6. Fachsem.) und
Mathematik (7. Fachsem.)
1. Staatsexamen (1,5)
Staatsexamensarbeit in der Chemiedidaktik (Prof. Dr. H.-
J. Becker) zum Thema *Chemische Bildung in der Türkei* (1,0)
- 2015-16 **Zentrum für schulpraktische Lehrerausbildung Krefeld**
Referendariat am Mataré Gymnasium in Meerbusch
2. Staatsexamen (1,3)

Lehrerfahrung

- 2012, 2014/15 Vertretungslehrkraft am Gymnasium für das Fach
Mathematik im Kreis Soest
- 2016-19 Betreuung der Praktikumsveranstaltung *Schulorientiertes
Experimentieren I (Allgemeine, anorganische und physikalische
Chemie)*
- 2016-20 Leitung der Seminare *Methodik und Didaktik I und II*
- 2017 Betreuung der praxisbezogenen Veranstaltung
Experimentierorientierte Unterrichtseinheit
- 2017-19 Betreuung der Praktikumsveranstaltung *Schulorientiertes
Experimentieren II (Organische Chemie)*
- 2017-20 Betreuung von Lehrerfortbildungen

Sonstige Tätigkeiten

- 2010-11 Einjähriges Praktikum zum Teamer beim Studienkompass
- 2010-11 Studentische Hilfskraft im Institut für Elektrotechnik,
Informatik und Mathematik der Universität Paderborn
- 2011-12 Mitarbeit an dem vom BMBF geförderten ZEITLast-
Projekt an der Universität Paderborn
- 2011-14 Ehrenamtliche Mitarbeit bei der Studien- und
Berufswahlorientierung von Abiturienten
- 2012-14 Vertrauensperson beim Studienkompass der Stiftung der
Deutschen Wirtschaft (sdw)
- 2014 Wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Chemiedidaktik
der Universität Paderborn

Publikationen

- [1] Brunnert, R.; Yurdanur, Y.; Tausch, M. W. (2019). Towards Artificial Photosynthesis in Science Education. *World Journal of Chemical Education*; 7/2, 33-39.
- [2] Yurdanur, Y.; Tausch, M. W. (2019). Metamorphoses of an Experiment - From Hightech UV Immersion Lamp Reactor to Low-Cost TicTac®-Cell. *CHEMKON*, 26/3,125-129.
- [3] Brunnert, R.; Bohrmann-Linde, C.; Meuter, N.; Pereira Vaz, N.; Spinnen, S.; Yurdanur, Y.; Tausch, M. W. (2019). Photons and Molecules: Basic Concepts of Photochemistry in Video Tutorials. In Norbert Hoffmann, Editor, *EPA Newsletter Band 96 aus EPA Newsletter*, 70-77.
- [4] Rainer Brunnert; Claudia Bohrmann-Linde; Nico Meuter; Nuno Pereira Vaz; Sebastian Spinnen; Yasemin Yurdanur; Michael W. Tausch (2019). The Fascinating World of Photochemistry. *Educacion Quimica*, 29/3, 108.
- [5] Tausch, M. W.; Bohrmann-Linde, C.; Meuter, N.; Spinnen, S.; Yurdanur, Y.; Pereira Vaz, N.; Drude, N. (2017). The Fascinating World of Photochemistry. *Beilstein.TV*.
- [6] Tausch, M. W.; Bohrmann-Linde, C.; Meuter, N.; Spinnen, S.; Yurdanur, Y.; Pereira Vaz, N.; Drude, N. (2017). Photochemie und andere interessante Untersuchungen. *Beilstein.TV*.
- [7] Meuter, N.; Spinnen, S.; Yurdanur, Y.; Tausch, M. W. (2017). Photonen und Moleküle. *CHEMKON*, 24/4, 265-271.
- [8] Meuter, N.; Spinnen, S.; Yurdanur, Y.; Tausch, M. W. (2020). Spiropyran – ein didaktisches Multitalent. *CHEMKON*, akzeptiert.

Workshops

- | | |
|---------|---|
| 2017-18 | Praktische Einführung zu photochemischen Experimenten aus PHOTO-LIKE (vier Veranstaltungen, Wuppertal) |
| 2018 | Lampen, Lichter, Leuchten – Interdisziplinäre, innovative, photochemische Schulexperimente (Göttingen) |
| 2018 | Photosynthese und Atmung en miniature mit Herrn Prof. Dr. Tausch (Graz) |
| 2019 | Lichtlabor Pflanze mit Herrn Prof. Dr. Tausch (Wien) |
| 2019 | NEIK (Nachhaltige Experimente, Innovative Konzepte): Lichtlabor Pflanze mit Herrn Prof. Dr. Tausch (Berlin) |

Stipendien, Förderung

- 2009-14 Stipendium der Stiftung der deutschen Wirtschaft (sdw),
Aufnahme in das *Studienkolleg*
(Begabtenförderungsprogramm für Lehramtsstudierende)
- 2009-11 Stipendium der *Studienstiftung des deutschen Volkes* (SDV)
- 2017-2018 Finanzielle Förderung durch den *Fonds der Chemischen Industrie* (FCI) im Rahmen der Promotion

Mitgliedschaften

- *Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.* (GDCh), Fachgruppe Chemieunterricht
- *Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts* (MNU)
- *Verband Bildung und Erziehung* (VBE)