
Experimentelle und didaktische
Erschließung des Themenfeldes
Photoreformierung zur Herstellung von
„grünem“ Wasserstoff als Beitrag zu BNE
im Chemieunterricht

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Naturwissenschaften
(*Dr. rer. nat.*)

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

von

Julian Venzlaff
geb. in Solingen

Wuppertal, im April 2024

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von Mai 2020 bis April 2024 im Arbeitskreis Didaktik der Chemie der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde.

1. Gutachterin: Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde
2. Gutachter: Herr Prof. Dr. Michael W. Tausch

Tag der mündlichen Prüfung: 24.07.2024

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig im Arbeitskreis Didaktik der Chemie unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde 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 17.04.2024

(Julian Venzlaff)

Danksagung

Mein erster Dank gilt meiner Doktormutter Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde für ihre herzliche Aufnahme in den Arbeitskreis. Ihr ganz besonders ist die tolle und kollegiale Atmosphäre im Arbeitskreis zu verdanken, die diese Arbeit und mich wachsen ließen. Ich danke, die Chance erhalten zu haben, ein Thema erarbeiten zu dürfen, dass für mich persönlich einen hohen Stellenwert besitzt. Bedanken möchte ich mich auch dafür, dass Frau Prof. Bohrmann-Linde mir stets bei Fragen und Anliegen zur Seite stand und mit konstruktiven Anregungen den Entwicklungsprozess dieser Dissertation mit ihren Ideen fortwährend förderte.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Michael W. Tausch für seine Bereitschaft, diese Arbeit als Experte photochemischer Prozesse zu begutachten. Durch ihn lernte ich während meines Studiums an der Bergischen Universität Wuppertal die Begeisterung für diesen Bereich kennen und schätzen.

Auch bedanke ich mich bei allen aktiven und ehemaligen Mitgliedern des Arbeitskreises Bohrmann-Linde und denen des Arbeitskreises von Herrn Prof. Tausch sowohl für die Aufnahme als auch stete kollegiale Unterstützung während meiner Arbeit. Besonderer Dank gilt namentlich meinen Bürokollegen Ingrid Reisewitz-Swertz und Dr. Nico Meuter, die mir immer mit Rat, Tat und Unterstützung beiseite standen sowie Yvonne Grauer, die mich über zehn Jahre als gute Freundin, Kommilitonin und schließlich Mitarbeiterin auf meinem Weg begleitet hat. Meiner lieben Kollegin Elisabeth Kiesling möchte ich für die produktive Zusammenarbeit in verschiedenen Projekten, Workshops und Fortbildungen danken und für ihr offenes Ohr in so vielen Lebenslagen. Dr. Jana Hübner danke ich für die vielen gemeinsamen Jahre, in denen ich – seit Beginn meines Studiums – von ihrer fachlichen Kompetenz profitieren konnte. Nuno Pereira Vaz und Dr. Richard Kremer danke ich für ihre immer herzliche und unterstützende Art und ihre Expertise in Fachfragen. Bei Dr. Diana Zeller und Dr. Rebecca Grandrath bedanke ich mich besonders für die vielen förderlichen Gespräche in Büro, Labor und auf dem Flur. Danken möchte ich auch den neuesten Mitgliedern im Arbeitskreis Bohrmann-Linde, Dr. Lena Halbrügge und Dr. Abigail Feceu sowie allen studentischen Hilfskräften des Arbeitskreises.

Danken will ich zudem allen Unterstützern, die als Lehrkräfte, Studierende und Schülerinnen und Schülern an Projekten, Befragungen und Evaluationen teilgenommen haben. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Sarah Lerlei und Carolin Wisser, die im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten meine Versuchsaufbauten erproben konnten und dabei wertvolle Ergebnisse generieren konnten. Auch möchte ich einen Dank an all diejenigen richten, die mir in den vergangenen vier Jahren kollegial oder menschlich auf unterschiedlichste Weisen begegneten und einen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Schließlich bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meinen Eltern Bärbel und Horst, meinen Brüdern Hendrik und Frederik und ihren Familien für ihre Wärme und Fürsorge in vielen, nicht nur leichten Lebenssituationen. Herzlich danken will ich auch meinem Freund Karsten, der diesen Prozess in gleichem Maße unterstützte. Ohne sie wäre ich nicht an dem Punkt, an dem ich heute stehe.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
1.1.	Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft	1
1.2.	Kernanliegen Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)	3
1.3.	Zielsetzung und Aufbau	4
2.	Wasserstoff - Energieträger der Zukunft?	6
2.1.	Die Farben des Wasserstoffs	7
2.1.1.	Grauer Wasserstoff	8
2.1.2.	Blauer Wasserstoff	10
2.1.3.	Türkiser Wasserstoff	11
2.1.4.	Grüner Wasserstoff	12
2.1.5.	Grüner Wasserstoff - Der Lösungsweg?	15
2.2.	Wasserstoff - Potentiale eines zukünftigen Energieträgers	17
2.2.1.	Wasserstoff im Energiesektor	18
2.2.2.	Wasserstoff und „grüner“ Stahl	19
2.2.3.	Wasserstoff und Mobilität	22
2.2.4.	Chancen und Herausforderungen	28
3.	Photoreformierung: theoretische Grundlagen	29
3.1.	Photokatalyse und Photoreformierung - Definition zweier Begriffe	29
3.2.	Photoreformierung - Grundlegende Entwicklungen	33
3.2.1.	Water-Splitting	33
3.2.2.	Erste Erfolge von Kawai und Sakata	34
3.3.	Photoreformierung - aktueller Forschungsstand	36
3.3.1.	Grundlegende Prozessschritte der Photoreformierung	37
3.3.2.	Einsetzbare Substrate	39
3.3.3.	Photoreformierung von Alkoholen	40
3.3.4.	Photoreformierung von Zuckern	48
3.3.5.	Photoreformierung von Polysacchariden - Beispiel Stärke und Cellulose	51
3.3.6.	Biomasse und Kunststoffe als Substrate	53
3.4.	Einfluss des Photokatalysators auf die Photoreformierung	54
3.4.1.	Varianten nutzbarer Photokatalysatoren auf Basis von Titan-dioxid	55
3.4.2.	Weitere Photokatalysatoren für die Photoreformierung	58
3.5.	Photoreformierung - Möglichkeiten einer industriellen Umsetzung	59
3.6.	Potentiale und Herausforderungen der Photoreformierung	62

4.	Von der Forschung an die Schule	66
4.1.	Uni fragt Schule: Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht	66
4.1.1.	Fragebogen	66
4.1.2.	Durchführung	69
4.1.3.	Ergebnisse	69
5.	Photoreformierung: Experimentelle Konzeption	74
5.1.	Anforderungen an praktische Umsetzung von Experimenten in der Schule	74
5.2.	Vorbereitungen zum Versuch Photoreformierung	75
5.3.	Herstellung des Photokatalysators	75
5.4.	Versuchskonzept 1: Schott-Glas (Großer Aufbau)	77
5.4.1.	Materialien	77
5.4.2.	Versuchsdurchführung	77
5.4.3.	Ergebnisse	79
5.4.4.	Versuchserprobungen mit Glucose	79
5.4.5.	Versuchserprobungen mit Alkoholen	81
5.4.6.	Versuchserprobungen mit Wasser	82
5.4.7.	Versuchserprobungen mit Stärke und Cellulose	83
5.4.8.	Variation des Photokatalysators	84
5.4.9.	Diskussion	85
5.5.	Aufbau im UV-Tauchlampenreaktor	86
5.6.	Versuchskonzept 2: Reagenzglas (kleiner Aufbau)	87
5.6.1.	Materialien	87
5.6.2.	Versuchsdurchführung	87
5.6.3.	Ergebnisse zur Photoreformierung von Ethanol	88
5.6.3.1.	Analyse der Gasproben	90
5.6.3.2.	Untersuchung der wässrigen Phase - Bildung von Ethanal	92
5.6.4.	Langzeitbestrahlung	93
5.6.5.	Änderung des Volumenanteils von Ethanol	96
5.6.6.	Temperatur als Einflussfaktor	97
5.6.7.	Varianz der Menge an Photokatalysator	98
5.6.8.	Wiederholte Einsatz des Photokatalysators	99
5.6.9.	Versuchserprobungen mit weiteren Alkoholen und Zuckeralkoholen	100
5.6.10.	Versuchserprobungen mit Zuckern	103
5.6.11.	Versuchserprobungen mit Stärke	106
5.6.12.	Versuchserprobungen mit Cellulose	107

5.6.13.	Versuchserprobungen mit anderen Naturstoffen und Lebensmitteln	109
5.6.14.	Variation der Lichtquellen	112
5.6.15.	Unterschiede bei der Nutzung von Quarz- und Borosilicatglas	114
5.7.	Zwischenfazit der experimentellen Erprobungen	115
6.	Didaktische Überlegungen	117
6.1.	Einleitung	117
6.2.	Bildung für Nachhaltige Entwicklung	118
6.2.1.	Agenda 2030/BNE 2030	122
6.2.2.	Green Comp.	124
6.3.	Nationale Vorgaben	125
6.3.1.	Lernbereich globale Entwicklung	125
6.3.2.	Landesvorgaben für NRW	125
6.3.2.1.	Anfänge seit 2004	125
6.3.2.2.	Leitlinie BNE NRW	126
6.3.3.	Blick auf andere Bundesländer	128
6.4.	Herausforderungen von BNE bis heute	129
6.5.	Verlaufspläne BNE im Chemieunterricht	132
6.6.	Wasserstoff und Photoreformierung im schulischen Kontext: Anker-punkte	136
6.6.1.	Lehrpläne NRW	136
6.6.2.	Bezüge in Lehrplänen anderer Bundesländer	138
6.6.3.	Schulbücher	141
6.6.4.	Zwischenfazit	143
6.7.	Materialentwicklung	143
6.7.1.	Material zum Experiment Photoreformierung	145
6.7.1.1.	Farben des Wasserstoffs	148
6.7.1.2.	Ökologische Dimension	149
6.7.1.3.	Ökonomische Dimension	149
6.7.1.4.	Soziale Dimension	150
6.7.1.5.	Exkurs „Grüner Stahl“	151
6.7.2.	Weitere Materialien	151
6.7.2.1.	Photoreformierung von Ethanol als Video	152
6.7.2.2.	„BNE unter Einbezug von Titandioxid“	152
6.8.	Einblicke in praktische Erprobungen mit Lernenden und mit Lehrkräften im Rahmen von Workshops und Lehrkräftefortbildungen	155
6.8.1.	Girls'Day 2022 (28.04.2022)	156
6.8.2.	MINT-Tag NRW 2022 (26.08.2022)	158
6.8.3.	Lehrkräftefortbildung 16.11.2022 an der BUW	162

6.8.4.	Erprobungen im Rahmen des Schülerlabors „Wege aus der Klimakrise“	166
6.8.4.1.	Ziele der Schülerlabor-Einheit	167
6.8.4.2.	Aufbau und Struktur der Schülerlabor-Einheit	168
6.8.4.3.	Struktur des Versuchsblocks Photoreformierung	168
6.8.4.4.	Erprobung mit Studierenden (30.01.2023)	169
6.8.4.4.1.	Gesamtergebnis der Erprobung mit Studierenden	170
6.8.4.4.2.	Ergebnisse der Durchführung des Versuchsblocks Photoreformierung mit Studierenden	171
6.8.4.5.	Erprobung mit Schülerinnen und Schülern (13.02.2023)	173
6.8.4.5.1.	Gesamtergebnis der Erprobung mit Schülerinnen und Schülern	174
6.8.4.5.2.	Ergebnisse der Durchführung des Versuchsblocks Photoreformierung mit Schülerinnen und Schülern	175
6.8.5.	Lehrkräftefortbildung „Wege aus der Klimakrise“ 25.10.2023	177
6.8.6.	Lehrkräftefortbildung 13.12.2023	181
6.9.	Fazit der Erprobungen	183
7.	Schlussbetrachtung	186
8.	Verzeichnisse	189
8.1.	Abkürzungsverzeichnis	189
8.2.	Abbildungsverzeichnis	190
8.3.	Tabellenverzeichnis	194
8.4.	Literaturverzeichnis	195
8.5.	Publikationsverzeichnis	210
9.	Anhang	211
9.1.	Verwendete Materialien und Chemikalien	211
9.2.	Emissionsspektren der genutzten Lichtquellen	213
9.3.	Gefährdungsbeurteilung Photoreformierung von Ethanol	215
9.4.	Begleitmaterialien zum Versuch Photoreformierung	218
9.5.	Erwartungshorizont zum Begleitmaterial	229

Die damalige Zeit

„Es war die beste und die schlimmste Zeit, ein Jahrhundert der Weisheit und des Unsinns, eine Epoche des Glaubens und des Unglaubens, eine Periode des Lichts und der Finsternis. Es war der Frühling der Hoffnung und der Winter des Verzweifeln. Wir hatten alles, wir hatten nichts vor uns; wir steuerten alle unmittelbar dem Himmel zu und auch alle unmittelbar in die entgegengesetzte Richtung – mit einem Wort, die Periode glich der unsrigen so wenig, dass ihre lärmendsten Tonangeber im Gutem wie im Bösen nur den Superlativgrad des Vergleichens auf sie angewendet wissen wollten.“

Charles Dickens, Eine Geschichte zweier Städte, 1859

1. Einleitung

1.1. Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft

Dass die Welt sich seit dem 20. Jahrhundert in zahlreichen Bereichen wie der Wirtschaft, der Abhängigkeit verschiedener Wirtschaftszweige, der sich rasch entwickelnden Globalisierung sowie der Gesellschaft, den sozialen Gefügen und der Mobilität von Menschen in physischer wie auch gesellschaftlicher Hinsicht extrem gewandelt hat, ist genauso wenig abstreitbar wie der Wandel natürlicher und ökologischer Systeme, auf die der Mensch durch die zuvor genannten Entwicklungen Einfluss genommen hat. Bereits vor über 50 Jahren wurde mit den „*Grenzen des Wachstums*“¹ eine Studie veröffentlicht, in der mögliche negative Konsequenzen der steigenden Ausbeutung natürlicher Ressourcen, der zunehmenden Umweltverschmutzung und des industriellen Wachstums für die folgenden 100 Jahre prognostiziert werden. Gleichzeitig geht diese mit der Forderung an die Weltgemeinschaft einher, einen ökologischen und ökonomischen Gleichgewichtszustand herzustellen, damit die prognostizierten Konsequenzen abgefangen werden können.² 2009 wurde durch Rockström et al. mit dem Modell der „*Planetaren Belastbarkeitsgrenzen*“³ visuell dargestellt, in welchen Systemen der Erde der Mensch die Grenzen eines sicheren Handlungsspielraums bereits überschreitet. Damit verbunden sind verschiedene biologische oder biophysikalische Subsysteme und Prozesse.⁴ Auch der Klimawandel fügt sich hierbei in die verschiedenen, durch Wechselwirkungen miteinander verbundenen Veränderungen im Erdsystem ein, die ein erhöhtes Risiko für Mensch und Umwelt darstellen und wo die Menschheit den sicheren Handlungsspielraum verlassen hat⁵ (*siehe Abb. 1*).

¹ Meadows, Dennis; Meadows, Donella; Zahn, Erich; Milling, Peter: *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*, Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt 1972.

² Meadows, *Die Grenzen des Wachstums*, S. 17.

³ Rockström, Johan; Steffen, Will; Noone, Kevin; Persson, Åsa; Chapin, F. Stuart; Lambin, Eric F.; Lenton, Timothy M.; Scheffer, Marten; Folke, Carl; Schellnhuber, Hans Joachim; Nykvist, Björn; de Wit, Cynthia A.; Hughes, Terry; van der Leeuw, Sander; Rodhe, Henning; Sörlin, Sverker; Snyder, Peter K.; Costanza, Robert; Svedin, Uno; Falkenmark, Malin; Karlberg, Louise; Corell, Robert W.; Fabry, Victoria J.; Hansen, James; Walker, Brian; Liverman, Diana; Richardson, Katherine; Crutzen; Paul; Foley, Jonathan A.: *A safe operating space for humanity*, in: *Nature* 461, 2009, S. 472-475; online unter: <https://www.nature.com/articles/461472a> (Zugriff: 13.09.2023).

⁴ Rockström et al (2009), *A safe operating space for humanity*, S. 472-473.

⁵ Ebd., S. 473.

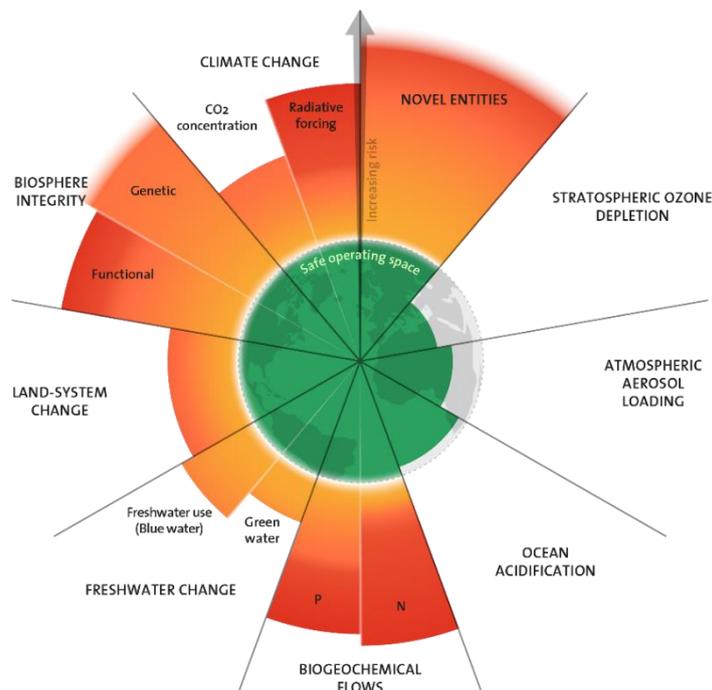


Abb. 1: Planetaren Belastbarkeitsgrenzen 2023⁶

Ein ähnliches Bild zeichnet auch der jüngst veröffentlichte IPCC-Bericht,⁷ der das Risiko der immer schneller steigenden Erderwärmung und der sich verstärkenden Auswirkungen des Klimawandels deutlich höher einschätzt als bisher angenommen.⁸ Auch Konzepte wie der „Erdüberlastungstag“ zeigen, dass die Menschheit immer früher jenen Tag im Jahr erreicht, an dem die natürlichen Ressourcen eines Jahres aufgebraucht sind.⁹ So düster der Ausblick besonders auf den Aspekt des Klimawandels durch die eindeutige Forschungslage erscheint, umso wichtiger ist es, jetzt zu handeln. Dass die schlimmsten angenommenen Auswirkungen bei einem Anstieg von bis zu 4 °C unbedingt zu vermeiden sind, ist ebenfalls aus dem aktuellsten IPCC-Bericht herauszulesen. Bei einer sofortigen und drastischen Senkung der Treibhausgasemissionen sehen die Forscher die Möglichkeit, einen Temperaturanstieg auf 1,5 - 2 °C zu begrenzen.¹⁰ Damit einher gehen die Hoffnungen, dass die schlimmsten Szenarien noch abzuwenden sein werden.

⁶ Abbildung: Azote for Stockholm Resilience Centre, Stockholm University, <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html> (Zugriff: 10.01.2024). Daten basierend auf: Richardson et al., *Earth beyond six of nine planetary boundaries*, *Science Advances* 9 (37), 2023, S. 4; <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458> (18.09.23).

⁷ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): *Climate Change 2023. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Genf 2023.

⁸ IPCC, *Climate Change 2023*, S. 42-45.

⁹ Der Erdüberlastungstag wird auf Basis des ökologischen Fußabdrucks berechnet. Es ist das Datum, an dem die jährlichen biologisch geschaffenen Ressourcen der Erde verbraucht sind.

Umweltbundesamt (UBA): *Erdüberlastungstag: Ressourcen für 2022 verbraucht*, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/erduerlastungstag-ressourcen-fuer-2022-verbraucht> (Zugriff: 17.09.23)., Global Footprint Network: *Earth Overshoot Day*, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/> (17.09.23), *Earth Overshoot Day: Past Earth Overshoot Days*, <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/> (17.09.23).

¹⁰ IPCC, *Climate Change 2023*, S. 42-45.

Im Kampf gegen den rapiden Klimawandel und die steigenden Treibhausgasemissionen weltweit lassen sich eine Vielzahl von Lösungsansätzen identifizieren, die - sei es durch technologischen Fortschritt, politische Gestaltung oder Entwicklungszusammenarbeit - einen Beitrag zur Senkung von Treibhausgasemissionen leisten. In der Fülle der Handlungsbereiche sind unter anderem auch die Umgestaltung des Energie- und Mobilitätssektors von entscheidender Bedeutung. Die Dekarbonisierung oder vielmehr die Defossilierung dieser Bereiche bietet ein großes Einsparungspotential von Treibhausgasemissionen. Zur Diskussion stehen hier der Einsatz neuer Technologien wie Carbon Capture and Storage (CCS) oder Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) oder auch der Umbau von Industriezweigen zur Nutzung von Wasserstoff anstelle von Kohle, Erdöl und Erdgas. Wasserstoff scheint dabei ein zukunftsfähiger Baustein zu werden, Wirtschaftszweige umzugestalten, die heutzutage noch große Mengen an Kohlenstoffdioxid freisetzen. Doch auch hier ist eine genaue Betrachtung der Hintergründe zur Umstellung auf Wasserstoff in Industrie und Verkehr notwendig, um eine Bewertung des Energieträgers Wasserstoff vornehmen und Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger aussprechen zu können. Nur so kann letztendlich eine zielführende Abwägung neuer Technologien erfolgen, die einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leisten sollen. Die gegenwärtigen Herausforderungen müssen zügig angenommen und angegangen werden, um zukünftigen Generationen ein gleichwertiges Leben wie den jetzigen Generationen gewährleisten zu können. Im Rahmen dieser Arbeit soll schwerpunktmäßig der Blick auf Wasserstoff, seine Produktionswege und seine Einsatzgebiete in Verkehr und Industrie gelegt werden. Innerhalb des Themenbereichs Wasserstoff bildet die Photoreformierung als relativ neuer Syntheseweg von Wasserstoff den Kern der fachlichen Auseinandersetzung.

1.2. Kernanliegen Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)

Zur nachhaltigen Umgestaltung der Welt ist Bildung der zentrale Faktor, um die Probleme anzugehen. Die UN haben in ihrer 2015 veröffentlichten Agenda 2030¹¹ *Hochwertige Bildung* als eins von 17 Zielen nachhaltiger Entwicklung formuliert und ihr dadurch eine besondere Rolle zugewiesen, indem sie letztlich der zentrale Faktor zur Erreichung aller übrigen Zielsetzungen ist.¹² Im Sinne einer BNE sollen so möglichst alle Individuen dazu befähigt werden, die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Mitgestaltung einer nachhaltigen Welt zu erhalten. Damit verbindet sich gleichzeitig ein Auftrag, BNE in den Bildungsbereich und somit auch den schulischen Bereich einzubeziehen. Diese Absicht spiegelt sich letztendlich in verschiedenen internationalen und nationalen Rahmenprogrammen wider, die Möglichkeiten zur Umsetzung von BNE in die Bildungslandschaft aufzeigen sollen (*siehe Kap. 6.2. und Kap. 6.3.*). Auf Deutschland bezogen sind mit dem

¹¹ United Nations (UN): *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*, New York 2015; online unter: <https://sdgs.un.org/2030agenda> (17.05.2023).

¹² Ebd.

Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung¹³, der durch die KMK veröffentlicht wurde, erste Vorgaben geschaffen worden, die teilweise in bundesland-spezifischen Vorgaben (zum Beispiel für NRW: Leitlinie BNE NRW 2019)^{14, 15} mündeten. Die Bedeutung von BNE für Bildungsprozesse ist in den letzten Jahren immer stärker hervorgehoben worden. Gleichwohl schien die Bekanntheit von Rahmenvorgaben und dem, was BNE bedeutet, bei denjenigen, die BNE in die Schule hineinragen und einbeziehen sollen - den Lehrkräften - vor wenigen Jahren noch nicht sehr präsent zu sein. Im Rahmen einer von der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal durchgeführten Umfrage im Jahr 2020 (*siehe Kap. 4.*) gaben 75 % der teilnehmenden Lehrkräfte an, dass sie BNE-bezogene Themen in ihren Unterricht integrieren, allerdings nur 44 % die Leitlinie BNE NRW kennen würden. Aus den Ergebnissen dieser Umfrage konnte der Schluss erfolgen, dass viele Lehrkräfte BNE zwar themenbezogen aus dem Blickwinkel des jeweiligen Fachunterrichts betrachten, eine tiefere Auseinandersetzung mit Themen aus unterschiedlichen Perspektiven und Dimensionen jedoch nicht immer umgesetzt wurde. Um BNE und auch entsprechende Landesvorgaben wie die Leitlinie BNE NRW stärker in den Unterricht einzubeziehen, müssen niederschwellige Angebote entwickelt und Möglichkeiten zur Umsetzung von BNE in den alltäglichen Schulunterricht präsentiert werden. Durch solche Angebote können in den einzelnen Schulfächern wie Chemie Themen aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden, um so den Anforderungen an BNE-Lernprozesse gerecht zu werden. Eines dieser aktuellen und für den Chemieunterricht mit Mehrwert einzu-beziehenden Themen soll mit der Photoreformierung von Biomasse vorgestellt werden.

1.3. Zielsetzung und Aufbau

Die Zielsetzung in dieser Arbeit liegt in der Auseinandersetzung mit den Themen BNE, Wasserstoff und Photoreformierung. Sie beruht auf dem Wunsch, diese drei Aspekte miteinander zu vereinen und für den Chemieunterricht gewinnbringend im Rahmen curricularer Vorgaben einzubinden. Beabsichtigt wurde, ein innovatives experimentelles Setting zu entwickeln, mit dem das Thema Wasserstoff mit konkretem Bezug zu den curricularen Schwerpunkten Elektrolyse und Brennstoffzellen aus dem Blickwinkel der Produktion von Wasserstoff zu betrachten ist. Dadurch soll dem Rechnung getragen werden, dass zur Entwicklung der Bewertungskompetenz von Schülerinnen und Schülern verschiedene Perspektiven und Dimensionen auf ein Thema berücksichtigt werden müssen. Der Einsatz von Wasserstoff bei Brennstoffzellen wird zumeist als gegeben hingenommen,

¹³ Engagement Global: *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, Bonn 2016; online unter: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2015/2015_06_00-Orientierungsrahmen-Globale-Entwicklung.pdf (18.09.2023).

¹⁴ Ministerium für Schule und Bildung Nordrhein-Westfalen (MSB NRW): *Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung*, Düsseldorf 2019; online unter: https://www.schulministerium.nrw/sites/default/files/documents/Leitlinie_BNE.pdf, (21.09.2023).

¹⁵ In anderen Bundesländern existieren ebenfalls Rahmenvorgaben für die Einbindung von BNE. Bspw. in Schleswig-Holstein: *Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung* (2021); Sachsen: *Sächsische Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung* (2018); oder Rheinland-Pfalz: *Leitfaden - Bildung für Nachhaltige Entwicklung* (2018).

ohne dass darauf geblickt wird, aus welchen Quellen der Wasserstoff bezogen wird. Die Bereitstellung von CO₂-neutralem Wasserstoff für Brennstoffzellen, den Mobilitätssektor oder die Industrie ist maßgeblich.

Im Sinne eines experimentorientierten Chemieunterrichts soll das konzipierte Experiment Gegenstand sein, um einen alternativen, innovativen und aktuellen Forschungsansatz in den Kontext Schule zu bringen. Als geeignetes Themenfeld wurde hierzu die Photoreformierung von Biomasse gewählt, bei der mithilfe von Licht und einem passenden Katalysator organische Stoffe zu Wasserstoff umgewandelt werden können. Es sollte daher ein schulgereignetes Experiment entwickelt werden, das diese Prozesse nachvollziehbar macht. Darüber hinaus sollte das Experiment in einen Kontext eingebettet werden, mit dem die Hintergründe zur Produktion von Wasserstoff für Schülerinnen und Schüler erschlossen werden können. Daher sollten auch im Rahmen dieses Promotionsprojekts begleitende Materialien entwickelt und erprobt werden, mit denen besonders die Bewertungskompetenzen von Lernenden geschult werden sollen. Ziel war es hierbei, auch mithilfe von Befragungen und Beobachtungen während der Erprobungen des Experiments und der Materialien von Schülerinnen und Schülern, Studierenden sowie Lehrkräften Rückmeldungen einzuholen, die zu einer Optimierung der Materialien führen sollten. Hierbei sollte besonders der Frage nachgegangen werden, inwieweit Lehrkräfte das Experiment und das Material als geeignet für schulische Kontexte und vor dem Hintergrund eines stärkeren Einbezugs von BNE in den Chemieunterricht empfinden.

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich grob in einen fachwissenschaftlichen und einen didaktischen Teil. Das verbindende Element dieser Sinnabschnitte ist das zuerst entwickelte und dann weiterentwickelte Experiment zur Photoreformierung. Der fachwissenschaftliche Teil greift das Thema Wasserstoff mit seinen Herstellungsverfahren und Einsatzgebieten auf, bevor das Thema Photoreformierung vorgestellt wird. Bei letzterem werden neben fachlichen Hintergründen zur Entwicklung auch die eingesetzten Photokatalysatoren und Substrate sowie die Zukunftschancen dieser noch recht jungen Technologie beleuchtet. Im zweiten Teil der fachwissenschaftlichen Auseinandersetzung steht das entwickelte Schulexperiment zur Photoreformierung im Fokus der Betrachtung. Dabei sollen auch hier die Entwicklungsschritte nachvollzogen und die experimentellen Ergebnisse vorgestellt werden. Danach erfolgt die Überleitung zum fachdidaktischen Abschnitt, in dem das Experiment in einen für das Fach Chemie schulspezifischen Kontext eingebunden werden soll. Zunächst wird dabei auf die Rahmenbedingungen der BNE und ihrer Bedeutung für den Unterricht eingegangen. Vor diesem Hintergrund sollen anschließend die Möglichkeiten und Potentiale zur Einbindung des Themas Photoreformierung im Kontext BNE in den Chemieunterricht dargestellt werden. Im zweiten Teil der fachdidaktischen Betrachtung sollen die Materialien zum Experiment und dem Thema Photoreformierung vorgestellt werden und Ihre Erprobung im Rahmen von Workshops, Lehrkräftefortbildungen, und Schülerlabortagen ausgewertet werden. Abgeschlossen wird diese Arbeit durch ein kurzes Fazit.

2. Wasserstoff - Energieträger der Zukunft?

„Nun, was wird an Stelle der Kohle zum Brennen dienen?“

„Das Wasser, antwortet Cyrus Smith.“

„Das Wasser rief Pencroff erstaunt; das Wasser, um Dampfschiffe und Locomotiven zu treiben, Wasser, um damit Wasser zu erhitzen?“

„Ja wohl, doch das in seine Elementarbestandtheile zerlegte Wasser, belehrte ihn Cyrus Smith, zerlegt durch Elektrizität, die bis dahin zur mächtigen und leicht verwendbaren Kraft erwachsen sein wird, [...]. Ich bin davon überzeugt, meine Freunde, daß das Wasser dereinst als Brennstoff Verwendung findet, daß Wasserstoff und Sauerstoff, die Bestandtheile desselben, zur unerschöpflichen und bezüglich ihrer Intensität ganz ungeahnten Quelle der Wärme und des Lichtes werden. [...] Das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“¹⁶

Es sind diese Worte von Jules Verne aus seinem Roman „*Die geheimnisvolle Insel*“ von 1874, die ein Zukunftsszenario zeichnen, in dem Wasserstoff der zentrale Bestandteil der Energieversorgung des Menschen sein wird. Vor allem zeigt aber die Vision, dass Wasserstoff einmal mit der Kohle gleichzusetzen sein wird, die zu Jules Vernes Zeiten der Hauptenergieträger und Motor von Wirtschaft und Industrie war, die besondere Bedeutung dieser Aussage.

In jüngster Vergangenheit sind verschiedene internationale und nationale Rahmenvorgaben sowie Strategiepapiere veröffentlicht worden, die den Einsatz von Wasserstoff in Industrie und Verkehr in den Fokus setzten, um beide Sektoren langfristig zu dekarbonisieren bzw. zu defossilieren. Mit der „Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa“¹⁷ bspw. veröffentlichte die EU im Juli 2020 einen eigenen Rahmenplan. Daneben haben Länder wie Frankreich (2018), Japan (2019) oder Deutschland (2020)¹⁸ zur etwa gleichen Zeit ähnliche nationale Strategiepapiere vorgelegt. Zwar unterschieden sich diese Strategiepapiere in der Bevorzugung bestimmter Produktionswege von Wasserstoff, den Zielen im Umfang der Produktion und auch bevorzugten Einsatzgebieten, jedoch herrscht eine weitgehendende

¹⁶ Verne, Jules: *Die geheimnisvolle Insel*, Wien (u.a.): Hartleben's Verlag 1876, S. 369-371.

¹⁷ Europäische Kommission: *Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa*, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Brüssel 2020.

¹⁸ IRENA (International Renewable Energy Agency): *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*, Abu Dhabi 2020.

Übereinstimmung darin, dass „grünem“ Wasserstoff¹⁹ eine Schlüsselrolle in der Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens von 2015 zuteil wird, vor allem der Emissionsreduzierungen im Energiesektor.²⁰

In den folgenden Unterkapiteln soll zunächst ein Einblick gegeben werden, wie Wasserstoff überhaupt heutzutage hergestellt wird. *Kapitel 2.1.* widmet sich den sogenannten „*Farben des Wasserstoffs*“ und stellt diese und die damit assoziierten Produktionswege vor. In *Kapitel 2.2.* wird anschließend dargestellt, in welchen Bereichen Wasserstoff sinnvoll genutzt werden kann, um den Einsatz fossiler Energieträger sowie die damit einhergehenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen zu reduzieren. Dabei wird ein Fokus auf die Betrachtung des Industrie- und Verkehrssektors gelegt. Besonders im Verkehrssektor müssen Nutzen und Wirken zum ebenfalls stark anwachsenden Markt der Elektromobilität abgewogen werden. Abschließend sollen die Chancen, die mit der Nutzung von Wasserstoff in Zukunft einhergehen, aufgezeigt werden, um zu einer möglichen Bewertung des Energieträgers Wasserstoff zu kommen.

2.1. Die Farben des Wasserstoffs

Den Produktionswegen von Wasserstoff wird bereits seit einigen Jahren eine Farbcodierung gegeben, die einen ersten Eindruck geben soll, wie klimaneutral der zum Einsatz kommende Wasserstoff ist. Die gewählte Farbpalette umfasst inzwischen zahlreiche Farben, von denen allerdings nicht alle immer eindeutig den einzelnen Herstellungsverfahren zuzuordnen sind. Weitestgehende Einigkeit herrscht jedoch bei den vier am häufigsten genannten Farben *Grau*, *Blau*, *Türkis* und *Grün*. Diese Farben werden nicht nur in fachwissenschaftlichen, sondern auch populärwissenschaftlichen Artikeln genutzt. Auch auf internationaler Ebene wird diese Farbcodierung für die verschiedenen Produktionswege des Wasserstoffs verwendet. Auf nationaler Ebene hat die Bundesregierung diese vier Farben ebenfalls in ihrer Nationalen Wasserstoffstrategie²¹ von 2020 aufgegriffen. Für die Beurteilung von Wasserstoff als zukunftsfähigem Energieträger und als einem möglichen Lösungsweg aus der Klimakrise muss die besondere Aufmerksamkeit auf die Produktionswege gelegt werden, da nicht alle frei von Kohlenstoffdioxid-Emissionen sind. Im Folgenden werden diese vier Farben näher vorgestellt. Eine tabellarische Übersicht über die Farben des Wasserstoffs ist in Tabelle 1 zu finden.

¹⁹ Als „grüner“ Wasserstoff wird solcher Wasserstoff bezeichnet, der mithilfe von Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt wurde. Siehe hierzu *Kap. 2.1.4. - Grüner Wasserstoff*.

²⁰ IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, S. 19.

²¹ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): *Die Nationale Wasserstoffstrategie*, Berlin 2020.

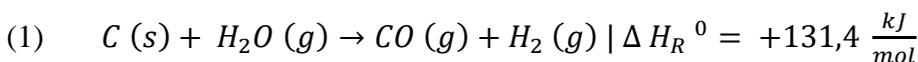
„Farben des Wasserstoffs“ <i>Auswahl der vier am häufigsten genannten Farbvarianten im Vergleich</i>				
	grün	grau	blau	türkis
Herstellungsweg	Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien	Dampfreformierung Kohlevergasung	Dampfreformierung mit einem Kohlenstoffdioxid-Abscheidungs- und Speicherverfahren (CCS)	Methanpyrolyse
Kohlenstoffdioxid-Emissionen (pro t Wasserstoff)	keine	hoch <i>Dampfreformierung 10,8 t¹ Kohlevergasung 25,6 t¹</i>	keine <i>Voraussetzung: Strom für die Prozesse aus erneuerbaren Energien, dauerhafte Lagerung des Kohlenstoffdioxids</i>	keine <i>Voraussetzung: Strom für die Prozesse aus erneuerbaren Energien, dauerhafte Lagerung des festen Kohlenstoffs</i>
Ausgangsstoff(e)	Wasser	fossile Energieträger <i>(Kohle, Erdöl, Erdgas)</i>	fossile Energieträger <i>(Kohle, Erdöl, Erdgas/Biogas)</i>	fossile Energieträger <i>(Erdgas)</i>
Produkte	Wasserstoff Sauerstoff	Wasserstoff Kohlenstoffdioxid	Wasserstoff Kohlenstoffdioxid	Wasserstoff Kohlenstoff
angenommene Kosten für eine t Wasserstoff	6000 € ¹	2000 € ¹	2350-3400 € ^{1,2} <i>(Kohlevergasung)</i> 2150-2600 € ^{1,2} <i>(Dampfreformierung)</i>	2500-3000 € ¹
Einsatz in der Industrie	selten angewandt <i>ca. 2 %³ der Wasserstoffproduktion in Europa</i>	häufig angewandt <i>ca. 40 %⁴ der Wasserstoffproduktion in Deutschland⁵</i>	selten angewandt	selten angewandt

¹ Machhammer et al.: Ökonomisch/ökologische Betrachtung zur Herstellung von Wasserstoff in Großanlagen, 2015.
² Reguife et al.: Current Developments of Carbon Capture Storage and/or Utilization - Looking for Net-Zero Emissions Defined in the Paris Agreement, 2021.
³ Clausen: Das Wasserstoffrätsel: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen, 2022.
⁴ Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V.: Wasserstoff. DIHK – Faktenpapier, 2020.
⁵ Weitere 50 % entfallen auf Nebenprodukte bei Raffinerie- und Chemieprozessen.

Tab. 1: Die „Farben des Wasserstoffs“ im Vergleich

2.1.1. Grauer Wasserstoff

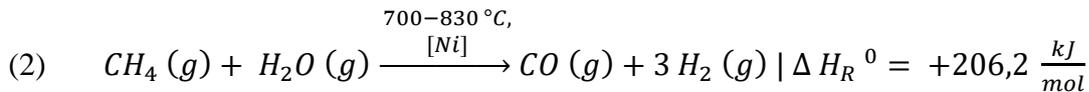
Die Farbe Grau wird solchen Verfahrenswegen zur Wasserstoffproduktion zugeordnet, die mit hohen Kohlenstoffdioxid-Emissionen verbunden sind. Hierzu wird allem voran die Dampfreformierung fossiler Energieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas gezählt. Die Dampfreformierung umfasst je nachdem, ob Erdgas, Erdöl oder Kohle eingesetzt wird, weitere Prozesswege (Crack-Prozesse oder partielle Oxidation), die der eigentlichen Dampfreformierung vor- oder zugeschaltet sind. Von technischer Bedeutung ist heutzutage einerseits der Weg über die Spaltung von Wasserdampf mittels Koks (Kohlenstoff) bei hohen Temperaturen (800-1000 °C). Hierbei entsteht mit dem „Synthesegas“ ein Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff (1).²² Der hohe Energiebedarf dieser „Kohlevergasung“ wird durch die Verbrennung der eingesetzten Kohle gedeckt, in die abwechselnd bei Abkühlungs- und Aufheizphasen Wasserdampf oder auch Sauerstoff eingeleitet wird.²³



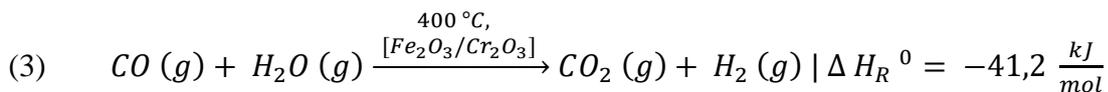
²² Hollemann, Arnold Frederik; Wiberg, Egon: *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, Berlin: de Gruyter 1995, S. 285.

²³ Hollemann/Wiberg, *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, S. 285.

Andererseits wird in einem weiteren industriellen Prozessverfahren Erdgas, dessen Hauptbestandteil Methan ist, als Edukt eingesetzt. Mithilfe eines Nickel-Katalysators werden bei hohen Temperaturen (800 °C) Methan und Wasser zu Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid umgesetzt (2).^{24, 25}



Sowohl bei der Kohlevergasung als auch bei der Dampfreformierung von Methan handelt es sich um stark endotherme Reaktionen. Zur Erhöhung der Wasserstoffausbeute wird das Gasgemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff in einem Folgeschritt auf etwa 400 °C herabgekühlt. Anschließend wird Wasserdampf hinzugefügt und über einen Katalysator geleitet, wodurch neben Wasserstoff auch Kohlenstoffdioxid gebildet werden (3).^{26, 27}



Zwar ist die Reaktion der Kohlenstoffmonoxid-Konvertierung exotherm (3), jedoch liegen bei der Dampfreformierung sowohl von Kohle ($\Delta H_R^0 = 90,2 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) als auch Erdgas ($\Delta H_R^0 = 165,0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$) in Summe immer noch stark endotherme Reaktionen vor, die den hohen Energiebedarf dieses Produktionsweges verdeutlichen helfen.

Aus ökologischer Perspektive gehen mit dem hohen Energiebedarf auch hohe Kohlenstoffdioxid-Emissionen einher, die in die Atmosphäre entlassen werden. So kann der Ausstoß an Kohlenstoffdioxid bei der Kohlevergasung mit 25,6 t, bei der Dampfreformierung von Methan mit 10,8 t pro 1 t hergestelltem Wasserstoffgas bilanziert werden.²⁸ Die Kosten für die Wasserstoffproduktion durch Kohlevergasung oder Dampfreformierung von Methan setzen sich überwiegend aus den Rohstoffpreisen und Fixkosten zusammen. Für 1 t Wasserstoff liegen die Kosten bei beiden Verfahren bei knapp 2000 €, wobei die Produktkosten bei der Kohlevergasung etwas geringer sind als bei der Dampfreformierung.²⁹ Bei ähnlichem Preis ist somit die Dampfreformierung von Methan gegenüber der Kohlevergasung bei den Kohlenstoffdioxid-Emissionen eindeutig im Vorteil. Den Marktanteil, den Wasserstoff durch Dampfreformierung produziert einnimmt, liegt in Deutschland bei 40 %.³⁰

²⁴ Binnewies, Michael; Jäckel, Manfred; Willner, Helge; Rayner-Canham, Geoff: *Allgemeine und Anorganische Chemie*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2011, S. 381.

²⁵ Hollemann/Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, S. 286.

²⁶ Binnewies et al., *Allgemeine und Anorganische Chemie*, S. 381.

²⁷ Hollemann/Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, S. 285.

²⁸ Machhammer, Otto; Bode, Andreas; Hormuth, Wolfgang: *Ökonomisch/ökologische Betrachtung zur Herstellung von Wasserstoff in Großanlagen*, in: *Chemie Ingenieur Technik* 87(4), 2015, S. 415.

²⁹ Machhammer et al., *Ökonomisch/ökologische Betrachtung*, S. 415.

³⁰ Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. (DIHK) (Hrsg.): *Wasserstoff. DIHK - Faktenpapier*, Berlin 2020, S. 6.

2.1.2. Blauer Wasserstoff

Wasserstoff, der über den Weg der Dampfreformierung gewonnen wird, an den sich zudem noch ein Kohlenstoffdioxid-Abscheidungs- und Speicherverfahren anschließt (CCS), wird als blauer Wasserstoff bezeichnet. Das entstehende Kohlenstoffdioxid gelangt somit nicht in die Atmosphäre, sondern wird bspw. in ehemaligen Erdöl- oder Erdgasfeldern unter der Erde eingelagert, wodurch dieser Prozess als CO₂-neutral angesehen wird.³¹

Die chemischen Prozessabläufe sind mit denen der Herstellung des grauen Wasserstoffs identisch. Erdgas, Erdöl, Kohle oder auch Biogas werden für die Dampfreformierung eingesetzt. Allerdings wird das bei der Dampfreformierung oder Kohlevergasung entstehende Kohlenstoffdioxid durch sogenannte Pre-Combustion-Verfahren³² abgetrennt. Die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid aus Gasströmen bei industriellen Prozessen wie der Dampfreformierung sind bereits seit vielen Jahrzehnten bekannt und dienen ursprünglich der Reinigung der Gase (bspw. des entstehenden Wasserstoffgases).³³ Zur Reduzierung der weltweiten Kohlenstoffdioxid-Emissionen kann nun auf bestimmte bereits existierende Verfahren zurückgegriffen werden. Die Trennung von Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff ist durch die unterschiedlichen Molekulargewichte im Pre-Combustion-Verfahren etwas einfacher zu realisieren als bspw. die Trennung von Kohlenstoffdioxid und Stickstoff in Post-Combustion Verfahren und wird daher bevorzugt.³⁴

Die eigentliche Trennung bzw. Abscheidung von Kohlenstoffdioxid von dem hergestellten Wasserstoffgas erfolgt mit passenden Lösemitteln zum Beispiel durch chemische Absorption in der Aminwäsche (u.a. mit Methyldiethanolamin) oder physikalische Absorption in der Selexolwäsche (mit Polyethylenglycol). Die Regeneration dieser Flüssigkeiten kann durch Temperaturerhöhung oder Druckverminderung geschehen, um das Absorptionsmedium wieder vom Kohlenstoffdioxid zu trennen.³⁵

Aus der ökologischen Perspektive erweist sich der blaue Wasserstoff zwar formal als CO₂-neutral, trotzdem gehen auch hiermit der Verbrauch von Ressourcen für CCS-Verfahren einher, die in dieser Betrachtung nicht in die Kohlenstoffdioxid-Bilanz miteinbezogen wurden. Die Kosten belaufen sich schätzungsweise zwischen 15 bis 60 USD (13,60 bis 54,40 €) pro 1 t Kohlenstoffdioxid für die oben genannten Pre-Combustion-Verfahren und unterscheiden sich je nach Prozesskette stark. Die Kosten können bei kleineren Industrieanlagen nochmals höher sein.³⁶ Damit ergibt sich für die wirtschaftliche Betrachtung des „blauen“ Wasserstoffs, dass neben den Kosten für die Produktion auch jene für das anschließende CCS-Verfahren anfallen. Auf Basis der im vorherigen Kapitel benannten Kosten müssen pro t Wasserstoff bei der Kohlevergasung (25,6 t Kohlenstoffdioxid pro t Wasserstoff) zwischen 348 und 1390 €, bei der Dampfreformierung von Erdgas (10,8 t

³¹ Logan, Bruce E.: *Daily Energy Use and Carbon Emissions. Fundamentals and Applications for Students and Professionals*, Hoboken: Wiley 2022, S. 106.

³² Unterschieden werden bei CCS pre-combustion, post-combustion und oxyfuels.

³³ Regufe, Maria Joao; Pereira, Ana; Ferreira, Alexandre F. P.; Mafalda Ribeiro, Ana; Rodrigues, Alirio E.: *Current Developments of Carbon Capture Storage and/or Utilization—Looking for Net-Zero Emissions Defined in the Paris Agreement*, in: *Energies* 14 (9) 2406, 2021, S. 11.

³⁴ Regufe et al., *Current Developments of Carbon Capture Storage*, S. 11.

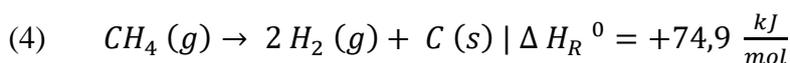
³⁵ Ebd.

³⁶ Ebd.

Kohlenstoffdioxid pro t Wasserstoff) zwischen 147 und 587 € für die Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoffdioxid hinzuberechnet werden. Damit ergeben sich bspw. für 1 t Wasserstoff, die über die Dampfreformierung von Methan hergestellt wurde, Mehrkosten von bis zu 30 %. Dass vor allem in europäischen Ländern die Nutzung von CCS-Technologien nicht weit verbreitet ist, hängt jedoch nicht nur mit den entstehenden Kosten für die Industrie zusammen, sondern auch mit fehlendem politischem Willen zur Umgestaltung. Daneben besitzt CCS auch einen geringen Rückhalt in der Gesellschaft, verursacht durch zu wenig Hintergrundwissen und einer Skepsis gegenüber der Kohlenstoffdioxid-Speicherung aufgrund potenziell angenommener Umwelt- oder Gesundheitsschäden.³⁷

2.1.3. Türkiser Wasserstoff

Der durch Methanpyrolyse gewonnene Wasserstoff wird als „türkis“ bezeichnet. Der Ausgangsstoff ist Erdgas, dessen Hauptbestandteil Methan durch thermische Spaltung zu Wasserstoff und Kohlenstoff umgesetzt wird. Die zugrundeliegende Reaktion ist endotherm (4).³⁸ Der anfallende Kohlenstoff kann anschließend als Feststoff eingelagert oder in anderen Industrieprozessen eingesetzt werden. Besonders in der metallurgischen Industrie kann dieser sehr reine Kohlenstoff, der zu Koks umgesetzt werden kann, anstelle des aus Kohle gewonnenen Koks Verwendung finden.³⁹ Bei der für die technischen Prozesse der Methanpyrolyse benötigten Energie wird vor allem Strom als Bezugsquelle von Energie herangezogen. Die Verbrennung des anfallenden Kohlenstoffs bzw. des eingesetzten Erdgases ist aber auch möglich.⁴⁰



Bei der Betrachtung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen zeigt sich, dass die Voraussetzungen für die „CO₂-Neutralität“ der Methanpyrolyse sowohl die dauerhafte Speicherung des Kohlenstoffs als auch die Energieversorgung des Hochtemperaturreaktors mit Strom aus erneuerbaren Energien sind. Da bei heutigem Stand jedoch ein sogenannter Strommix eingesetzt wird, der überwiegend aus fossilen Energieträgern wie Kohle und Gas erzeugt wird, sind pro verbrauchter Kilowattstunde auch entsprechende Kohlenstoffdioxid-Emission miteinzubeziehen.⁴¹ Bei der Methanpyrolyse fallen pro 1 t Wasserstoff 4,4 t Kohlenstoffdioxid an, die zum Großteil (2,5 t) auf die Stromerzeugung und den damit verbundenen Emissionen entfallen.⁴² Wird der feste Kohlenstoff als Ausgangsstoff in der Metallindustrie

³⁷ Regufe et al., Current Developments of Carbon Capture Storage, S. 17-18.

³⁸ Schneider, Stefan; Bajohr, Siegfried; Graf, Frank; Kolb, Thomas: *Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse*, in: Chemie Ingenieur Technik 92 (8), 2020, S. 1024.

³⁹ Machhammer et al., Ökonomisch/ökologische Betrachtung, S. 411.

⁴⁰ Ebd.

⁴¹ Laut Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz lagen die Anteile erneuerbarer Energien des in Deutschland verbrauchten Stroms im Jahr 2000 bei 6 %, 2020 bei 45 %. Bis 2030 soll der Anteil auf mindestens 80 % ansteigen; Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: *Erneuerbare Energien*; online unter: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>, (17.07.2023).

⁴² Machhammer et al., Ökonomisch/ökologische Betrachtung, S. 413.

eingesetzt, reduzieren sich die Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Methanpyrolyse. Der in Kokereien eingesetzte Pyrolyse-Kohlenstoff setzt in Summe weniger Kohlenstoffdioxid frei als beim Einsatz von klassischer Koks Kohle anfallen würde. Bei dieser Erweiterung und Einbeziehung des bei der Verkokung freigesetzten Kohlenstoffdioxids fallen bei der Methanpyrolyse pro 1 t Wasserstoff 3,5 t Kohlenstoffdioxid an.⁴³ Damit liegt auch beim eingesetzten Strommix die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid deutlich unter den Werten der klassischen Dampfreformierung. Die Kosten von 1 t Wasserstoff belaufen sich bei der Methanpyrolyse, je nachdem ob der anfallende Kohlenstoff in weiteren Industrieprozessen einbezogen wird, auf etwa 2500 bis knapp über 3000 €. ⁴⁴ Die Kosten für diesen Prozess sind maßgeblich durch den Erdgaspreis und den Strompreis bestimmt.⁴⁵ Allerdings müssen in die Berechnung ebenfalls Faktoren einbezogen werden, die durch das Prozessverfahren und vor allem die Aufreinigung des entstehenden Gases zustande kommen. In Nebenreaktionen werden auch andere gesättigte sowie ungesättigte Kohlenwasserstoffe gebildet, wodurch eine Gasreinigung nötig wird, wenn Wasserstoffgas in möglichst reiner Form vorliegen soll.⁴⁶

2.1.4. Grüner Wasserstoff

Grüner Wasserstoff bezeichnet klassischerweise jene Form, die über die Elektrolyse von Wasser gewonnen wird. Entscheidendes Kriterium dabei ist, dass für die Elektrolyse Strom aus erneuerbaren Energien genutzt wird. Bei der großtechnischen Umsetzung der Wasserelektrolyse werden zahlreiche Zersetzungszellen hintereinandergeschaltet. Als Elektrodenmaterial in den elektrochemischen Zellen fungiert einerseits Nickel und andererseits Eisen. An die Elektroden wird ein Stromkreis angeschlossen, wobei der Minus-Pol der Stromquelle mit der ersten Eisen-Elektrode und der Plus-Pol mit der ersten Nickel-Elektrode verbunden wird. In den dazwischengeschalteten Zellen werden anodenseitig vernickelte Eisenbleche genutzt, die die Kathoden-Halbzelle von der Anoden-Halbzelle trennen. Damit sich die entstehenden Gase Wasserstoff und Sauerstoff nicht zu einem Knallgasgemisch vereinen, werden Diaphragmen eingesetzt, sodass beide Gase voneinander getrennt abgeführt werden können.⁴⁷ Bei der Wasserelektrolyse sind durch Faktoren wie gelöste Salze oder pH-Wert verschiedene Reaktionen möglich. Allen Herstellungswegen gemein ist jedoch das Ziel der Herstellung von Wasserstoff.

In der Industrie sind zwei Verfahren von Bedeutung. Hierzu gehören zum einen die Nutzung alkalischer Elektrolyseure und zum anderen Elektrolyseure mit Protonen-Austausch-Membran (PEM).⁴⁸ Bei alkalischen Elektrolyseuren wird eine Kaliumhydroxid-Lösung (manchmal auch Natronlauge) zur Erhöhung der Leitfähigkeit des wässrigen Mediums eingesetzt.⁴⁹ Die benötigte Spannung bei der Elektrolyse liegt theoretisch bei 1,2 V, sie wird aber aufgrund der Überspannung meist zwischen 1,8 V und 3,5 V durchgeführt.⁵⁰ Des

⁴³ Machhammer et al., Ökonomisch/ökologische Betrachtung, S. 413-415.

⁴⁴ Ebd., S. 416

⁴⁵ Ebd., S. 416-417.

⁴⁶ Schneider et al., Verfahrensübersicht, S. 1024.

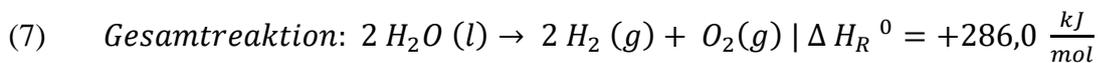
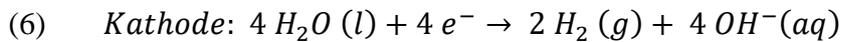
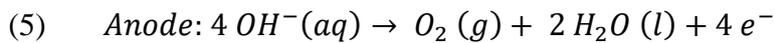
⁴⁷ Hollemann/Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, S. 284.

⁴⁸ Logan, Daily Energy Use, S. 107.

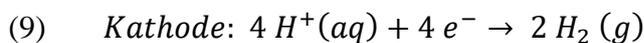
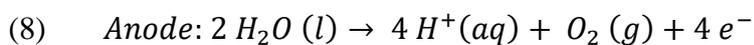
⁴⁹ Hollemann/Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, S. 284.

⁵⁰ Logan, Daily Energy Use, S. 107.

Weiteren operieren diese Systeme bei einer Temperatur von 40-80 °C, um die Ausbeute an Wasserstoffgas zu erhöhen.⁵¹ Die Reaktionen an der Anode sowie an der Kathode lauten bei der alkalischen Elektrolyse wie folgt:



PEM-Elektrolyseure unterscheiden sich von den alkalischen Elektrolyseuren darin, dass sie mit einer protonendurchlässigen Membran arbeiten.⁵² Diese dient wie bei PEM-Brennstoffzellen der Separierung der entstehenden Protonen. Diese Protonen werden auf der Kathodenseite zu Wasserstoffmolekülen reduziert. Die Gesamtreaktion ist identisch mit der der alkalischen Elektrolyse (7),⁵³ allerdings sind die Reaktionen an Anode und Kathode verschieden (8),⁵⁴ (9).⁵⁵



Die technischen Kosten, die mit PEM-Elektrolyseuren verbunden sind, resultieren aus den eingesetzten Materialien. Die Membranen können teilweise die Hälfte der anfallenden Kosten solcher Anlagen ausmachen.⁵⁶ Dadurch sind diese Systeme in der Anschaffung bis zu 60 % teurer als alkalische Elektrolyseure.⁵⁷ Zudem müssen Edelmetalle wie Iridium und Platin als Elektrodenmaterial verwendet werden, da diese den stark sauren Bedingungen standhalten. Vorteilhaft ist, dass die Elektrolyse bei Raumtemperatur vollzogen werden kann und dass die entstehenden Gase direkt in den Reaktoren verdichtet werden können, wodurch nachfolgende Kompressionen der Gase und somit Kosten gesenkt werden.⁵⁸

Wie bereits bei der Methanpyrolyse erwähnt, ist der Anteil erneuerbarer Energie am Strommix in Deutschland noch gering (2022: 44 %⁵⁹). Daher ist die Bewertung, ob „grüner“ Wasserstoff tatsächlich grün ist, davon abhängig, wie der eingesetzte Strom erzeugt wird. Bei Einsatz 100 % erneuerbarer Energien werden praktisch keine Kohlenstoffdioxid-Emissionen freigesetzt. Diese Bilanz ändert sich jedoch drastisch, wenn Netzstrom für die Elektrolyse herangezogen wird. Bei 61,1 MWh Strom, die zur elektrolytischen Herstellung

⁵¹ Logan, Daily Energy Use, S. 107.

⁵² Ebd., S. 108.

⁵³ Hollemann/Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, S. 283.

⁵⁴ Logan, Daily Energy Use, S. 108.

⁵⁵ Ebd.

⁵⁶ Ebd.

⁵⁷ IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, S. 50.

⁵⁸ Logan, Daily Energy Use, S. 108.

⁵⁹ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: *Erneuerbare Energien*, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>, (17.07.2023).

von 1 t Wasserstoff benötigt werden,⁶⁰ fallen beim Einsatz von heutigem Netzstrom 26,5 t Kohlenstoffdioxid⁶¹ an. Die Produktkosten für 1 t Wasserstoff lägen bei der Nutzung von Strom aus Windparkanlagen bei 6000 €. Im Vergleich dazu wären die Produktkosten mit knapp 7500 € bei der Nutzung von Netzstrom viel höher, könnten allerdings durch den Wegfall von Netzgebühren deutlich auf knapp 2500 € reduziert werden.⁶² Es wird angenommen, dass die Kosten für „grünen“ Wasserstoff mittelfristig um bis zu 40 % und schließlich langfristig sogar um bis zu 80 % gesenkt werden können. Voraussetzung hierfür ist, dass sowohl staatliche Unterstützungen für Forschungsprogramme zu Elektrolyseuren, die politische Festlegung von Strategien und Ziele, als auch privatwirtschaftliche Initiativen zur Optimierung und Standardisierung umgesetzt werden, die die Preise für Elektrolyseure langfristig senken werden.⁶³ Aktuell werden jedoch in Europa lediglich 2 % des Wasserstoffs über die Elektrolyse von Wasser mittels Strom aus erneuerbaren Energien hergestellt.⁶⁴ Damit liegt „grüner“ Wasserstoff noch deutlich gegenüber dem „grauen“ Wasserstoff zurück.

Zu Varianten des grünen Wasserstoffs werden ebenfalls die Fermentation von Biomasse durch Bakterien gezählt, mit deren Hilfe bspw. Glucose zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgesetzt werden können. Allerdings zeigt sich in der Praxis, dass die Ausbeute an Wasserstoff relativ gering ist, da bei dem Fermentationsprozess neben den genannten Produkten auch Ethansäure entsteht, die nicht ohne weiteres zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid von den Bakterien umgesetzt werden kann.⁶⁵ Lösungswege, die dieses Problem angehen, sind Gegenstand aktueller Forschung. Ein möglicher Weg ist die Nutzung von speziellen Algen, die Sonnenlicht absorbieren, um schließlich Wasserstoff zu synthetisieren. Daneben existiert die Photofermentation von Biomasse, in der Photosynthesebetreibende Bakterien eingesetzt werden, die die Energie des Sonnenlichts zur Umsetzung organischer Stoffe zu Wasserstoff nutzen.⁶⁶

Mikrobielle Elektrolyse-Zellen (MECs) präsentieren sich als weiterer Entwicklungsschritt für nachhaltige Wasserstoffsynthesen. In diesen Zellen werden bestimmte Bakterientypen eingesetzt, die sich an der Anode anlagern und einen elektrochemischen Biofilm bilden. An der Anode werden organische Substratmoleküle oxidiert und an der Kathode Protonen zu Wasserstoffmolekülen reduziert.⁶⁷ Vorteilhaft ist, dass organische Substrate zumeist ein geringeres Redoxpotenzial besitzen als Wasser. Dadurch liegt die Zellspannung in MECs

⁶⁰ Machhammer et al., Ökonomisch/ökologische Betrachtung, S. 412.

⁶¹ Dieser Wert basiert auf Daten des Umweltbundesamtes (UBA). Dieses gibt für das Jahr 2022 eine Prognose ab, dass der CO₂-Emissionsfaktor am deutschen Strommix 434 g/kWh beträgt. (Umweltbundesamt: *Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022*, Dessau-Roßlau 2023; online unter:

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf, (18.07.2023)).

⁶² Machhammer et al., Ökonomisch/ökologische Betrachtung, S. 416.

⁶³ IRENA, Green Hydrogen Cost Reduction, S. 86.

⁶⁴ Clausen, Jens: *Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen*, Berlin 2022, S. 35.

⁶⁵ Logan, Daily Energy Use, S. 109.

⁶⁶ Ebd.

⁶⁷ Rousseau, Raphael; Ketep, Stephanie F.; Etcheverry, Luc; Delia, Marie-Line; Bergel, Alain: *Microbial electrolysis cell (MEC): Strengths, weaknesses and research needs from electrochemical engineering standpoint*, in: *Bioresource Technology Reports* 9, 2020, S. 1.

deutlich unter den für die Elektrolyse von Wasser benötigten 1,2 V.⁶⁸ Beabsichtigt wird, dass die MECs mit wässrigen Abfällen betrieben werden, die eine Vielzahl organischer Substanzen bereitstellen und so gewinnbringend weitergenutzt werden können.⁶⁹ Die genannten Vorteile von MECs zeigen, dass sie für die Produktion von Wasserstoff als weitere vielversprechende Alternative in der Theorie herangezogen werden können. In der Praxis ist dieses Verfahren noch deutlich von einer industriellen Umsetzung entfernt. Als Schwierigkeiten erweisen sich u.a., dass die Abwässer, die für die Nutzung beabsichtigt werden, eine geringe Ionenkonzentration besitzen und nicht gut leitfähig sind. Die Zugabe von Salzen erhöht neben der Korrosionsgefahr der Elektroden auch die Gefahr, dass der pH-Wert im Anodenbereich sinkt, wodurch die Bakterien des Biofilms, die einen neutralen pH-Wert benötigen, geschädigt werden. Außerdem benötigen MECs nicht zu hoch konzentrierte wässrige Lösungen, damit diese zuverlässig arbeiten.⁷⁰

Alle genannten Optionen beschreiben somit Varianten, bei denen ohne Einsatz fossiler Energieträger CO₂-neutral Wasserstoff produziert wird. Sie werden wie auch die Elektrolyse von Wasser mittels Stroms aus erneuerbaren Energien als Produktionswege für „grünen“ Wasserstoff beschrieben.⁷¹ Die genannten photobiologischen Prozesse scheinen jedoch in naher Zukunft nicht im großindustriellen Maßstab umsetzbar zu sein. Daher können mögliche Kosten für den auf diesen Wegen produzierten Wasserstoff noch nicht abgeschätzt werden.

2.1.5. Grüner Wasserstoff - Der Lösungsweg?

Grüner Wasserstoff scheint abseits fossiler Energieträger in vielerlei Hinsicht eine geeignete Möglichkeit darzustellen, einen chemischen Energieträger zu schaffen, der sowohl Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Industrieprozessen, als auch im Verkehr reduzieren kann. Besonders im Vergleich zu den klassischen Produktionswegen wie der Dampfreformierung und der Kohlevergasung, aber auch gegenüber neuen Technologien wie der Methanpyrolyse ist der elektrolytisch hergestellte Wasserstoff bei der Kohlenstoffdioxid-Bilanzierung klar im Vorteil. Wirtschaftlich gesehen ist jedoch die Dampfreformierung von Methan der bisher effizienteste Produktionsweg. Die Produktkosten sind in diesem etablierten Prozess pro hergestellter Tonne Wasserstoff am geringsten und damit attraktiv für den Markt. Mit 40 % am in Deutschland produzierten Wasserstoff überwiegt diese Produktionsform gegenüber allen anderen genannten. Weitere 50 % entfallen auf Wasserstoff, der als Nebenprodukt aus Raffinerieprozessen oder chemischen Verfahren anfällt.⁷² Es ist jedoch auch absehbar, dass eine Umstellung hin zu erneuerbaren Energien und Energieträgern unabdingbar ist, um die Wirtschaft und Industrie möglichst CO₂-neutral zu gestalten und einen Beitrag zur Reduzierung dieses Treibhausgases zu leisten.

Diese Absicht zur Umgestaltung ist nicht nur in verschiedenen bereits erwähnten Gesetzen, Rahmenvorgaben oder Absichtserklärungen der Politik auf internationaler wie auf nationaler

⁶⁸ Rousseau et al., Microbial electrolysis cell (MEC), S. 1.

⁶⁹ Ebd.

⁷⁰ Ebd., S. 2.

⁷¹ Logan, Daily Energy Use, S. 106

⁷² DIHK, Wasserstoff, S. 6.

Ebene zu erkennen, sondern auch in der wachsenden Sichtbarkeit der „Farben des Wasserstoffs“ in den Nachrichten und unterschiedlichsten Medien.⁷³ Allerdings ist hierbei ein besonderes Augenmerk darauf zu legen, wie grüner Wasserstoff tatsächlich produziert wird. Auch wenn vielfach mit „grünem“ Wasserstoff nur die Elektrolyse von Wasser verbunden wird, konnte zuvor deutlich gemacht werden, dass nicht nur weitere Produktionswege für Wasserstoff hierzu gezählt werden können, sondern auch elektrolytisch hergestellter Wasserstoff nicht automatisch als „grün“ bezeichnet werden darf. Bei Nutzung von Netzstrom aus Deutschland im Jahr 2022 für die Wasserelektrolyse zeigt sich, dass die Emissionen an Kohlenstoffdioxid von $26,5 \text{ t CO}_2/\text{t H}_2$ sogar knapp über denen der Kohlevergasung ($25,6 \text{ t CO}_2/\text{t H}_2$) und deutlich über denen der Dampfreformierung ($10,8 \text{ t CO}_2/\text{t H}_2$) liegen würden.⁷⁴ Eine sofortige Umstellung der Industrie hin zu „grünem“ Wasserstoff scheint nicht möglich zu sein, weshalb bestehende Technologien wie die Dampfreformierung und auch die Methanpyrolyse in den nächsten Jahren benötigt werden, um den stetig steigenden Bedarf an Wasserstoff decken zu können. Zwar zeigen Metaanalysen, dass noch Ungewissheit darüber herrscht, wie viel Wasserstoff tatsächlich in den nächsten Jahrzehnten benötigt wird.⁷⁵ Allerdings geht mit der inländischen Produktion von „grünem“ Wasserstoff ein enormes Potenzial für die allgemeine volkswirtschaftliche Wertschöpfung (jährlich etwa 30 Mrd. Euro), den Arbeitsmarkt und auch die Steuereinnahmen einher.⁷⁶

Das entscheidende Ziel muss jedoch weiterhin im Blick behalten werden, dass in der Zukunft die Bereitstellung chemischer Energieträger gesichert ist und die Herstellungsprozesse weitestgehend CO₂-neutral stattfinden. „Grüner“ Wasserstoff kann daher als ein möglicher Lösungsweg angesehen werden. Damit dieser Energieträger in Zukunft zur Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen eine entscheidende Rolle einnimmt, müssen sowohl die industrielle Forschung als auch die Grundlagenforschung weiter ausgebaut werden, um bestehende Methoden auszubauen, neue Ansätze zu finden, die Effektivität zu steigern und so die Kosten für das Produkt „grüner“ Wasserstoff zu reduzieren. Verschiedene Perspektiven müssen bei der Abwägung und Umsetzung berücksichtigt werden. Dabei kommt es besonders auf das Zusammenspiel verschiedener handelnder Personen aus Politik, Wirtschaft und Forschung an.

⁷³ AutoMotorSport (Hebermehl, Gregor): *Das bedeutet der Wasserstoff-Farbcode*, <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/wasserstoff-farben-bedeutung/> (05.10.23).; Süddeutsche Zeitung (Diermann, Ralph): *Methan und Hitze für den Klimaschutz*, <https://www.sueddeutsche.de/wissen/wasserstoff-erdgas-co-1.4935847> (05.10.23).; Rheinische Post: *Von wegen farblos: Was Wasserstoff von Wasserstoff unterscheidet*, https://rp-online.de/wirtschaft/was-wasserstoff-von-wasserstoff-unterscheidet_aid-93146335 (05.10.23).

⁷⁴ DIHK, Wasserstoff, S. 5-8.

⁷⁵ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: *Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung - Update. Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e.V.*, Wuppertal 2021, S. 16.

⁷⁶ Ebd.

2.2. Wasserstoff - Potentiale eines zukünftigen Energieträgers

Mit der Verabschiedung des europäischen Green Deals verpflichteten sich 2019 die Staaten der EU bis zum Jahr 2050 die Netto-Treibhausgasemissionen auf null zu senken.⁷⁷ Auch die Zwischenziele der Senkung von Treibhausgasen bis zum Jahr 2030 wurden durch den Europäischen Rat von 40 % auf 55 % nochmals verschärft.⁷⁸ Die deutsche Bundesregierung legte ihrerseits im Mai 2021 nach einer erfolgreichen Klage von Umweltschützern vor dem Bundesverfassungsgericht einen erweiterten Gesetzentwurf zum alten Klimaschutzgesetz vor, nach dem Deutschland bereits 2045 keine Netto-Treibhausgasemissionen ausstoßen soll.⁷⁹ Damit stellt sich Deutschland eine herausfordernde Aufgabe, die 739 Mio. t Kohlenstoffdioxid-Äquivalente, die 2020 ausgestoßen wurden, deutlich zu reduzieren. Neben dem Energiesektor, der etwa 30 % dieser Emissionen ausmacht, hat die Industrie mit 24 % einen erheblichen Anteil an den gesamten Emissionen.⁸⁰



Abb. 2: Denkbare Einsatzmöglichkeiten für Wasserstoff

Zur Reduzierung dieser Gesamtemissionen wird auch Wasserstoff als ein Mittel angesehen, die angestrebten Ziele zu erreichen. Die Nutzungsmöglichkeiten von Wasserstoff in der Industrie und im Verkehrs- sowie Energiesektor sind ebenso wie die Herstellungswege breit gefächert. Eine Vielzahl direkter Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff ist denkbar (siehe Abb 2). In einigen Bereichen wie der chemischen Industrie wird er schon heute als Grundchemikalie eingesetzt. In anderen Bereichen ist der breite Einsatz von „grünem“

⁷⁷ Europäische Kommission: *Der europäische Grüne Deal*, Brüssel 2019, S. 2.

⁷⁸ Küster Simic, André; Schönfeldt, Janek: *H2-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus*, in: Working Paper Forschungsförderung (Hans-Böckler-Stiftung), 260, 2022, S. 14.

⁷⁹ Küster Simic/Schönfeldt, *H2-Transformation*, S. 15.

⁸⁰ Ebd.

Wasserstoff noch Zukunftsvision. Die unterschiedlichen Möglichkeiten, die nicht nur in der Politik, sondern auch in der Gesellschaft in den letzten Jahren immer stärker diskutiert werden, zeigen das Potential dieses chemischen Energieträgers einerseits für die notwendige Energiewende und andererseits für die langfristige Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen. Inwieweit diese Hoffnung berechtigt zu sein scheint soll in den folgenden Unterkapiteln näher dargestellt werden. Dabei wird kurz auf den Energiesektor und der Nutzung von Wasserstoff in selbigem eingegangen. Der Fokus liegt jedoch bei der Betrachtung des Industrie- und Verkehrssektors, da hierin die größten Chancen gesehen werden, beide Sektoren in bestimmten, klar definierten Bereichen nachhaltig umzugestalten. Besonders im Verkehrssektor spielt dabei die Untersuchung der Vor- und Nachteile von Wasserstoff- im Vergleich zu Elektroantrieben eine entscheidende Rolle. Diese soll ebenfalls genauer betrachtet werden.

2.2.1. Wasserstoff im Energiesektor

Den Energiesektor in Bereichen der Strom- oder Wärmeerzeugung umzugestalten, ist angesichts der hohen Kohlenstoffdioxid-Emissionen in diesem Bereich von großer Bedeutung. Wasserstoff als Energieträger kann sowohl in Brennstoffzellen zur Stromproduktion als auch in Heizkraftwerken zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. Allerdings zeigt sich in der Forschungslandschaft ein recht geschlossenes Meinungsbild, dass Wasserstoff zu wertvoll ist. Verschiedene Studien verweisen darauf, dass Wasserstoff zum Heizen zu teuer und zu ineffizient ist. So bescheinigt eine IRENA-Studie Wasserstoff zum Heizen die niedrigste Marktreife aller möglichen Wasserstoffanwendungen.^{81,82} Eine Ausnahme bilden lediglich Studien, die im Auftrag der Gaswirtschaft entstanden sind. Hier wird Wasserstoff durchaus als möglicher Energieträger für das Heizen angesehen. Die Gründe sind jedoch stärker in den Interessen der Gaswirtschaft zu suchen, die die bereits bestehenden Netze weiterhin vermarkten möchte.⁸³ Es ist daher sicher, dass Wasserstoff für die Bereitstellung von Wärmeenergie nicht in Frage kommt. Auch für eine Stromerzeugung im großen Maßstab muss dies angenommen werden, da bereits die Umwandlung von Solarenergie zur Erzeugung von Wasserstoff und die darauffolgende erneute Umwandlung in Strom immer mit Wärmeverlusten verbunden ist⁸⁴ und solch ein Weg als unwirtschaftlich angesehen werden muss.

Hervorzuheben sind jedoch die Möglichkeiten, die sich durch die Speicherung von chemischer Energie durch den Energieträger Wasserstoff ergeben sowie die Möglichkeit eines leichten Transportes. Eine der größten Herausforderungen, die mit dem verstärkten Ausbau erneuerbarer Energie im Wind und Solarbereich einhergehen, ist die Ausbalancierung von Stromerzeugung und -verbrauch. Mögliche Energieüberschüsse, die an wind- oder sonnenreichen Tagen entstehen, können nicht ohne weiteres in die Stromnetze

⁸¹ Clausen, Das Wasserstoffdilemma, S. 42-46.

⁸² IRENA (International Renewable Energy Agency): *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I - Trade outlook for 2050 and way forward*, Abu Dhabi 2022, S. 17-18.

⁸³ Clausen, Das Wasserstoffdilemma, S. 46.

⁸⁴ Ströbele, Wolfgang: *Energiewende einfach erklärt. Von guten Absichten und unbequemen Fakten*, Wiesbaden: Springer 2022, S. 147.

eingespeist werden. An dieser Stelle sind Energiespeicher nötig, die diese Überschüsse abfangen. Diese können dann gezielt eingesetzt werden, wenn über einen längeren Zeitraum der Strom aus erneuerbaren Energie witterungsbedingt im Winter reduziert ist und gleichzeitig größere Energiemengen benötigt werden.⁸⁵ Die Elektrolyse von Wasser ist hierbei eine Möglichkeit, Stromüberschüsse sinnvoll einzusetzen, um „grünen“ Wasserstoff als Energiespeicher herzustellen. Prognostiziert wird, dass der durch den stark zunehmenden Ausbau an erneuerbaren Energien erhöhte Speicherbedarf von Wasserstoff überwiegend innerhalb von Salzkavernen und Wasserstoff-Röhrenspeichern erfolgt.⁸⁶

2.2.2. Wasserstoff und „grüner“ Stahl

Mit den gesetzlichen Vorgaben folgt, dass der Industriesektor von 283 Mio. t Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten im Jahr 2019 (2020: 178 Mio. t Kohlenstoffdioxid-Äquivalente) bis 2030 nur noch maximal 118 Mio. t Kohlenstoffdioxid-Äquivalente ausstoßen darf.⁸⁷ Allein auf die Stahlindustrie in Deutschland entfielen 2020 7 % der Emissionen oder umgerechnet 52 Mio. t an Kohlenstoffdioxid-Äquivalenten.⁸⁸ Damit zeigt sich besonders in diesem Bereich sowohl der große Bedarf, als auch das große Potential Kohlenstoffdioxid-Emissionen zu senken. „Grüner“ Wasserstoff wird als zentraler Baustein bei der Abkehr der Stahlindustrie von fossilen Energieträgern angesehen, die für den überwiegenden Teil der Emissionen in diesem Sektor verantwortlichen sind. Zudem sind aus technischer Sicht bereits alle Voraussetzungen zur Direktreduktion von Eisenerzen mit Wasserstoff gegeben.⁸⁹

Die bisherige Primärstahlproduktion beruht zu etwa 70 % auf dem Hochofenprozess.⁹⁰ Ausgangsstoffe sind bei diesem Prozess Kohle und Eisenerz. Als Vorbereitung für die Verhüttung des Eisenerzes wird die Kohle im ersten Schritt zu Koks umgesetzt, damit mögliche Verunreinigungen, die den Hochofenprozess stören könnten, vorab beseitigt werden. In Hüttenwerken wird dann das fein zerkleinerte Eisenerz in Sinteranlagen für den Hochofenprozess vorbereitet. Das gesinterte Eisenerz wird mit Koks und weiteren Chemikalien versetzt und im Hochofen bei ca. 2200 °C erhitzt. Dabei wird das Eisenoxid zu Eisen reduziert, der Kohlenstoff über das entscheidende Zwischenprodukt Kohlenstoffmonoxid zu Kohlenstoffdioxid oxidiert.⁹¹ Je nach Temperatur (500 °C - 1600 °C) werden die unterschiedlichen Eisenoxide (Hämatit Fe₂O₃, Magnetit Fe₃O₄ und Wüstit FeO) im Hochofen mittels Kohlenstoffmonoxid, das während des Verbrennungsprozesses gebildet

⁸⁵ Farchmin, Fred: *Die Entwicklung von Großelektrolyse-Systemen: Notwendigkeit und Herangehensweise*, in: Johannes Töpler und Jochen Lehmann (Hrsg.): *Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven*, Berlin: Springer Vieweg 2017, S.231.

⁸⁶ Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen: *Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen*, Düsseldorf 2019, S. 83-84.

⁸⁷ Küster Simic/Schönfeldt, H₂-Transformation, S. 16.

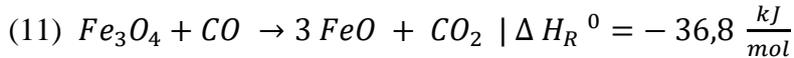
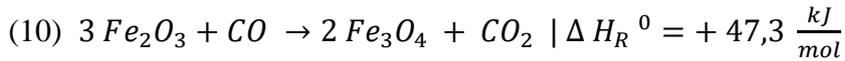
⁸⁸ Ebd.

⁸⁹ Ebd., S. 17.

⁹⁰ Ebd., S. 37.

⁹¹ Ebd.

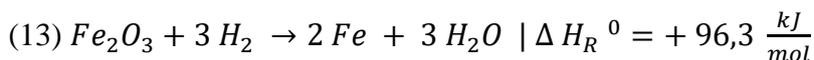
wird, reduziert (10),⁹² (11),⁹³ (12).⁹⁴ Das hierbei entstehende flüssige Roheisen, wird dann zusammen mit Stahlschrott und eingeblasenem Sauerstoff zu Rohstahl weiterverarbeitet.⁹⁵



Die Vorteile dieses Prozessverfahrens liegen in der hohen Qualität des Stahls und den niedrigen Kosten.⁹⁶ Nachteilig sind jedoch die hohen Kohlenstoffdioxid-Emissionen:

„Aufgrund der sich abzeichnenden Entwicklung innerhalb des Emissionshandelssystems der Europäischen Union führt dies aufgrund der Internalisierung von Umweltkosten aktuell und perspektivisch zu signifikanten Mehrkosten. Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung ist die Implementierung von emissionsarmen bzw. emissionsfreien Technologien für die Primärstahlerzeugung auch aus wirtschaftlicher Sicht unumgänglich.“⁹⁷

Bei der Direktreduktion mittels Wasserstoffs erfolgt die Reduktion des Eisenoxids zu Eisen unter der Bildung von Eisen und Wasser (13). Damit entsteht anders als beim Hochofenprozess kein Kohlenstoffdioxid als Treibhausgas. Die niedrigeren Temperaturen bei der Direktreduktion sorgen aber dafür, dass sich das Roheisen nicht verflüssigt, sondern sogenannter „Eisenschwamm“ entsteht.⁹⁸



Deswegen muss in den weiteren Produktionsschritten dieser Eisenschwamm unter Energiezufuhr geschmolzen werden, damit Rohstahl entsteht. Mögliche Wege dorthin laufen über Elektrolichtbogenöfen oder Einschmelzer. Bei Elektrolichtbogenöfen wird mit Strom ein Lichtbogen zwischen einer Elektrode und dem Eisenschwamm mit dort zugesetztem Stahlschrott erzeugt. Durch die hohen Temperaturen schmelzen schließlich Stahlschrott und Eisenschwamm. Es entsteht Rohstahl. Bei dem zweiten Weg wird der Rohstahl erzeugt, indem der noch heiße Eisenschwamm verflüssigt und mit Stahlschrott und Sauerstoff versetzt wird.⁹⁹ Damit ist für die CO₂-Neutralität der Direktreduktion der Einsatz von „grünem“ Wasserstoff und die Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Energien entscheidend.

⁹² Hollemann/Wiberg, Lehrbuch der anorganischen Chemie, S. 1938.

⁹³ Ebd.

⁹⁴ Ebd.

⁹⁵ Küster Simic/Schönfeldt, H₂-Transformation, S. 37.

⁹⁶ Ebd., S. 37-38.

⁹⁷ Ebd., S. 38.

⁹⁸ Ebd.

⁹⁹ Ebd.

Der Ausbau erneuerbarer Energien im Allgemeinen wird u.a. auch durch den steigenden Strombedarf und den Bedarf an „grünem“ Wasserstoff notwendig. Neben ökologischen Aspekten der Emissionsreduktion müssen auch ökonomische und soziale Faktoren miteinbezogen werden, um eine Gesamtbilanzierung der Nachhaltigkeit vornehmen zu können. Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit bei der Umstellung der Stahlindustrie in Deutschland wird die Bereitstellung günstiger Energieträger sein. Die Kosten für Energie machen bei der Direktreduktion von Eisenerz 50 % der Gesamtkosten aus, bei der Hochofenroute sind es lediglich 20 %.¹⁰⁰ Für eine Übergangszeit wird angenommen, dass auch Erdgas in Direktreduktionsprozessen eingesetzt werden muss, damit der Transformationsprozess gelingen kann, solange „grüner“ Wasserstoff noch nicht im ausreichenden Maße verfügbar ist. Zwar sind mit dem Einsatz von Erdgas ebenfalls Kohlenstoffdioxid-Emissionen verbunden, jedoch fallen diese deutlich geringer aus als bei der Nutzung von Kohle.¹⁰¹ Die Realisierung solcher Direktreduktionsanlagen ist noch häufig projektbasiert¹⁰², allerdings wird auch hier der Ausbau verstärkt und die Dimensionierung gesteigert. Mit Fördermitteln des Bundes wurde so bspw. durch *thyssenkrupp* mit dem Bau der größten deutschen Direktreduktionsanlage begonnen, die ab 2026 jährlich 2,5 Millionen t Eisen liefern soll.¹⁰³ Vorteilhaft ist, dass Direktreduktionsverfahren mit Methan bereits seit vielen Jahren bekannt sind. Die Etablierung des Direktreduktionsverfahrens kann zunächst mit Erdgas erfolgen, bevor bei ausreichender Bereitstellung von „grünem“ Wasserstoff ein fast vollständig emissionsfreier Weg auch aus wirtschaftlicher Perspektive beschritten werden kann.¹⁰⁴ Abseits der ökologischen und ökonomischen Dimension wird die Umstrukturierung des Arbeitsbereichs entscheidend sein, die mit der Umstellung zu Direktreduktionsverfahren einhergeht. Hier wird mittelfristig die Notwendigkeit entstehen, weiterführende Qualifizierungsmaßnahmen für Mitarbeiter einzurichten, die nun nicht mehr an klassischen Hochöfen arbeiten. Besonders gut ausgebildete Fachkräfte werden in den nächsten zwei Jahrzehnten für diesen Umbau benötigt. Das stellt ebenfalls bei einem weiter anzunehmenden Fachkräftemangel zusätzliche Herausforderungen an ein Gelingen der Transformation hin zu „grünem“ Stahl.¹⁰⁵ Der Umbau der Stahlindustrie besitzt ein großes Potential, die Kohlenstoffdioxid-Emissionen deutlich zu reduzieren. Allerdings handelt es

¹⁰⁰ Küster Simic/Schönfeldt, H₂-Transformation, S. 44-45.

¹⁰¹ Ebd., S. 44-45 & S. 98.

¹⁰² ArcelorMittal: *Wasserstoff-Projekt H2H Hamburg (H₂ aus Hamburg)*, <https://www.h2-hh.de/de/projekte/details/h2h-hamburg.html> (12.01.2024); HyIron: *Pressemitteilung. In Lingen wird weltweit größte Wasserstoff-Direktreduktionsanlage zur Herstellung von grünem Eisen von Niedersachsens Umwelt- und Energieminister Meyer eröffnet*, <https://hyiron.com/de/eroeffnung-der-wasserstoff-direktreduktionsanlage-in-lingen-durch-niedersachsens-umwelt-und-energieminister-meyer/> (27.09.23).

¹⁰³ Thyssenkrupp: *thyssenkrupp beschleunigt grüne Transformation: Bau der größten deutschen Direktreduktionsanlage für CO₂-armen Stahl entschieden*, 08.09.2022, <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemitteilungen/pressemeldungen/pressemeldung/thyssenkrupp-beschleunigt-gruene-transformation--bau-der-grossten-deutschen-direktreduktionsanlage-fur-co2-armen-stahl-entschieden-146797> (12.01.2024).

¹⁰⁴ Hebling, Christopher; Ragwitz, Mario; Fleiter, Tobias; Groos, Ulf; Härle, Dominik; Held, Anne; Jahn, Matthias; Müller, Nils; Pfeifer, Thomas; Plötz, Patrick; Ranzmeyer, Ombeni; Schaadt, Achim; Sensfuß, Frank; Smolinka, Tom; Wietschel, Martin: *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland*, Karlsruhe (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI) und Freiburg (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE) 2019, S. 19-21.

¹⁰⁵ Küster Simic/Schönfeldt, H₂-Transformation, S. 100.

sich um eine mittelfristige bis langfristige Aufgabe, wodurch die Emissionseinsparungen erst nach einigen Jahren oder Jahrzehnten sichtbar werden.

2.2.3. Wasserstoff und Mobilität

Zur Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Verkehrsbereich wird „grüner“ Wasserstoff als ein möglicher Lösungsweg angesehen, diesen Sektor nachhaltig umzugestalten. Neben Fahrzeugen mit Elektromotor gelten Fahrzeuge mit Brennstoffzellen als Schlüsselement zur Gestaltung der Verkehrswende und der Abkehr von klassischen Motoren, die Diesel oder Benzin nutzen. Teilweise scheinen sich diese beiden Antriebsformen auf der Suche nach dem idealen Lösungsweg gegenüber zu stehen. Daher ist der Blick auf den Nutzen beider Antriebsformen sinnvoll, um bewerten zu können, in welchen Bereichen des Nah- und Fern- sowie des Individualverkehrs und Gütertransports die größten Chancen bei der Umstellung auf wasserstoffbasierte Antriebsformen liegen und in welchen Bereichen ein Einsatz von Wasserstoff als nicht zielführend für eine nachhaltige Verkehrswende angesehen werden kann.

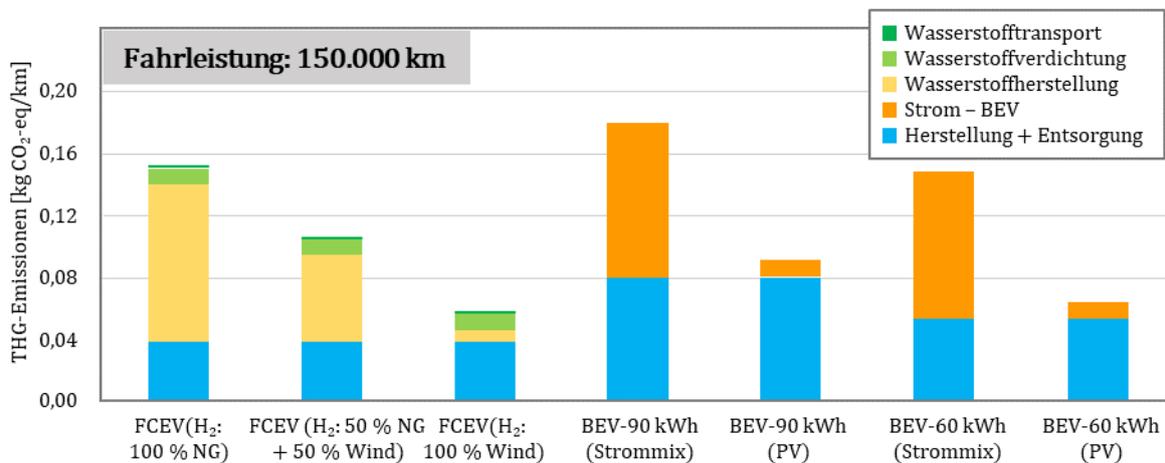


Abb. 3: Treibhausgasemissionen (THG) bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen (FCEV) und Elektroautos (BEV) (2020-2030).¹⁰⁶ (H₂:NG: Wasserstoff aus Erdgasdampfpreformierung, H₂:Wind: Wasserstoff aus Elektrolyse mit Windstrom; PV: Photovoltaik; Strommix: Strom aus erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Energieträgern)

Stand Dezember 2023 sind für den deutschen PKW-Markt eine Vielzahl an Elektroautos der Klein- und Mittelklasse zugelassen. Allerdings existieren nur zwei serienmäßig produzierte Mittelklassemodell, die mit Brennstoffzellen arbeiten.¹⁰⁷ Für den Individualverkehr bieten Elektroautos schon heute eine breite Auswahlmöglichkeit an Modellen, die sich bei Leistung,

¹⁰⁶ Abbildung nach: Sternberg, André; Hank, Christoph; Hebling Christopher (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE): *Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km*, Freiburg 2019, S. 3; online unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf, (27.03.2024).

¹⁰⁷ ADAC: *Wasserstoffautos: Technik, Modelle, Tests, Tankstellen*, 29.12.2023, <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/wasserstoffauto-so-funktioniert-es/> (28.03.24).

Reichweiten und Ladezeiten unterscheiden. Für die Bilanzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen von Batteriefahrzeugen müssen daher die Kapazität der Akkus und der Strom zum Laden, genauso wie für die Brennstoffzellenautos die Bereitstellung des Wasserstoffs mitberücksichtigt werden. Das Fraunhofer-Institut verglich 2019 in einer Studie¹⁰⁸ die Treibhausgas-Emissionen (berechnet als CO₂-Äquivalente) von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen. Mit einbezogen wurden für die Berechnungen die Herstellung und Entsorgung der Batterien bzw. Brennstoffzellen, die Bereitstellung des Wasserstoffs sowie des Stroms. Der Zeitraum dieser prognostizierten Emissionen unterteilt sich in die Jahre von 2020 bis 2030 (siehe Abb. 3) und 2030 bis 2040 (siehe Abb. 4).

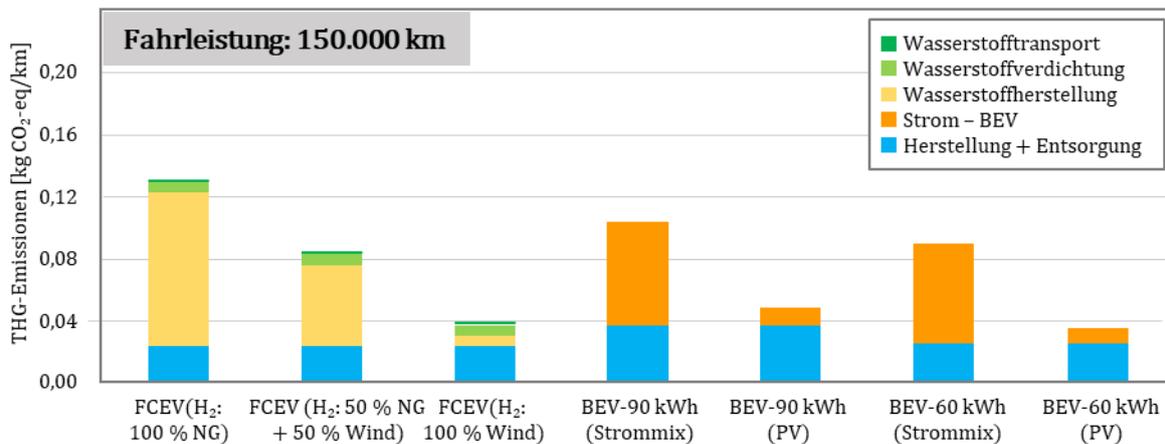


Abb. 4: Treibhausgasemissionen bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Elektroautos (2030-2040)¹⁰⁹

Zu Grunde gelegt wird in allen Fällen eine Fahrleistung der Fahrzeuge von 150.000 km. Deutlich erkennbar ist, dass für den Zeitraum von 2020 bis 2030 die Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei Herstellung und Entsorgung von Batteriefahrzeugen deutlich über denen von Brennstoffzellenautos liegen. Elektroautos mit höherer Leistung (bspw. 90 kWh) verursachen mehr Kohlenstoffdioxid-Emissionen pro km als weniger leistungsstarke Elektromotoren. Die für die Bereitstellung von Wasserstoff oder Strom ausgestoßenen Kohlenstoffdioxid-Emissionen unterscheiden sich sehr stark darin, ob der Strom aus erneuerbaren Energien bezogen wird und ob der Wasserstoff mittels erneuerbarer Energien hergestellt wurde. Bei den Gesamt-Emissionen pro km bei Batteriefahrzeugen und Brennstoffzellenautos sind relativ geringe Unterschiede (0,14 - 0,18 kg CO₂-Äquivalent/km) erkennbar, wenn ein Strommix bzw. Erdgas bezogen wird. Das gleiche gilt für beide Fahrzeugtypen, wenn die Basis „grüner“ Wasserstoff bzw. Solarstrom ist. Tendenziell haben aber leistungsärmere Elektrofahrzeuge (60 kWh) einen etwas geringeren Kohlenstoffdioxid-Ausstoß als Brennstoffzellenfahrzeuge und leistungsstarke Elektroautos (90 kWh). Für den Zeitraum von 2030 bis 2040 verändern sich die Prognosen, dass die Gesamt-Emissionen zwar für alle Fahrzeugtypen gesenkt werden können, allerdings wird sich der Kohlenstoffdioxid-

¹⁰⁸ Sternberg et al. (Fraunhofer-Institut ISE), Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge.

¹⁰⁹ Abbildung nach: Sternberg et al. (Fraunhofer-Institut ISE), Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge, S. 5.

Ausstoß pro km bei leistungsstärkeren Elektromotoren, die mit einem Strommix geladen werden, deutlich gegenüber den Brennstoffzellenfahrzeugen reduzieren, die mit Wasserstoff auf Basis fossiler Energieträger betrieben werden. Die Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei allen Fahrzeugtypen nähern sich in diesem Zeitraum noch deutlicher einander an, wenn „grüner“ Wasserstoff bzw. Solarstrom eingesetzt wird (etwa 0,4 kg CO₂-Äquivalent/km). Aus ökologischer Perspektive werden Brennstoffzellenfahrzeuge bei der Kohlenstoffdioxid-Bilanz kaum Vorteile gegenüber Elektrofahrzeugen im PKW-Bereich bieten. Erstgenannte sind jedoch weiterhin im Vorteil gegenüber PKWs mit Verbrennermotoren.

Für die Bewertung von Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen im Individualverkehr müssen neben den Kohlenstoffdioxid-Emissionen noch weitere Aspekte mitberücksichtigt werden, um den Einsatz aus verschiedenen Perspektiven heraus betrachten zu können. Hierzu zählen auch die Wirkungsgrade der Motoren, d.h. wie viel der eingesetzten Energie tatsächlich in Bewegungsenergie umgesetzt wird. Hier zeigt sich, dass der höchste Wirkungsgrad bei Elektrofahrzeugen liegt. Deutlich weniger effizient sind sie bei Brennstoffzellenfahrzeugen und Verbrennern (siehe Abb. 5).

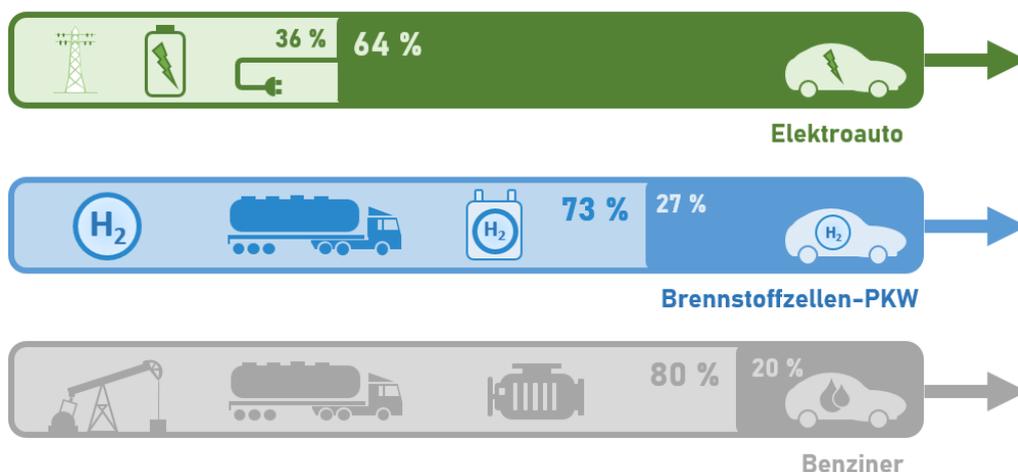


Abb. 5: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Antriebe¹¹⁰

Sowohl Elektroautos als auch Brennstoffzellenfahrzeuge benötigen eine passende Infrastruktur. Hierzu zählen u.a. elektrische Ladestationen und Tankstellen für Wasserstoff. Mehr als 90.000 Ladepunkte für Elektroautos existieren in Deutschland und die Anzahl nimmt stetig zu.¹¹¹ Dem gegenüber steht die deutlich geringere Anzahl an Tankstellen, die

¹¹⁰ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): *Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos?*, 01.10.2021, <https://www.bmuv.de/themen/luft-jaerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten>, (27.03.2024).

¹¹¹ Bundesnetzagentur: *Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur*, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html> (09.08.2023). Im Vergleich hierzu stehen in Deutschland insgesamt 14.453 klassische Tankstellen zur Verfügung. en2x - Wirtschaftsverband Fuels und Energie e. V.: *Tankstellenbestand*, <https://en2x.de/service/statistiken/tankstellenbestand/> (09.08.2023).

Wasserstoff anbieten. Zu Beginn des Jahres 2023 gab es in Deutschland nur 105 Stück.¹¹² Für den Nah- und Individualverkehr hat die Elektromobilität somit auch den Vorteil, dass wesentlich leichter Strom zum Laden bezogen werden kann als Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge. Es ist erkennbar, dass die Automobilindustrie den Fokus nicht auf Brennstoffzellen legt. Wie bereits erwähnt, sind lediglich zwei serienmäßig produzierte Modelle auf dem deutschen Markt verfügbar. Der Preis für beide Mittelklassemodelle liegt zwischen 65.990 €¹¹³ und 77.300 €¹¹⁴ und übertrifft damit deutlich die Anschaffungspreise für ein Mittelklassemodell bei Elektroautos (ab 35.790 €)¹¹⁵ oder Verbrennern (ab 31.660 €)¹¹⁶. Elektroautos als Kleinwagen sind mit einem Preis ab 22.750 €¹¹⁷ nochmals preiswerter. Beim Unterhalt zeigt sich, dass Wasserstoff zwar bei den Energiekosten für eine Strecke von 100 km etwa vergleichbar mit den Energiekosten von Diesel oder Benzin ist, aber auch hier ist der Strom deutlich günstiger (siehe Tab. 2).¹¹⁸

	Kleinwagen/Kompaktklasse	Mittel-/Oberklasse
Super E5	11,07	13,93
Super E10	10,74	13,51
Diesel	8,21	9,08
Strom	5,26	5,37
Erdgas H (CNG)	6,25	7,39
Autogas (LPG)	7,56	-
Wasserstoff	-	11,08

Tab. 2: Energiekostenvergleich für PKW in €/100 km

Aus sozialer Perspektive ergibt sich besonders bei Haushalten mit kleineren Einkommen die Problematik, dass die Beschaffungskosten von Elektroautos höher sind als bei klassischen Verbrennern. Brennstoffzellenbasierte Automobile sind nochmals kostenintensiver. Dies ist ein Faktor, der bei der nachhaltigen Umgestaltung des Verkehrssektors nicht unberücksichtigt bleiben darf, da schon heute die Kosten für Mobilität besonders bei

¹¹² Lohse, Andreas (Power-to-X): *Weltweit gibt es 814 Wasserstofftankstellen - 105 sind es in Deutschland*, Wasserstoff International, 08.02.2023 <https://power-to-x.de/weltweit-gibt-es-814-wasserstofftankstellen-105-sind-es-in-deutschland/> (09.08.2023).

¹¹³ ADAC: *Test Hyundai Nexo: Elektro-SUV mit Brennstoffzelle*, 13.01.2023, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-nexo/>, (27.03.2024).

¹¹⁴ ADAC: *Es gurgelt und summt: Der Toyota Mirai im ADAC Test*, 03.07.2023, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/>, (27.03.2024).

¹¹⁵ ADAC: *Kostencheck Elektroautos: Das sind die 30 günstigsten Modelle*, 05.01.2024, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-elektroautos/> (27.03.2024) In diesen Preisangaben wurde die staatliche Förderprämie für Elektroautos von bis zu 6570 Euro bereits abgezogen.

¹¹⁶ ADAC: *Top 10: Die günstigsten Mittelklasse-Autos im ADAC Kosten-Check*, 04.01.2024, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-mittelklasse-autos/> (27.03.2024).

¹¹⁷ ADAC: *Kostencheck Elektroautos: Das sind die 30 günstigsten Modelle*, 05.01.2024, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-elektroautos/> (27.03.2024). In diesen Preisangaben wurde die staatliche Förderprämie für Elektroautos von bis zu 6570 Euro bereits abgezogen.

¹¹⁸ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK): *Energiekostenvergleich für Pkw*, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/2021-08-pkw-energiekostenvergleich.html> (04.01.2024).

Menschen mit geringen Einkommen eine deutlich höhere finanzielle Belastung darstellen und größere Sorgen damit einhergehen als bei der Mitte der Gesellschaft oder sogar der einkommensstarken Oberschicht.¹¹⁹

Im Individual- und Privatverkehrssektor scheint daher die Elektromobilität ein höheres Potential für eine nachhaltige Verkehrswende zu entwickeln als brennstoffzellenbasierte Antriebe. Ein anderes Bild ergibt sich jedoch im Fern- und Güterverkehr. Hier erweisen sich Vorteile, die Elektroantriebe bei Kleinwagen besitzen, als wenig praktisch für Lastfahrzeuge. Das große Potential bei der Umstellung von Diesel-Lastwagen zu Wasserstoff wird darin gesehen, dass Wasserstoff sowohl in Brennstoffzellen als auch in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann. Die Umstellung der Produktion von klassischen LKW-Dieselmotoren auf Wasserstoffverbrennungsmotoren wird von renommierten deutschen LKW-Herstellern als relativ leicht und kurzfristig, innerhalb weniger Jahre umsetzbar eingestuft.¹²⁰ In der Forschung wird die Einschätzung unterstützt, dass Wasserstoff sowohl in Brennstoffzellen als auch in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden kann, um die Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Schwerlastverkehr deutlich zu senken.¹²¹ Vorteilhaft sind auch die erheblich niedrigeren Tankzeiten als die Ladezeiten bei Batteriefahrzeugen. Bei einer ähnlichen Reichweite wie klassische Diesel-LKW sind Brennstoffzellenfahrzeuge leichter als Elektrofahrzeuge, da sie ohne die schweren Batterien auskommen.¹²² Finanzpolitisch wird der Umbau durch Förderprogramme im Rahmen der nationalen Wasserstoffstrategie unterstützt, die sowohl die Produktion entsprechender LKW als auch den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur (bspw. Tankstellen) fördert.¹²³

Für den Güterverkehr auf der Schiene wurden in den vergangenen Jahren ebenfalls Projekte angestoßen, die mit Wasserstoff betrieben werden sollen. Vor allem der Ersatz von Diesellokomotiven, die das nicht elektrifizierte Schienennetz in Deutschland bedienen, das knapp 30 % vom Gesamtschienennetz ausmacht, ist die Brennstoffzellen-Technologie eine reichweitenstarke Alternative im Vergleich zu Batteriezügen.¹²⁴ Bereits jetzt gibt es mit dem weltweit ersten Brennstoffzellenzug *Coradia iLint* von Alstom einen Regionalzugtyp, der erfolgreich vermarktet wurde. Reichweite und Leistung entsprechen denen vergleichbarer Diesellokomotiven. Allerdings sind die Preise um 20 % höher als bei Dieselzügen.¹²⁵

Ein weiteres Einsatzfeld eröffnet sich für die Nutzung von Wasserstoff bei Schiffen. Besonders die Transport- und Waren-Schifffahrt (Kreuzfahrtschiffe, Containerschiffe) ist nicht nur beim Ausstoß von Kohlenstoffdioxid kaum reglementiert, sondern auch bei Ruß, Schwefel- oder Stickoxiden.¹²⁶ Erste Projekte zur Umrüstung bestehender und die

¹¹⁹ Wolf, Ingo; Fischer, Anne-Kathrin; Huttarsch, Jean-Henri (Herausgegeben von: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)): *Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021*, Potsdam 2021; online unter:

https://ariadneprojekt.de/media/2021/08/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2021.pdf, (27.03.2024).

¹²⁰ Synwoldt, Christian; Novak, David: *Wasserstoff. Technik - Projekte - Politik*, Weinheim: Wiley 2022, S. 295.

¹²¹ Synwoldt/Novak, Wasserstoff, S. 295.

¹²² Ebd.

¹²³ Ebd., S. 296.

¹²⁴ Ebd., S. 306-307.

¹²⁵ Ebd.

¹²⁶ Ebd., S. 310.

Entwicklung neuer Schiffe mit Brennstoffzellen sind u.a. in Europa bereits angelaufen.¹²⁷ Schiffe mit Brennstoffzellen sind vielversprechend, da sie einen hohen Wirkungsgrad besitzen und wenig Kohlenstoffdioxid ausstoßen. Die Gesamtemissionen an klimaschädlichen Gasen können so bei einem durchschnittlichen Lebenszyklus eines Schiffes von 20 bis 30 Jahren um bis zu 81 % gesenkt werden.^{128, 129} Problematisch ist allerdings noch die Speicherung des Wasserstoffs besonders für große Schiffe. Zwar hat Wasserstoff als Energieträger im Vergleich zu einem Lithium-Ionen-Akku eine höhere Energiedichte, jedoch eine reduzierte Ladekapazität bezogen auf Volumen oder die Masse. Auch der Einsatz von Batterien auf Schiffen wird als mögliche Alternative zu fossilen Energieträgern angesehen. Hier ergeben sich ähnliche Vor- als auch Nachteile wie bei dem Einsatz im Schwerlast- und Schienenverkehr, weshalb eine Kopplung beider Technologien angedacht wird, um die Vorteile aus beiden Bereichen nutzen zu können.¹³⁰ Aktuell wird mit *Pa-X-ell2* zudem ein Projekt realisiert, bei dem auf Schiffen Methanol-Reformer eingesetzt werden, die Wasserstoff vor Ort für Brennstoffzellen bereitstellen können.¹³¹

In der Luftfahrt wird Wasserstoff als Energieträger ebenfalls diskutiert. Allerdings sind auch hier noch zahlreiche Probleme zu identifizieren, die auf kürzere Sicht eine Nutzung dieses Treibstoffs erschweren. Neben der noch nicht vorhandenen Infrastruktur bei Wasserstoff-tankstellen an Flughäfen, ist die Speicherung des Wasserstoffs in den Flugzeugen eine Herausforderung. Zwar ist die Energiedichte von Wasserstoff etwa drei Mal größer als bei flüssigen fossilen Kraftstoffen wie Kerosin¹³² und dementsprechend vor allem für Langstreckenflüge ein theoretisch guter Lösungsweg, jedoch ist Kerosin wesentlich billiger als Wasserstoff.¹³³ Um eine Umstellung von Kerosin hin zu Wasserstoff oder anderen alternativen Kraftstoffen im Flugverkehr zu realisieren, wird die Verteuerung von Flugzeugen und Flügen unumgänglich sein. Möglich gemacht werden kann dies durch die Erhöhung der Abgaben auf Kohlenstoffdioxid-Emissionen oder durch gesetzliche Regelungen, die die Nutzung von Kerosin verhindern. Diese Regelungen müssten aber auf internationaler Ebene umgesetzt werden.¹³⁴ Projekte, Wasserstoff bei Flugzeugen einzusetzen, sind aktuell auch bei Flugzeugbauern wie Airbus Gegenstand der Forschung. 2025 will das Unternehmen ein Flugzeug bauen, das mit Wasserstoff betrieben wird. Damit wendet sich Airbus stärker von der zunächst beförderten Entwicklung von Flugzeugen mit Batterien ab, die durch das hohe Gewicht erhebliche Nachteile besitzen.¹³⁵ Das Unternehmen betrachtet Wasserstoff als einen möglichen Weg, die Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Flugverkehr zu reduzieren. Andere Unternehmen wie Boeing setzen bei der Reduzierung auf den Einsatz von Biotreibstoffen (*SAP, sustainable aviation fuel*), die bereits eine Einsparung von bis zu 80 % an Kohlenstoffdioxid-Emissionen erreichen würden mit dem Vorteil, dass

¹²⁷ Synwoldt/Novak, Wasserstoff, S.310.

¹²⁸ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): *Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte. Kurzstudie*, Geesthacht 2022, S. 36.

¹²⁹ DLR, *Zukünftige maritime Treibstoffe*, S. 53

¹³⁰ Ebd., S. 36.

¹³¹ Ebd., S. 39

¹³² Schmidt, Thomas: *Wasserstofftechnik: Grundlagen, Systeme, Anwendungen, Wirtschaft*, München: Hanser 2020, S. 382-384.

¹³³ Synwoldt/Novak, Wasserstoff, S. 313.

¹³⁴ Ebd.

¹³⁵ Ebd.

diese schon heute einsetzbar wären. Bei allen Wegen sind allerdings Investitionen und somit auch Preiserhöhungen unumgänglich.¹³⁶

2.2.4. Chancen und Herausforderungen

Wasserstoff als Energieträger, um die Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Deutschland langfristig und deutlich zu reduzieren, scheint ein vielversprechender Lösungsweg zur Erreichung dieses Ziels zu sein. Zwar ergeben sich noch zahlreiche Hürden zur breiten Einbeziehung von Wasserstoff in den Energiesektor wie bspw. der Bereitstellung und Speicherung von „grünem“ Wasserstoff, aber vor allem die Aussicht, die Kohlenstoffdioxid-Emissionen im Vergleich zum Einsatz fossiler Energieträger erheblich reduzieren zu können, zeigt die großen Vorteile, die mit der Nutzung von Wasserstoff einhergehen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wasserstoff besonders für die Stahlindustrie, den Güter- sowie Fernverkehr großes Potential besitzt. Die Elektromobilität ist dagegen im Privatverkehr sinnvoller. Zudem ist sie bereits stärker ausgebaut als vergleichbare Brennstoffzellentechnologien. Hier hat die Elektromobilität das größere Potential und besseren Chancen diesen Bereich nachhaltig umzuwandeln.

Die nachhaltige Umgestaltung des Industrie- und Verkehrssektors steht und fällt aber mit der kontinuierlichen und ausreichenden Bereitstellung kostengünstiger Energieträger. Damit kommen sowohl der Strom-, als auch der Wasserstoffproduktion die Aufgabe zu, in den nächsten Jahren von klassischen auf erneuerbare Formen umzustellen, damit bei möglichst geringen Kohlenstoffdioxid-Emissionen wettbewerbsfähiger „grüner“ Strom und „grüner“ Wasserstoff produziert wird. Das wird vermutlich die größte Herausforderung werden. Erst mit dieser Transformation des Energiesektors können die Umgestaltung des Industrie- und des Verkehrssektors dauerhaft gelingen. Daher kommt auch der Forschung die Aufgabe zu, neue Herstellungsverfahren für Wasserstoff zu erschließen.

In den folgenden Kapiteln soll mit der Photoreformierung ein weiterer Ansatz aus der aktuellen Forschung präsentiert und genauer untersucht werden, wie „grüner“ Wasserstoff hergestellt werden kann und welche Möglichkeiten sich für dieses Thema nicht nur in gesellschaftlichen Debatten, sondern auch in schulischen Lernkontexten ergeben.

¹³⁶ Synwoldt/Novak, Wasserstoff, S. 313.

3. Photoreformierung: theoretische Grundlagen

3.1. Photokatalyse und Photoreformierung - Definition zweier Begriffe

Der vermutlich 1910 erstmals publizierte Begriff „Photokatalyse“¹³⁷ wird durch die IUPAC so definiert, dass eine chemische Umwandlung von Reaktionspartnern in Gegenwart eines Photokatalysators erfolgt, der Licht im ultravioletten, sichtbaren oder infraroten Bereich absorbiert, und wodurch chemische Reaktionen initiiert oder die Reaktionsgeschwindigkeiten geändert werden.¹³⁸ Weiter differenziert kann der Begriff Photokatalyse heterogene Photokatalyse und homogene Photokatalyse werden. Bei der homogenen Photokatalyse sind sowohl die Edukte als auch der Photokatalysator in einer Phase. Bei der heterogenen Photokatalyse liegen die Edukte und der Photokatalysator in unterschiedlichen Phasen vor.¹³⁹ Stoffe wie Zinn(II)-oxid, Zinkoxid oder Titandioxid weisen eine photokatalytische Aktivität auf, die für unterschiedliche Prozesse nutzbar ist. Photokatalysatoren können in der Abwasserreinigung¹⁴⁰, bei Oberflächenveredelungen oder zur Luftreinigung¹⁴¹ genutzt werden. Daneben werden sie in Sonnencremes verwendet, um die Haut vor schädlicher UV-Strahlung zu schützen.^{142,143} Einer der intensivsten beforschten Photokatalysator ist Titandioxid. Gleichzeitig ist es ein Stoff, der als Weißpigment vielen Produkten des alltäglichen Lebens zu finden ist, wo teilweise die photokatalytischen Eigenschaften genutzt werden. Die grundlegenden Prozessschritte, die bei der heterogenen Photokatalyse am Katalysator ablaufen, sind bei solchen auf Halbleitermetallbasis wie Titandioxid vergleichbar und können mithilfe des Bändermodells nachvollzogen werden. Durch den Photokatalysator wird zunächst Licht absorbiert (*siehe Abb. 6*). Bei Titandioxid wird, in Abhängigkeit der Kristallstruktur (Rutil: $\lambda = 397$ nm, Anatas: $\lambda = 377$ nm)¹⁴⁴, Strahlung im Übergang vom UV-Bereich ins sichtbare Lichtspektrum absorbiert. Die Bandlücke des Titandioxids (Anatas) beträgt $E_g = 3,20$ eV (Rutil: $E_g = 3,02$ eV).¹⁴⁵ Während der Absorption geht ein Elektron aus

¹³⁷ Kisch, Horst: *Semiconductor Photocatalysis. Principles and Applications*, Weinheim: Wiley-VCH 2015, S. 7.

¹³⁸ International union of Pure and applied chemistry (IUPAC): *Photocatalysis*, in: Glossary of terms used in photochemistry. 3rd edition. (IUPAC Recommendations 2006), 79 (3), 2007, S. 384.

¹³⁹ Heffen, Maria; Tausch, Michael W.: *Photokatalyse – homogen und heterogen. Das Photo-Blue-Bottle Experiment runderneuert*, in: Praxis der Naturwissenschaften. Chemie in der Schule 64 (6), 2015, S. 51-52.

¹⁴⁰ Bickendorff, Michael; Schnabel, Tobias; Londong, Jörg: *Die photokatalytische Oxidation als ein Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung*, in: Korrespondenz Abwasser, Abfall 67 (3), 2020, S. 177.

¹⁴¹ Fujishima, Akira; Rao, Tata N.; Tryk, Donald A.: *Titanium dioxide photocatalysis*, in: Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 1 (1), 2000, S. 5-12.

¹⁴² Klingshirn, Claus F.: *Past, Present and Future Applications*, in: Claus F. Klingshirn, Bruno K. Meyer, Andreas Waag, Axel Hoffmann, Jean Geurts (Hrsg.) *Zinc Oxide. From Fundamental Properties Towards Novel Applications*, Berlin & Heidelberg: Springer 2010, S. 327.

¹⁴³ IUPAC, *Photocatalysis*, S. 384.

¹⁴⁴ Winkler, Jochen: *Titandioxid. Produktion, Eigenschaften und effektiver Einsatz*, Hannover: Vincentz Network 2013, S. 16.

¹⁴⁵ Conte, Francesco; Rossetti, Ilenia; Ramis, Gianguido; Vaulot, Cyril; Hajjar-Garreau, Samar; Bennici, Simona: *Low Metal Loading (Au, Ag, Pt, Pd) Photo-Catalysts Supported on TiO₂ for Renewable Processes*, in: *Materials* 15 (8), 2022, S. 2.

dem Valenz- in das Leitungsband über. Es bildet sich ein Elektron-Loch-Paar, das Exciton (siehe Abb. 7). Hierbei handelt es sich um einen chemisch sehr reaktiven Zustand. Das positiv geladene Loch¹⁴⁶ im Valenzband kann nun im Folgeschritt durch ein Elektron eines Donator-Teilchens gefüllt werden. Dabei wird der Donator oxidiert. Das Elektron im Leitungsband kann an ein Akzeptor-Teilchen übertragen werden, welches dadurch reduziert wird (siehe Abb. 8).¹⁴⁷ Außer der erwünschten Ladungstrennung bei der Bildung von Excitonen kann es auch zu einer Rekombination von Elektronen und den Löchern kommen, wodurch die beschriebenen Oxidations- und Reduktionsschritte nicht erfolgen.

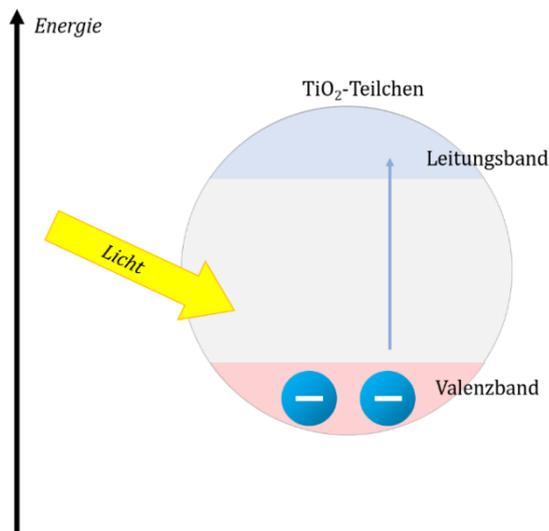


Abb. 6: Absorption von Licht durch Photokatalysator

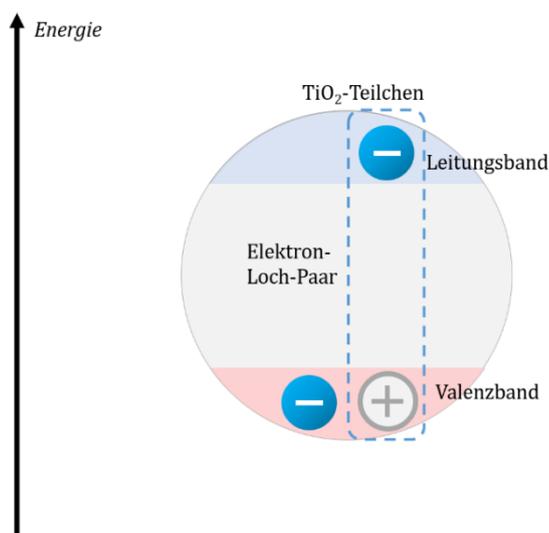


Abb. 7: Elektron-Loch-Paar

¹⁴⁶ In dieser Arbeit wird anstelle von „Elektronen-Loch“ bzw. „Elektronen-Löcher“ die Begriffe „Loch“ oder „Löcher“ gewählt.

¹⁴⁷ Winkler, Titandioxid, S. 74.

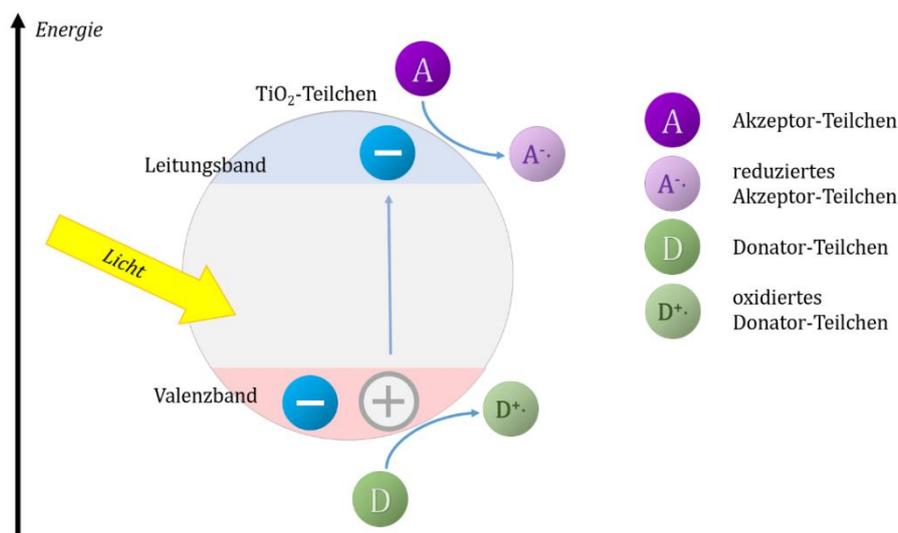


Abb. 8: Reduktion und Oxidation am Photokatalysator

Bei der Photoreformierung handelt es sich ebenfalls um einen heterogenen, photokatalytischen Prozess, der so definiert werden kann, dass organische Substrate mithilfe von Licht und eines Photokatalysators zu energetisch höherwertigen Stoffen, wie bspw. Brennstoffen umgesetzt werden.¹⁴⁸ Als Substrate kommen eine Vielzahl von Stoffen in Betracht, die von Biomasse über Kunststoffen bis hin zu Schadstoffen in Abwässern reichen, mit dem Ziel, diese in chemische Energieträger wie Wasserstoff oder Methanol umzuwandeln.¹⁴⁹ Besonders die Erzeugung von Wasserstoff als nachhaltig erzeugter Energieträger steht im Fokus der Forschungen zur Photoreformierung.^{150,151,152,153,154} Entscheidend sind die eingesetzten Photokatalysatoren und Ausgangsstoffe zur photokatalytischen Umsetzung. *Abbildung 9* zeigt die energetische Position der Valenz- und Leitungsbande ausgewählter Photokatalysatoren im Vergleich zur Normal-

¹⁴⁸ Reisner, Erwin: *Wann treffen sich organische Photoredoxkatalyse und künstliche Photosynthese?*, in: *Angewandte Chemie* 131 (12), 2019, S. 3694-3695.

¹⁴⁹ Reisner, *Photoredoxkatalyse und künstliche Photosynthese*, S. 3694-3695.

¹⁵⁰ Banerjee, Debarun; Kushwaha, Nidhi; Shetti, Nagaraj P.; Aminabhavi, Tejrj M.; Ahmad, Ejaz: *Green hydrogen production via photo-reforming of bio-renewable resources*, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 2022, S. 1-14.

¹⁵¹ Christoforidis, Konstantinos C.; Fornasiero, Paolo: *Photocatalytic Hydrogen Production: A Rift into the Future Energy Supply*, in: *ChemCatChem* 9 (9), 2016, S. 1523-1544.

¹⁵² Garcia-Lopez, Elisa I.; Palmisano, Leonardo; Marci, Giuseppe: *Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions to Generate H₂ in the Presence of g-C₃N₄-Based Materials*, in: *ChemEngineering* 7(1), 2023, S. 1-9.

¹⁵³ Kennedy, Julia; Bahrujia, Hasliza; Bowkera, Michael; Davies, Philip R.; Bouleghlimat, Emir; Issarapanacheewin, Sudarat: *Hydrogen generation by photocatalytic reforming of potential biofuels: Polyols, cyclic alcohols, and saccharides*, in: *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 356, 2018, S. 451-456.

¹⁵⁴ Skillen, Nathan; Daly, Helen; Lan, Lan; Aljohani, Meshal; Murnaghan, Christopher W. J.; Fan, Xiaolei; Hardacre, Christopher; Sheldrake Gary N.; Robertson, Peter K. J.: *Photocatalytic Reforming of Biomass: What Role Will the Technology Play in Future Energy Systems*, in: *Topics in Current Chemistry* 380, 2022, S. 1-40.

Wasserstoffelektrode (NHE). Manche Photokatalysatoren sind besonders gut für reduktive Prozesse zur Wasserstoffherzeugung geeignet, andere für die oxidativen Prozesse zum Abbau organischer Substrate.

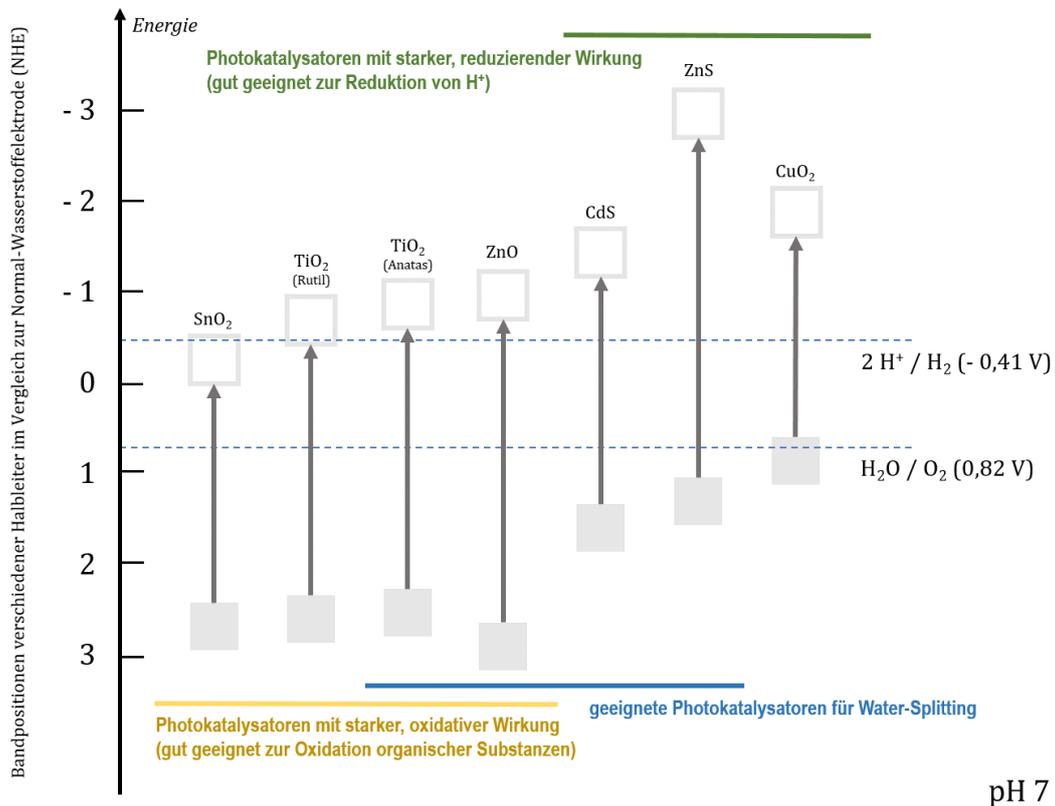


Abb. 9: Bandposition ausgewählter Halbleiter im Energiediagramm.¹⁵⁵

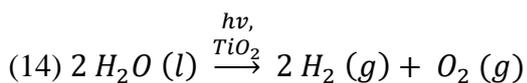
Im Folgenden soll ein tiefergehender Einblick in die Entwicklung der Photoreformierung gegeben werden, indem zunächst auf die Anfänge dieses Forschungszweiges geblickt wird. Anschließend werden die chemischen Prozessabläufe näher beleuchtet. Neben den möglichen Reaktionsverläufen stehen auch die mechanistischen Abläufe während der Photoreformierung in Abhängigkeit der einzelnen Substrate im Fokus dieser Betrachtung. Zudem sollen verschiedenen Katalysatoren, die für die Photoreformierung aktuell genutzt werden, vorgestellt werden. Schlussendlich soll auf die Chancen aber auch Herausforderungen der Wasserstoffgewinnung durch Photoreformierung eingegangen werden, um sie im Kontext aktueller, industriell gängiger Produktionswege von Wasserstoff bewerten zu können.

¹⁵⁵ Abbildung nach: Li, Xin; Yu, Jiaguo; Mietek, Jaroniec: *Hierarchical photocatalysts*, in: Chemical Society Reviews 45 (9), 2016, S. 2607 & Garcia-Lopez, Elisa I.; Palmisano, Leonardo: *Fundamentals of photocatalysis: The role of the photocatalysts in heterogeneous photo-assisted reactions*, in: Elisa I. Garcia Lopez, Leonardo Palmisano (Hrsg.) Materials Science in Photocatalysis, Amsterdam (u.a.): Elsevier 2021, S. 6.

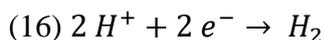
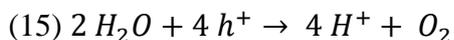
3.2. Photoreformierung - Grundlegende Entwicklungen

3.2.1. Water-Splitting

Die ersten Grundlagen zur Erforschung der Photoreformierung wurden durch die Untersuchung der photokatalytischen Spaltung von Wasser gelegt. 1972 wurde durch Akira Fujishima und Kenichi Honda erstmals in einem Kurzartikel¹⁵⁶ die photokatalytische Spaltung von Wasser mittels eines Titandioxid-Photokatalysators beschrieben. In ihrem Experiment wurde eine photoelektrochemische Zelle mit einer Titandioxid-Anode und einer Platin-Kathode aufgebaut, die jeweils in Wasser eingetaucht wurden. Die Titandioxid-Anode wurde schließlich mit einer 500 W Xe-Lampe bestrahlt. Als Ergebnis bildete sich an der Anode Sauerstoff und an der Kathode Wasserstoff.¹⁵⁷



Hervorgehoben wird, dass ohne das Anlegen einer äußeren Spannung Wasser mithilfe von Licht in Sauerstoff und Wasserstoff umgesetzt werden kann. Das eingestrahelte Licht weist deutlich geringere Energien auf als die sehr kurzwellige UV-Strahlung (140 nm), die theoretisch für die direkte Spaltung ohne Katalysator von Wasser-Molekülen benötigt wird.¹⁵⁸ Fujishima und Honda gaben als Ausblick zur Effizienzsteigerung dieses photokatalytischen Prozesses an, dass der Einsatz von Halbleitermaterialien anstelle der Platin-Elektrode eine Erhöhung der Ausbeuten zur Folge hätte.¹⁵⁹ Die Gesamtreaktionsgleichung des Water-Splittings (14) lässt sich in zwei Teilgleichungen formulieren. Einerseits werden Elektronen von Wasser-Molekülen an die Löcher (h^+) im Valenzband der Photokatalysator-Teilchen übertragen und dabei oxidiert (siehe Abb. 8). Hierbei wird Sauerstoff gebildet. Des Weiteren entstehen Protonen (15).¹⁶⁰ Diese Protonen wiederum werden durch die Aufnahme von Elektronen aus dem Leitungsband der Photokatalysator-Teilchen reduziert (siehe Abb. 8). Es entsteht Wasserstoff (16).¹⁶¹



Water-Splitting ist ein Weg zur Erzeugung von Wasserstoff, der theoretisch und praktisch durchführbar, aber thermodynamisch so stark beschränkt ist, dass nur ein geringer Teil des Wassers überhaupt zu Wasserstoff und Sauerstoff umgesetzt werden kann.¹⁶² Der Grund

¹⁵⁶ Fujishima, Akira, Honda, Kenichi: *Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode*, in: *Nature* 238, 1972, S. 37-38.

¹⁵⁷ Fujishima/Honda, *Electrochemical Photolysis of Water*, S. 38.

¹⁵⁸ Ebd., S. 37.

¹⁵⁹ Ebd., S. 38.

¹⁶⁰ Christoforidis/Fornasiero, *Photocatalytic Hydrogen Production*, S. 1525.

¹⁶¹ Ebd.

¹⁶² Rossetti, Ilenia: *Hydrogen Production by Photoreforming of Renewable Substrates*, in: *International Scholarly Research Notices. Chemical Engineering*, 2012, S. 1.

hierfür ist die freie Reaktionsenthalpie der Reaktion (14) mit $\Delta G^0 = 237 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.¹⁶³ Damit handelt es sich beim Water-Splitting um eine endergonische Reaktion. Obwohl seit den ersten Berichten zum Water-Splitting neben Titandioxid noch weitere Photokatalysatoren erforscht wurden, bleibt die Ausbeute an Wasserstoff immer noch recht gering im Vergleich zu anderen Verfahren wie der Photoreformierung.¹⁶⁴ Eine zufriedenstellende Ausbeute, die perspektivisch eine großtechnische Umsetzung ermöglicht, kann nicht als wahrscheinlich angesehen werden, zumal die Wasserstoffproduktion unter dem Aspekt einer nachhaltigen und effizienten Wegführung entstehen soll. Dies ist bei Water-Splitting nicht gegeben. Nichtsdestoweniger haben Fujishima und Honda durch ihren Beitrag einen Pfad eröffnet, aus dem sich seit 1972 weiterführende Fragestellungen entwickelten, wie die geringen Ausbeuten an Produkten zu steigern sind. Damit lassen sich in der Arbeit von Fujishima und Honda nicht nur grundlegende Abläufe der Photokatalyse wiederfinden, sondern auch der Ausblick auf die Forschung und Weiterentwicklung der Photokatalyse hin zur Photoreformierung.

3.2.2. Erste Erfolge von Kawai und Sakata

1980 veröffentlichten Tomoji Kawai und Tadayoshi Sakata in der Fachzeitschrift Nature den Artikel „*Conversion of carbohydrate into hydrogen fuel by a photocatalytic process*“¹⁶⁵, der als Grundstein für weitere Forschungen der kommenden Jahrzehnte auf dem Gebiet der Photoreformierung angesehen werden kann. Die Zielsetzung bestand darin, Wasserstoff als chemischen Energieträger aus Kohlenhydraten zu gewinnen und so den wie bei Pflanzen während der Photosynthese geleisteten Weg zur Energiekonversion zu adaptieren. In Pflanzen wird Kohlenstoffdioxid gebunden und in einem photochemischen Prozess zusammen mit Wasser zu Sauerstoff und Glucose umgewandelt. Für das Forscherteam sollte wiederum Glucose als Ausgangsstoff für die Herstellung eines anderen, vielfach eingesetzten Energieträgers dienen: Wasserstoff.¹⁶⁶ Zwar nutzen grüne Pflanzen die Sonnenstrahlung nur zu etwa 1 %, um Kohlenstoffdioxid in Glucose (bzw. höherwertige Produkte) umzuwandeln, allerdings ist der Energiegehalt dieser Produkte 10-mal höher als die Effizienz, mit der die Photosynthese abläuft. Die Photoreformierung stellte daher für beide Wissenschaftler eine mögliche Option dar, Wasserstoff für industrielle Zwecke zu produzieren. Vor allem organische Ausgangsstoffe wie Glucose besaßen für die Forschungsgruppe einen besonderen Reiz, da sie als natürliche, regenerative Ressource immer vorhanden sein würden.¹⁶⁷ Entwickelt wurde ein Photoreaktor mit einer Xe-Lampe (500 W). Bereits nach kurzer Bestrahlungszeit konnte das Aufsteigen von Gasblasen in der Lösung beobachtet werden. Als Photokatalysator diente ein Mischkatalysator aus Rutheniumdioxid, Titandioxid und Platin (10:100:5). Über die gesamte Bestrahlungszeit wurden überwiegend Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid (Verhältnis 4:1 in der Anfangsphase, 2:1 in der Endphase) und in geringen

¹⁶³ Ma, Yiwen; Lin, Lihua; Takata, Tsuyoshi; Hisatomi, Takashi; Domen, Kazunari: A perspective on two pathways of photocatalytic water splitting and their practical application systems, in: Physical Chemistry Chemical Physics 25, S. 6587-6588.

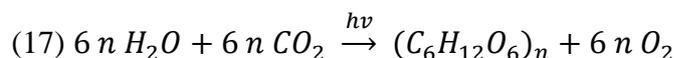
¹⁶⁴ Rossetti, Hydrogen Production by Photoreforming, S.1.

¹⁶⁵ Kawai, Tomoji; Sakata, Tadayoshi: *Conversion of carbohydrate into hydrogen by a photocatalytic process*, in: Nature 286, 5772, 1980, S. 474-476.

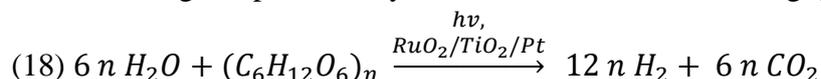
¹⁶⁶ Kawai/Sakata, Conversion of carbohydrate into hydrogen, S. 474.

¹⁶⁷ Ebd.

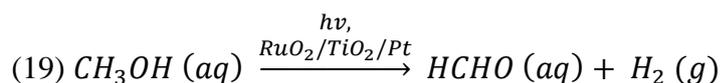
Anteilen auch Methanol und Ethanol (weniger als 0,2 %) erhalten.¹⁶⁸ Eine vollständige Reaktion wie in (18) ohne die Bildung weiterer Nebenprodukte gelang erst nach langer Bestrahlung (18 h) mit einer Quecksilberhochdruckdampfampe (500 W) bei geringen Mengen an Glucose (13 mg) in einer wässrigen Lösung.¹⁶⁹ Kawai und Sakata setzten die Reaktionsgleichung der Photosynthese



der Gleichung des photokatalytischen Abbaus dieser wie folgt gegenüber:



Bei der Aufklärung der genauen Reaktionsverläufe während der Photoreformierung wurden erstmals Mechanismen des Reaktionsverlaufs vorgeschlagen. Der Photokatalysator dient als elektrochemische Mikrozelle. Energiereiches Licht bewirkt in Titandioxid-Teilchen die Bildung von Elektron-Loch-Paaren. Die voneinander separierten Elektronen und Löcher bewirken wiederum Redoxreaktionen an der Oberfläche der Photokatalysator-Partikel.¹⁷⁰ Bei der Aufklärung der Oxidationsprozesse der Substrate identifizierten die Forscher in ihrer Arbeit die in Zuckermolekülen vorliegenden Hydroxy-Gruppen als den entscheidenden Faktor. Untersuchungen mit dem einfachsten Alkanol, Methanol zeigten, dass Methanol bei Bestrahlung und in Anwesenheit des Photokatalysators abgebaut und zunächst Methanal und Wasserstoff gebildet wurden. (19).¹⁷¹



Das Methanal reagierte in wässrigen Lösungen weiter unter der Bildung von Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid. Als Grundlagenforschung kann der Beitrag von Kawai und Sakata auch dahingehend gesehen werden, dass sie ebenfalls einen Co-Katalysators (Platin) einsetzten, der im Vergleich zum Einsatz von bloßem Titandioxid als Faktor zur Erhöhung der Ausbeuten an Wasserstoff beschrieben wurde. Zudem nutzten sie neben Glucose auch Stärke und Cellulose als Substrate, mit denen auch die Entwicklung von Wasserstoff gelang.¹⁷²

¹⁶⁸ Kawai/Sakata, Conversion of carbohydrate into hydrogen, S. 474-475.

¹⁶⁹ Ebd.

¹⁷⁰ Ebd., S. 475-476.

¹⁷¹ Ebd.

¹⁷² Ebd.

3.3. Photoreformierung - aktueller Forschungsstand

Die aktuellen Forschungen zum Thema Photoreformierung setzen besonders die Perspektive in den Vordergrund, Biomasse oder Abfälle und Abwässer der Lebensmittel- und Papierindustrie nutzbar zu machen. Aber auch Verfahren, Biomasse in Alkohole oder Zucker umzuwandeln und diese als Ausgangsstoffe für die Photoreformierung heranzuziehen, werden diskutiert.^{173, 174} Der gleichzeitige Abbau von Abfällen und die Herstellung von Wasserstoff als hochwertigem Energieträger bietet vor allem für die Bewältigung aktueller Problemstellungen wie der Sicherstellung einer nachhaltigen Energieversorgung und der Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen einen zu anderen Optionen ergänzenden Lösungsweg. Die Photoreformierung erfolgt unter milden Reaktionsbedingungen (Raumtemperatur, oder leicht erhöhte Temperaturen bis 60 °C, Umgebungsdruck), sodass sie in auch in Entwicklungsländer eingesetzt werden könnte, in denen sowohl Biomasse als auch ausreichend Sonnenlicht verfügbar sind.¹⁷⁵

Aufbauend auf den ersten Veröffentlichungen zu Water-Splitting und der Photoreformierung ist in den letzten Jahrzehnten die photokatalytische Umsetzung organischer Substrate immer stärker beforscht worden. Schwerpunkte liegen dabei einerseits auf der Untersuchung von Substraten für die Photoreformierung und andererseits auf der Erforschung unterschiedlicher Photokatalysatoren. Beide Forschungsschwerpunkte leisten dabei einen großen Beitrag, sowohl Aufklärung über die möglichen Reaktionsmechanismen zu geben als auch Möglichkeiten aufzuzeigen, wie Reaktionswege zu bestimmten Produkten optimiert und effizienter gestaltet werden können, allen voran die Steigerung der Ausbeute an Wasserstoff. In den folgenden Unterkapiteln soll ein Überblick über den aktuellen Forschungsstand zur Photoreformierung gegeben werden. Dabei werden zum einen die Reaktionsschritte während der Photoreformierung für verschiedene Substratgruppen wie Alkohole, Zucker oder Polysaccharide näher betrachtet. Hier stehen die oxidativen Prozesse während der Photoreformierung im Vordergrund. Bei ausgewählten Stoffen, die für die in *Kapitel 6* vorgestellten entwickelten Schulversuche eine besondere Rolle spielen, werden die Reaktionsschritte detailliert erläutert. Im Fokus liegt hierbei die photokatalytische Umsetzung von Substraten an Titandioxid-Photokatalysatoren,¹⁷⁶ da diese zu den am besten erforschten Materialien für die Photoreformierung gehören.¹⁷⁷ Zum anderen wird in *Kapitel 3.4.* der Einfluss unterschiedlicher Photokatalysatoren dargestellt. Hier stehen die Reduktionsprozesse während der Photoreformierung im Fokus. Es wird auch kurz auf die Entwicklung geeigneter Photokatalysatoren geblickt, um darauf aufbauend die Potentiale wie auch die Herausforderungen der Photoreformierung für eine industrielle Nutzung dieses Reaktionsweges zur Produktion von Wasserstoff zu beleuchten.

¹⁷³ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass.

¹⁷⁴ Rossetti, Hydrogen Production by Photoreforming, S. 1-2.

¹⁷⁵ Ebd.

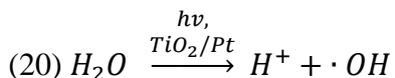
¹⁷⁶ Für die Betrachtung unterschiedlicher Substrate als Ausgangsstoffe für die Photoreformierung wird in den folgenden Kapiteln der Schwerpunkt auf Titandioxid-Photokatalysatoren gelegt, die mit Platin als Co-Katalysator belegt sind. Der Einfluss des Co-Katalysators wird in *Kapitel 3.4.1.* näher erklärt.

¹⁷⁷ Lopez Tenllado, Francisco Javier; Hidalgo-Carrillo, Jesus; Montes, Vicente; Sánchez, Elena; Urbano, Francisco; Marinas, Alberto: *Photocatalytic production of hydrogen from binary mixtures of C-3 alcohols on Pt/TiO₂: Influence of alcohol structure*, in: *Catalysis Today* 328, 2018, S. 2.

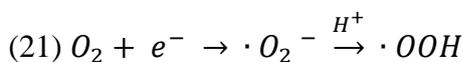
3.3.1. Grundlegende Prozessschritte der Photoreformierung

Bereits Kawai und Sakata beschrieben 1980 aufbauend auf Analysen der wässrigen Lösungen während bzw. nach der Bestrahlung und den dort detektierten Stoffen erste Prozessschritte der Photoreformierung von Glucose, Methanol, Stärke und Cellulose (*siehe Kap. 3.3.3. bis Kap. 3.3.6.*). So ist neben der Bildung von Wasserstoff, der zu Beginn im Fokus der Untersuchungen lag, auch die Bildung verschiedener Abbauprodukte der jeweils eingesetzten Substrate zu beobachten, die das Ergebnis oxidativer Prozesse sind.

Die Photoreformierung organischer Substrate in wässrigen Lösungen eint, dass gleichzeitig die Prozesse des Water-Splittings in einem bestimmten Anteil ablaufen. Dadurch werden zu Beginn einer jeden Reaktion Protonen (H^+) und Hydroxyl-Radikale ($\cdot OH$) gebildet (20).¹⁷⁸ Vor allem diese gebildeten Radikale können die Bildung von verschiedenen Produkt-Teilchen während der Photoreformierung beeinflussen, da es sich um eine reaktive Spezies handelt. Damit ist Water-Splitting bei der Aufschlüsselung der Mechanismen der Photoreformierung von organischen Substanzen immer mitzubedenken.



Ein weiterer Punkt, der ebenfalls Einfluss auf die Entwicklungsrate von Wasserstoff während der Photoreformierung zu nehmen scheint, ist die Anwesenheit oder Abwesenheit von Sauerstoff¹⁷⁹ (*siehe Kap. 3.3.3.*). Befinden sich Sauerstoff-Moleküle am Photokatalysator-Teilchen, können sie zu Hydroperoxid-Anionen ($O_2^{\cdot -}$) reduziert werden, indem jeweils ein Elektron aus dem Leitungsband des Photokatalysator-Teilchens auf ein Sauerstoff-Molekül übertragen wird. Durch die Anwesenheit von Protonen kann eine direkte Weiterreaktion des Radikal-Anions zu einem Hydroperoxyl-Radikal (oder in einem weiteren Schritt zu einem Wasserstoffperoxid-Molekül) angenommen werden (21).¹⁸⁰



Ein weiteres Merkmal der Photoreformierung organischer Substanzen ist die Vielzahl entstehender Nebenprodukte auf dem Weg zur vollständigen photokatalytischen Umsetzung dieser. Diese legen den Schluss nahe, dass die an die Photokatalysator-Teilchen adsorbierten organischen Moleküle nach der Reaktion an diesen auch wieder desorbieren können. Die neu gebildeten organischen Moleküle müssen nicht zwangsweise an den Photokatalysator-Teilchen adsorbiert bleiben und bis zur vollständigen Umsetzung zu Kohlenstoffdioxid- und Wasserstoff-Molekülen weiterreagieren. Die Varianz der Nebenprodukte in der wässrigen

¹⁷⁸ Zheng, Xian-Jun; Wei, Li-Fang; Zhang, Zhi-Hong; Jiang, Qiao-Juan; Wei, Yong-Jie; Xie, Bing, Wei, Ming-Bao: *Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid solution by Pt/TiO₂ nanoparticles under UV irradiation*, in: International Journal of Hydrogen Energy 34 (22), 2011, S. 9039.

¹⁷⁹ Panagiotopoulou, Paraskevi; Karamerou, Eleni E.; Kondarides, Dimitris I.: *Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming reactions in aqueous TiO₂ and Pt/TiO₂ suspensions*, in: Catalysis Today 209, 2013, S. 92.

¹⁸⁰ Panagiotopoulou et al., *Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming*, S. 92.

Phase wird zudem durch die Reaktion mit weiteren während der Photoreformierung gebildeten Produkten begünstigt.¹⁸¹ An der Oberfläche der Photokatalysator-Teilchen entstehende Radikale, allen voran Hydroxyl-Radikale und Hydroperoxid-Anionen können ihrerseits mit Molekülen oder adsorbierten Molekülen reagieren.¹⁸² Dass eine Vielzahl organischer Substanzen an der Photokatalysatoroberfläche adsorbiert, konnten Untersuchungen mittels FTIR-Spektroskopie zeigen.¹⁸³ Hierüber können zumindest Aussagen getroffen werden, dass während unterschiedlicher Zeiträume der Bestrahlung unterschiedlich starke Peak-Signale in den FTIR-Spektren zu beobachten sind, die typisch für bestimmte funktionelle Gruppen wie Hydroxy-, Carbonyl-, oder Carboxy-Gruppen sind und als Indiz dafür angesehen werden können, dass der Reaktionsmechanismus über verschiedene Zwischenstufen verläuft.¹⁸⁴

Die Bildungsraten von Wasserstoff¹⁸⁵ bei organischen Substraten weisen dahingehend Ähnlichkeiten auf, dass abseits eines vernachlässigbaren Anlaufens der Reaktion zu Beginn der Bestrahlung (*siehe Kap. 5.6.3.*) zunächst eine gleichmäßige Reaktionsgeschwindigkeit festzustellen ist.¹⁸⁶ Mit zunehmenden Abbau der organischen Substrate nimmt auch die Erzeugung von Wasserstoff ab, der Anteil an Kohlenstoffdioxid dagegen zu.

Ein weiterer Faktor, der Einfluss auf die Photoreformierung nimmt, ist die Temperatur. Ein Temperaturanstieg bis etwa 80 °C kann die Wasserstoffausbeute deutlich erhöhen. Das liegt daran, dass leicht erhöhte Temperaturen die Mobilität der Ladungsträger fördern und so die Wahrscheinlichkeit der Rekombination von Elektron-Loch-Paaren verringern. Die Auswirkung der Temperatur muss somit bei photokatalytischen Prozessen berücksichtigt werden, da sie Einfluss auf jeden Reaktionsschritt und auch auf die Wasserstoffausbeute nimmt.¹⁸⁷ Bei der Photoreformierung organischer Substrate sind daher nicht nur rein photochemische Prozesse, sondern auch thermische Prozesse beteiligt. Diese Abhängigkeit lässt sich auch gut experimentell nachweisen.^{188, 189}

¹⁸¹ Panagiotopoulou et al., Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming, S. 92.

¹⁸² Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 5.

¹⁸³ Panagiotopoulou et al., Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming, S. 94-95.

¹⁸⁴ Ebd., S. 95.

¹⁸⁵ Mit "Bildungsrate" ist die Menge an Wasserstoff gemeint, die in einem bestimmten Zeitintervall gebildet wird.

¹⁸⁶ Kennedy et al., Hydrogen generation by photocatalytic reforming of potential biofuels, S. 452.

¹⁸⁷ Clarizia, Laura; Russo, Danilo; Di Somma, Ilaria; Andreozzi, Roberto; Marotta, Raffaele: *Hydrogen Generation through Solar Photocatalytic Processes: A Review of the Configuration and the Properties of Effective Metal-Based Semiconductor Nanomaterials*, in: *Energies* 10(10), 2017, S 12-13.

¹⁸⁸ Kühnel, Moritz; Reisner, Erwin: *Solar hydrogen generation from lignocellulose*, in: *Angewandte Chemie. International Edition* 57, 2018, S. 3290-3296.

¹⁸⁹ Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Photoreformierung - grüner Wasserstoff aus Alkohol, Zucker und Stärke*, in: *CHEMKON* 30 (6), S. 257-258.

3.3.2. Einsetzbare Substrate

Ein wichtiger Faktor für die Photoreformierung ist das verwendete Substrat. Substrat-Moleküle sollten möglichst gute Elektronen-Donoren sein. Einsetzbar sind Alkohole, Polyole, Zucker, Polysaccharide oder auch Amine.¹⁹⁰ Allerdings gibt es zwischen den eingesetzten Substraten bei gleichen Konzentrationen z.T. erhebliche Unterschiede bei der Entstehung von Wasserstoff innerhalb eines bestimmten Zeitraums. Daneben existiert noch eine Vielzahl weiterer Stoffe, wie Ethylendiamintetraessigsäure (EDTA), Natriumsulfat oder Natriumsulfid, die als Opferdonor oxidiert werden können.¹⁹¹ Entscheidend für eine gute Eignung von Substraten ist die energetische Lage des Redoxpotenzials dieser im Vergleich zu der energetischen Lage des Valenzbands des betreffenden Halbleiters (*siehe Tab. 3*).

Substrat	Teilgleichung der Oxidationsreaktion	$E_{\text{Red/Ox}}$ [V]	$\Delta G^0_{298\text{K}}$ [kJ · mol ⁻¹]
Methanol	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6 \text{H}^+ + 6\text{e}^-$	- 0,38 ^a	+ 9,3 ^b
Ethanol	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 12 \text{H}^+ + 12 \text{e}^-$	- 0,33 ^b	+ 97,4 ^b
Ethylenglycol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 10 \text{H}^+ + 10 \text{e}^-$	- 0,40 ^b	+ 8,6 ^b
Glycerin	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{CO}_2 + 14 \text{H}^+ + 14 \text{e}^-$	- 0,41 ^b	+ 5,1 ^b
Formaldehyd	$\text{CH}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4 \text{H}^+ + 4 \text{e}^-$	- 0,48 ^a	- 63,0 ^c
Methansäure	$\text{CHOO}^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$	- 0,49 ^a	- 43,0 ^c
Wasser	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow 0,5 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$	+ 0,82	+ 237,0

Tab. 3: Übersicht zu den Oxidationspotentialen und der freien Reaktionsenthalpie ausgewählter Substrate bei pH 7¹⁹² Die angegebenen Werte sind aus den Quellen a,¹⁹³ b¹⁹⁴ und c¹⁹⁵ entnommen.

Hier zeigt sich, dass Methanol und Ethanol deutlich geringere Redoxpotenziale aufweisen als Wasser.¹⁹⁶ Zudem ist die Photoreformierung organischer Substrate im Vergleich zum Water-Splitting eine photokatalytische Reaktion, die durch deutlich geringere freien Reaktionsenthalpien thermodynamisch begünstigter ist.¹⁹⁷ Die Oxidationsreaktionen sind

¹⁹⁰ Yasuda, Masahide; Takayuki, Tomo; Shoichi, Hirata; Tsutomu, Shiragami; Tomoko, Matsumoto: *Neighboring Hetero-Atom Assistance of Sacrificial Amines to Hydrogen Evolution Using Pt-Loaded TiO₂-Photocatalyst*, in: Catalysts 4(2), 2014, S. 163.

¹⁹¹ Rumayor, Marta; Corredor, Juan; Rivero, Maria Jose; Ortiz, Inmaculada: *Prospective life cycle assessment of hydrogen production by waste photoreforming*, in: Journal of Cleaner Production 336, 2022, S. 2.

¹⁹² Berto, Tobias: *Elucidation of reaction pathways of the photoreforming and overall water splitting reaction over precious metal decorated semiconductors. Dissertation*, München 2016, S. 7.

¹⁹³ Indrakanti, Venkata Pradeep; Kubicki, James D.; Schobert, Harold H.: *Photoinduced activation of CO₂ on Ti-based heterogeneous catalysts: Current state, chemical physics-based insights and outlook*, in: Energy and Environmental Science 2 (7), 2009, S. 752.

¹⁹⁴ Al-Azri, Zakiya H.N.; Chen, Wan-Ting; Chan, Andrew; Jovic, Vedran; Ina, Toshiaki; Idriss, Hicham; Waterhouse, Geoffrey I.N.: *The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production: Performance evaluation of M/TiO₂ photocatalysts (M = Pd, Pt, Au) in different alcohol-water mixtures*, in: Journal of Catalysis 329, 2015, S. 365.

¹⁹⁵ Shimura, Katsuya; Yoshida, Hisao: *Heterogeneous photocatalytic hydrogen production from water and biomass derivatives*, in: Energy and Environmental Science 4 (7), 2011, S. 2470.

¹⁹⁶ Berto, Elucidation of reaction pathways of the photoreforming, S. 7.

¹⁹⁷ Chang, Lam; Yong, Siek Ting; Chai, Siang Piao; Putri, Lutfi Kurnianditia; Tan, Lling Lling; Mohamed, Abdul Rahman: *A review of methanol photoreforming: elucidating the mechanisms, photocatalysts and recent advancement strategies*, in: Materials Today Chemistry 27, 2023, S. 1-2.

zumeist nur leicht endergonisch bzw. im Fall von Methansäure oder Formaldehyd sogar leicht exergonisch.

Die gute Eignung von Alkoholen wie Methanol und Ethanol, Zuckern wie Glucose oder anderer Kohlenhydrate bei der Photoreformierung liegt auch in der Fülle an Hydroxy-Gruppen innerhalb der Moleküle¹⁹⁸ sowie in der Anwesenheit gebundener Wasserstoff-Atome in α -Position begründet.¹⁹⁹ Die Hydroxy-Gruppen ermöglichen eine leichte Adsorption an den Photokatalysator-Teilchen wie Titandioxid-Teilchen. Allerdings ist durch die zunehmende Anzahl an Hydroxy-Gruppen und räumlich größeren Molekülstrukturen auch die vollständige Umsetzung dieser schwieriger. Einwertige oder mehrwertige Alkohole lassen sich überwiegend leichter umsetzen als Monosaccharide. Des Weiteren nimmt auch die Wasserstoffproduktion mit steigender Anzahl an Moleküleinheiten ab, sodass sich eine Reihenfolge von Monosacchariden (bspw. Glucose) zu Disacchariden (bspw. Saccharose) zu Polysacchariden (bspw. Stärke) ergibt.²⁰⁰ Dazu ist auch die gute Wasserlöslichkeit der hier aufgeführten Stoffe für die Photoreformierung von großer Bedeutung. Schlecht wasserlösliche Substrate wie Cellulose können zwar auch eingesetzt werden, liefern jedoch überwiegend geringere Ausbeuten an Wasserstoff. Solche Substrate müssen daher meist einer Vorbehandlung unterzogen werden.

3.3.3. Photoreformierung von Alkoholen

Untersuchungen zur Photoreformierung von einwertigen oder mehrwertigen Alkoholen an Pt/TiO₂-Photokatalysatoren wurden verschiedentlich publiziert.^{201, 202, 203} Die dargestellten Reaktionsmechanismen während der Photoreformierung weisen Parallelen bei verschiedenen Alkoholen auf, auch wenn die während der Reaktion gebildeten Produkte mit Ausnahme von Wasserstoff abhängig von den eingesetzten Stoffen sind. Während der Oxidation der Substrate am Photokatalysator konnten verschiedene Nebenprodukte in der wässrigen Phase des Reaktionsgemischs nachgewiesen werden. Im Folgenden wird auf die aktuell vorgeschlagenen Reaktionsverläufe und -mechanismen bei verschiedenen Ausgangsstoffen eingegangen.

Der einfachste Vertreter der Alkanole, das **Methanol** wurde schon von Kawai und Sakata verwendet. Er ist sehr gut geeignet, um bei der Photoreformierung zu Wasserstoff umgesetzt zu werden. Neben Wasserstoff entstehen bei der Photoreformierung von Methanol hauptsächlich Methanal, Methansäure und Kohlenstoffdioxid. Methanol wird somit zu

¹⁹⁸ Rossetti, Hydrogen Production by Photoreforming, S. 11.

¹⁹⁹ Garcia-Lopez et al., Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions, S. 6.

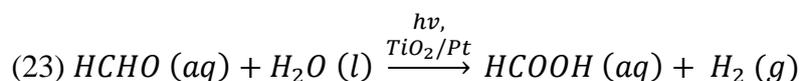
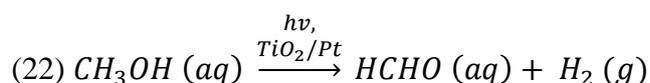
²⁰⁰ Rossetti, Hydrogen Production by Photoreforming, S. 11.

²⁰¹ Sola, Alberto C.; Homs, Narcis A.; Ramírez De La Piscina, Pilar: *Photocatalytic H₂ production from ethanol_(aq) solutions: The effect of intermediate products*, in: International Journal of Hydrogen Energy 41 (43), 2016, S. 19629-19636.

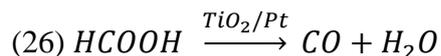
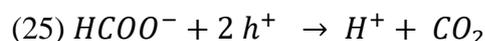
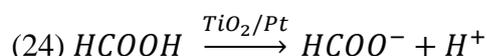
²⁰² Lopez, Cristina R.; Pulido Melian, Elisenda; Ortega Mendez, José Alejandro; Santiago, Dunia E.; Dona Rodriguez, Jose Miguel; Gonzalez Diaz, Oscar: *Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production by heterogeneous photocatalysis using Pt/TiO₂ catalysts*, in: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 312, 2015, S. 45-54.

²⁰³ Sanwald Kai E.; Berto Tobias; Eisenreich, Wolfgang; Gutierrez Oliver Y.; Lercher, Johannes A.: *Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols*, in: Journal of Catalysis 344, 2016, S. 806-816.

Methanal (22) und schließlich Methansäure oxidiert (23).²⁰⁴ Aber auch die Reaktion von Hydroxyl-Radikalen, die während des Water-Splittings gebildet werden, mit Methanal-Molekülen ist ein möglicher Weg, durch den Methansäure-Moleküle entstehen können.²⁰⁵



Die photokatalytische Umsetzung von Methansäure kann auch über den Mechanismus der Photo-Kolbe-Reaktion verlaufen. Ein Methansäure-Molekül adsorbiert an einem Titandioxid-Teilchen. Unter Abgabe eines Protons dissoziiert es zu einem Formiat-Ion (24).²⁰⁶ Hiernach erfolgt die Übertragung zweier Elektronen des Formiat-Ions an Löcher (h⁺) des Titandioxid-Teilchens, wobei ein Proton freigesetzt wird. Des Weiteren wird Kohlenstoffdioxid gebildet (25).²⁰⁷ Ein denkbarer Weg, der die Bildung von Kohlenstoffmonoxid erklären würde, wäre die Reaktion nach (26).²⁰⁸



Die genaue Aufschlüsselung der Reaktionsmechanismen am Photokatalysator-Teilchen erweist sich schon für das recht simple Substrat-Molekül Methanol als herausfordernd. Verschiedene Reaktionsverläufe mit der Bildung unterschiedlicher Radikale wurden veröffentlicht, die als Vorschläge den Reaktionsverlauf erklären können. Nach Sanwald²⁰⁹ sind zwei mögliche Reaktionsverläufe denkbar. Zum einen wird ein *indirekter Loch-Transfer* über die Bildung von Zwischenprodukten vorgeschlagen²¹⁰ (*siehe Abb. 10 (1)*). Auf dem Weg zur Bildung von Methanal wären damit Reaktionen nach (27)²¹¹ und (28)²¹² denkbar. Dabei erfolgt die Bildung von Radikalen durch die Reaktion von Methanol-Molekülen mit bereits gebildeten Löchern des Titandioxid-Teilchens. In einem weiteren Schritt werden diese recht instabilen Radikale erneut oxidiert, wobei dieser Schritt über die Abgabe eines Elektrons an das Leitungsband des Titandioxid-Teilchens erfolgt (*siehe Abb. 10 (2)*).²¹³

²⁰⁴ Christoforidis/Fornasiero, Photocatalytic Hydrogen Production, S. 1527.

²⁰⁵ Ebd.

²⁰⁶ Zheng et al., Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid, S. 9039.

²⁰⁷ Ebd.

²⁰⁸ Lopez et al., Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production, S. 47.

²⁰⁹ Sanwald et al., Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols, S. 814-815.

²¹⁰ Ebd., S. 815.

²¹¹ Lopez et al., Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production, S. 47.

²¹² Ebd.

²¹³ Sanwald et al., Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols, S. 814.

Abbildung 10 (3) zeigt zum anderen einen *direkten Loch-Transfer* an bereits gebundene Moleküle unter Bildung eines Radikals zeigt.²¹⁴ Welcher Reaktionsmechanismus abläuft, ist stark abhängig davon, welche Substrate vorliegen. Für Alkanole wie Methanol oder Ethanol wird die Bevorzugung des Wegs des indirekten Loch-Transfers angenommen.²¹⁵

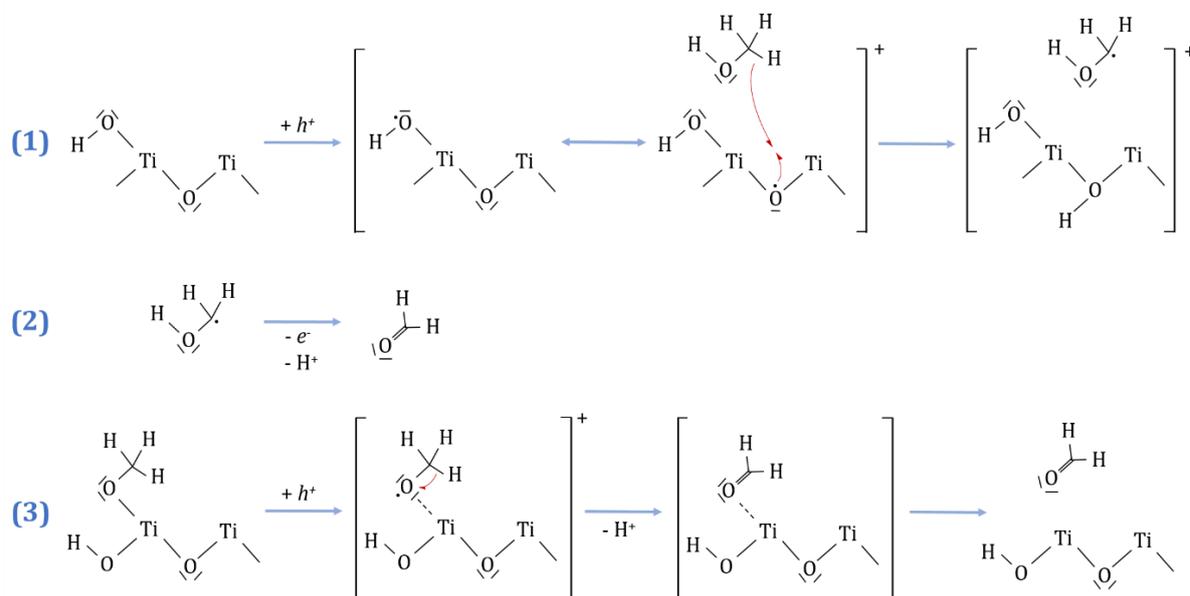
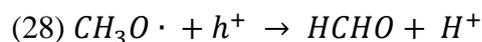
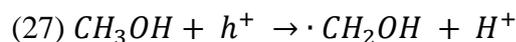


Abb. 10: Mögliche Reaktionsmechanismen der Photoreformierung von Methanol am Photokatalysator Titandioxid. (1) Bildung von Methanal-Molekülen über einen indirekten Loch-Transfer. (2) Transfer eines Elektrons an das Leitungsband eines Titandioxid-Teilchens unter Bildung von Methanal. (3) Ausgangspunkt eines direkten Loch-Transfers ist ein kovalent gebundenes Methanol-Molekül an einem Titandioxid-Teilchen.

Methanol wird in Studien zur Photoreformierung häufig als Modell-Substrat bei der Herstellung von Wasserstoff herangezogen. Neu entwickelte Photokatalysatoren werden häufig damit getestet, da Methanol als Elektronendonator mit der höchsten Aktivität gilt.²¹⁶ Auch bei **Ethanol** sind während der Photoreformierung abseits des Hauptprodukts Wasserstoff verschiedene Nebenprodukte identifizierbar. Im Vergleich zu Methanol als Substrat sind es aber noch mehr. Neben Ethanal, Ethansäure und 2,3-Butandiol in der wässrigen Phase konnten Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ethan und Ethen (z.T. nur in Spuren) in der Gasphase nachgewiesen werden.²¹⁷ In der wässrigen Phase ist Ethanal das bevorzugt gebildete Produkt. Es entsteht durch die Oxidation von Ethanol am Photokatalysator (29). Dabei wird vorgeschlagen, dass zu Beginn der Reaktion (30)²¹⁸ ein Ethanol-Molekül ein Elektron an ein Loch (h^+) auf das Valenzband des Titandioxid-

²¹⁴ Sanwald et al., Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols, S. 815.

²¹⁵ Ebd., S. 814.

²¹⁶ Lopez et al., Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H_2 production, S. 47.

²¹⁷ Sola et al., Photocatalytic H_2 production, S. 19631.

²¹⁸ Ebd.

Teilchens überträgt. Neben dem Hydroxyethyl-Radikal wird ein Proton gebildet. Im Folgeschritt kann ein Hydroxyethyl-Radikal unter Abgabe eines weiteren Elektrons an ein Loch (h^+) gebildet werden. Dabei wird ein weiteres Proton abstrahiert und ein Ethanal-Molekül entsteht (31).²¹⁹ Die Gesamtgleichung zur Bildung von Ethanal ist schematisch in *Abbildung 11* dargestellt.

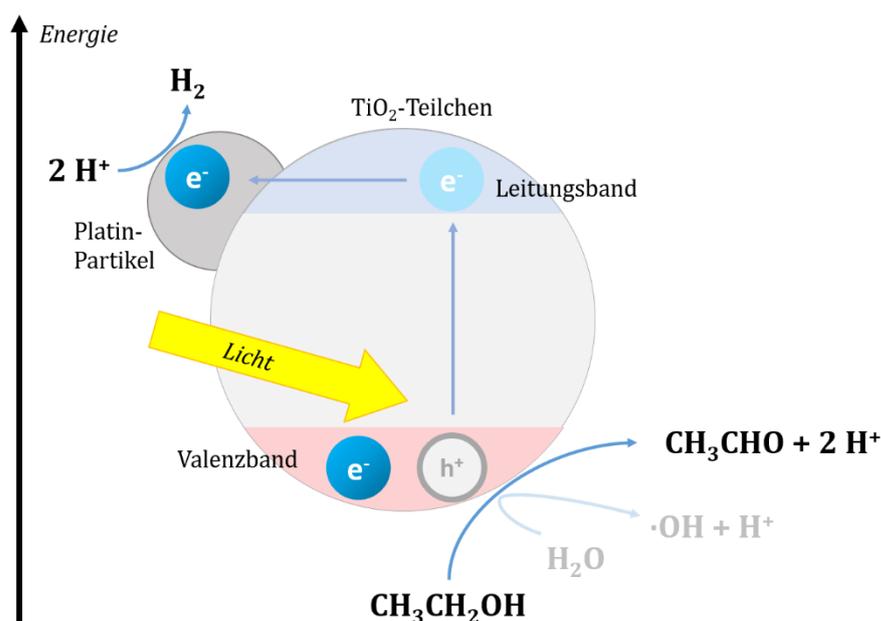
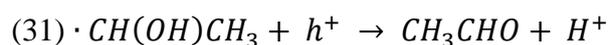
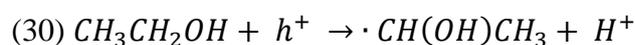
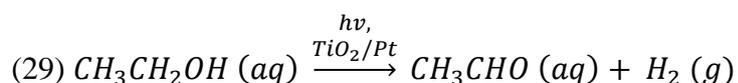
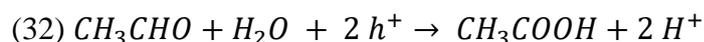


Abb. 11: Schematischer Reaktionsverlauf an Titandioxid-Teilchen beim ersten Oxidationsschritt von Ethanol-Molekülen. In der Darstellung ist die gleichzeitige Reduktion von Protonen zu Wasserstoff-Molekülen ebenfalls aufgeführt. Diese findet am Co-Katalysator Platin statt.

Die Bildung der Hydroxyethyl-Radikale erklärt zudem die Bildung von 2,3-Butandiol-Molekülen, die bei der Kopplung zweier Radikale entstehen.²²⁰ Ethansäure wiederum entsteht durch die Oxidation von Ethanal am Photokatalysator (32).²²¹



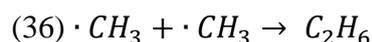
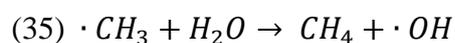
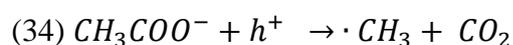
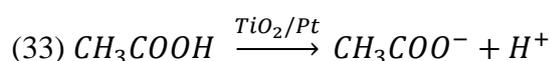
Zur weiteren Aufklärung möglicher Reaktionsschritte über die Bildung von Ethanal, Ethansäure und 2,3-Butandiol hinaus wurden die genannten Stoffe ebenfalls photokatalytisch

²¹⁹ Sola et al., Photocatalytic H₂ production, S. 19631.

²²⁰ Ebd.

²²¹ Ebd.

mit einem Pt/TiO₂-Photokatalysator umgesetzt und die gebildeten Produkte identifiziert. Sie können als Zwischenprodukte auf dem Weg zur vollständigen Umsetzung von Ethanol zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid angesehen werden. Es ließen sich bei der Photoreformierung von Ethanal in der Gasphase die gleichen Produkte (Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ethan, Ethen) feststellen wie bei der Photoreformierung von Ethanol, wobei Wasserstoff immer den größten Anteil ausmacht. Die Hauptprodukte in der wässrigen Phase sind Ethansäure, Ethanol, Aceton und 2,3-Butandiol.²²² Dass auch Ethanol als Produkt nachgewiesen werden konnte, scheint bei der Photoreformierung von Ethanal erstaunlich, wird aber mit zwei Ansätzen erklärt. Zum einen wird angenommen, dass Ethanal mit dem gebildeten Wasserstoff auch wieder zu Ethanol reduziert werden kann.^{223, 224} Zum anderen wird die Disproportionierung von Aldehyden zu Alkoholen und Carbonsäuren vorgeschlagen.²²⁵ Die Produkte, die bei der Photoreformierung von Ethansäure erzeugt werden, lassen sich nicht ohne weiteres einem Reaktionsweg zuordnen. Vielmehr ist auch hier das Zusammenwirken verschiedener Pfade denkbar. Als auffällig zeigen sich die Analysen der Produkte dahingehend, dass die Bildungsrate für Kohlenstoffdioxid über der von Wasserstoff liegen.^{226, 227} Zudem können in geringen Mengen auch Methan und Ethan als Produkte detektiert werden.^{228, 229} Damit bietet ein Reaktionsverlauf angelehnt an die Photo-Kolbe-Reaktion bei der Photoreformierung von Methanol eine gute Möglichkeit, die Bildung der genannten Produkte zu erklären.²³⁰ Zunächst adsorbieren Ethansäure-Moleküle an Titandioxid-Partikeln und dissoziieren unter der Abgabe von Protonen zu Acetat-Ionen (33).²³¹ In der Photo-Kolbe-Reaktion wird anschließend ein Elektron des Acetat-Ions an ein Loch (h⁺) des Titandioxid-Partikels übertragen. Es entsteht ein Kohlenstoffdioxid-Molekül sowie ein Methyl-Radikal (34).²³² Das Methyl-Radikal kann wiederum mit einem Wasser-Molekül zu einem Methan-Molekül und einem Hydroxyl-Radikal weiterreagieren (35) oder zwei Methyl-Radikale verbinden sich zu einem Ethan-Molekül (36).²³³



²²² Sola et al., Photocatalytic H₂ production, S. 19631.

²²³ Ebd.

²²⁴ Panagiotopoulou et al., Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming, S. 93-96.

²²⁵ Sola, et al., Photocatalytic H₂ production, S. 19631.

²²⁶ Ebd.

²²⁷ Zheng et al., Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid, S. 9039.

²²⁸ Sola et al., Photocatalytic H₂ production, S. 19632.

²²⁹ Zheng et al., Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid, S. 9039.

²³⁰ Sola et al., Photocatalytic H₂ production, S. 19632.

²³¹ Zheng et al., Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid, S. 9039.

²³² Ebd.

²³³ Ebd.

Die bei der Photoreformierung von Ethanol entstehenden Gase Kohlenstoffdioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Ethan, Ethen lassen sich überwiegend auf die Folgereaktionen, also die photokatalytische Umsetzung von Ethanal bzw. Ethansäure zurückführen. Bereits im direkten Vergleich von Methanol und Ethanol fällt auf, dass die Varianz der gebildeten Nebenprodukte abseits des Wasserstoffs deutlich erhöht ist. Verschiedene Zwischenprodukte, besonders die gebildeten Radikale erhöhen die Wahrscheinlichkeit der Bildung unterschiedlicher Teilchen. Dies erschwert die genaue Entschlüsselung der Reaktionsmechanismen und gibt einen Ausblick auf die sich immer stärker ausdifferenzierenden Reaktionspfade bei größeren Molekülen oder sogar Polymer-Molekülen. Für die ersten Alkanole der homologen Reihe lässt sich sagen, dass die Oxidation hauptsächlich über die Bildung von Aldehyden und schließlich Carbonsäuren verläuft. Aber auch eine Vielzahl weiterer Abbauprodukte während des photokatalytischen Abbaus konnten identifiziert werden.

Bei der Betrachtung der Bildungsraten von Wasserstoff bei einwertigen Alkoholen sind Unterschiede feststellbar.^{234, 235} Im Allgemeinen zeigen Untersuchungen, dass Methanol-Lösungen im Vergleich zu gleich konzentrierten Lösungen von Ethanol höhere Ausbeuten an Wasserstoff bei der Photoreformierung liefern.²³⁶ Ethanol und Propan-2-ol zeigen ähnliche Bildungsraten an Wasserstoff, jedoch deutlich höhere als bei Propan-1-ol.²³⁷ Einen Einfluss auf die Bildungsraten von Wasserstoff scheinen auch die Konzentrationen der eingesetzten Alkohole zu haben. Bei einer niedrigen Konzentration (1,22 mol/L) ist die Wasserstoffproduktion bei Ethanol höher als bei Methanol.²³⁸ Der Grund hierfür liegt im Vorliegen wässriger Lösungen, wodurch ein indirekter Oxidationsmechanismus stärker bevorzugt wird. Bei höheren Konzentrationen scheint stärker der Mechanismus der direkten Oxidation vorzuherrschen und damit auch die Erzeugung von Wasserstoff zu beeinflussen.²³⁹ Ein weiterer Faktor, der die Produktion von Wasserstoff bei einwertigen Alkanolen zu beeinflussen scheint, ist die Anwesenheit von anderen Alkoholen, Di- oder Polyolen. Sie können selbst in geringen Konzentrationen die Ausbeute an Wasserstoff im Vergleich zum Reinstoff reduzieren. Besonders Polyol-Moleküle mit vicinalen Hydroxy-Gruppen besitzen eine stark hemmende Wirkung auf die Photoreformierung von einwertigen Alkanol-Molekülen. Auch die während der Photoreformierung in der wässrigen Phase gebildeten Produkte scheinen einen ähnlichen Einfluss zu nehmen.²⁴⁰ Bei der Photoreformierung von Ethanol kann somit auch das nachgewiesene 2,3-Butandiol die Bildungsrate von Wasserstoff im Reaktionsverlauf reduzieren.

²³⁴ Lopez Tenllado et al., Photocatalytic production of hydrogen from binary mixtures of C-3 alcohols, S. 4-6.

²³⁵ Bahrujia, Hasliza; Bowkera, Michael; Daviesa, Philip R.; Pedronoa, Fabien: *New insights into the mechanism of photocatalytic reforming on Pd/TiO₂*, in: Applied Catalysis B: Environmental 107, 2011, S. 206-208.

²³⁶ Lopez et al., Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production, S. 47-50.

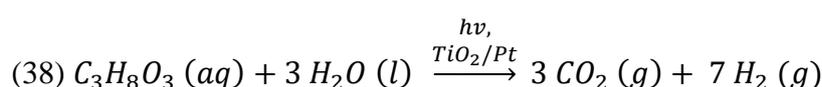
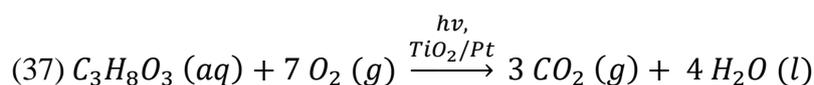
²³⁷ Lopez Tenllado et al., Photocatalytic production of hydrogen from binary mixtures of C-3 alcohols, S. 4.

²³⁸ Lopez et al., Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production, S. 49.

²³⁹ Ebd.

²⁴⁰ Lopez Tenllado et al., Photocatalytic production of hydrogen from binary mixtures of C-3 alcohols, S. 4.

Mehrwertige Alkohole waren ebenfalls Gegenstand experimenteller Untersuchungen. Neben Ethylenglycol (Ethan-1,2-diol)²⁴¹ wurden weitere Polyole beforscht. Untersuchungen zu **Glycerin** als Ausgangsstoff für die Photoreformierung an einem Pt/TiO₂-Photokatalysator zeigten ebenfalls, dass eine Varianz unterschiedlicher Nebenprodukte während der Photoreformierung nachgewiesen werden kann.²⁴² Experimentelle Untersuchungen konnten zwar zeigen, dass im Falle des Glycerins zwischen einer Reaktion als Photooxidation (37)²⁴³ und einer Reaktion als Photoreformierung (38)²⁴⁴ unterschieden werden kann und sich die unterschiedlichen Reaktionsbedingungen auf die Geschwindigkeit der Reaktion und die Bildungsrate von Wasserstoff auswirkt.



Allerdings legen die jeweils ermittelten Zwischenprodukte auf dem Weg zum vollständigen photokatalytischen Abbau von Glycerin nahe, dass der Reaktionsmechanismus unabhängig von der Gegenwart von Sauerstoff, in gleicher Weise abläuft.²⁴⁵ Ein vorgeschlagener möglicher Reaktionsmechanismus für den ersten Oxidationsschritt von Glycerin kann in *Abbildung 12* nachvollzogen werden. Bei den identifizierten Nebenprodukten in der wässrigen Phase handelt es sich um Hydroxyaceton, 1,2-Propandiol, Glycerinaldehyd, Aceton, Propenal, Ethanol, Ethanal, Ethansäure, 2-Hydroxyethanal und Methanol.²⁴⁶ Die Analyse von Bestrahlungszeiträumen über mehrere Stunden zeigt, dass zunächst überwiegend Hydroxyaceton vor Ethanal und Methanol nachweisbar ist. Im Verlauf weiterer Bestrahlung nimmt der Anteil an gebildetem Ethanal und Ethanol sowie Methanol zu, der Anteil an Glycerin stetig ab.²⁴⁷ Damit zeigt sich auch bei der Photoreformierung von Glycerin, dass in einem ersten Schritt überwiegend die Oxidation einer Hydroxy-Gruppe erfolgt. Im weiteren Verlauf der Reaktion werden dann kurzkettige Moleküle gebildet, die im Grundkörper ein oder zwei Kohlenstoffatome tragen, wie Ethanal, Ethanol oder Methanol. Die Bildung dieser Moleküle kann über verschiedene Reaktionswege erfolgen. Die genaue Benennung eines bestimmten Reaktionsweges ist durch die Vielzahl an möglichen Reaktionen (auch mit durch das Water-Splitting gebildeten Radikalen) nicht ohne weiteres möglich. Es können jeweils nur begründete Vorschläge gemacht werden, auf welchem Weg die detektierten Substanzen entstehen könnten. Gewiss ist jedoch, dass - wie bereits dargestellt - auch entstandene Nebenprodukte wie Ethanol, Ethanal oder Methanol

²⁴¹ Berto, Tobias; Sanwald, Kai E.; Eisenreich, Wolfgang; Gutiérrez, Oliver Y.; Lercher, Johannes A.: *Photoreforming of ethylene glycol over Rh/TiO₂ and Rh/GaN:ZnO*, in: Journal of Catalysis 338, 2016, S. 68-81.

²⁴² Lopez et al., Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production, S. 47.

²⁴³ Panagiotopoulou et al., Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming, S. 93-94.

²⁴⁴ Ebd.

²⁴⁵ Ebd.

²⁴⁶ Ebd.

²⁴⁷ Ebd., S. 94.

auf unterschiedlichen Reaktionswegen während der Photoreformierung bis zur vollständigen Umsetzung zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid weiterreagieren können. Damit zeigt sich an dieser Stelle ganz deutlich, dass die Aufschlüsselung der Photoreformierung von höherwertigen organischen Substanzen immer komplexer wird und eine Vielzahl an Nebenreaktionen stattfinden kann.

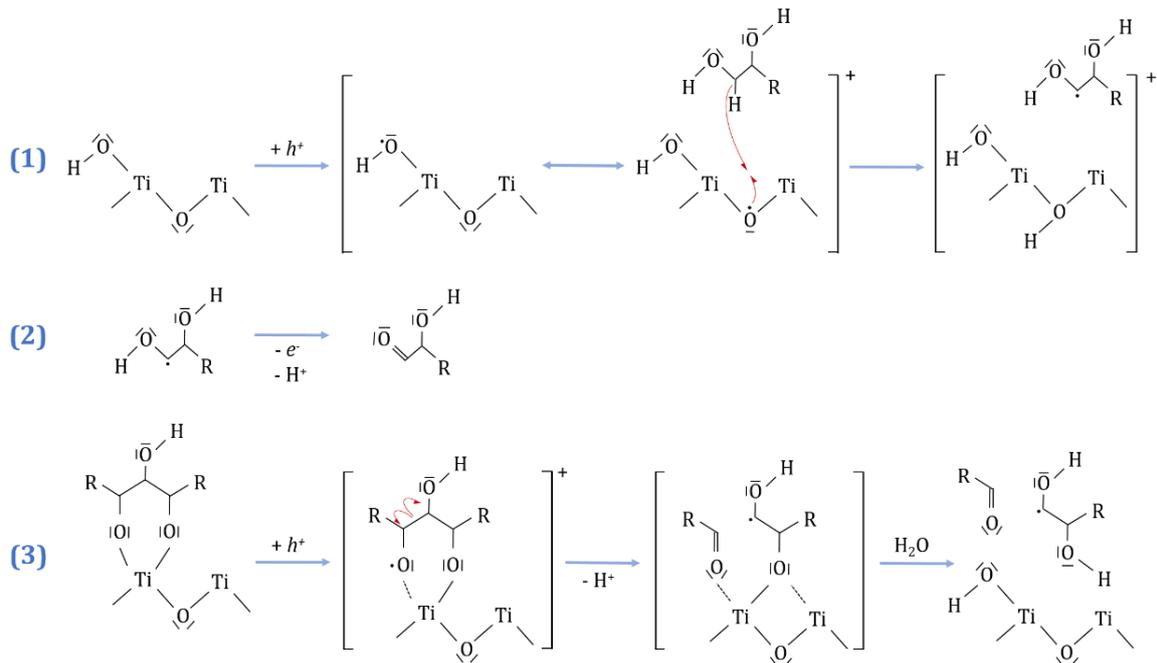


Abb. 12: Vorgeschlagener Reaktionsmechanismus der Photoreformierung von Di- oder Polyolen über die Pfade des indirekten (1) bzw. direkten (3) Loch-Transfers²⁴⁸

Ähnliche Mechanismen und Reaktionsverläufe werden auch für weitere Polyole wie **Erythrit** (Butan-1,2,3,4-tetrol), **Xylit** (Pentan-1,2,3,4,5-pentol) oder **Sorbit** (Hexan-1,2,3,4,5,6-hexol) angenommen. Bei all diesen Stoff verlaufen die Oxidationsprozesse im ersten Schritt auch unter der Bildung von Aldehyden. Allerdings ist bei allen drei Stoffen das Hauptprodukt in der wässrigen Phase 2-Hydroxyethanal.²⁴⁹ Dass überwiegend kurzkettige Aldehyd-Moleküle nachweisbar sind und diese auch über den Reaktionsverlauf relativ konstanten Anzahl vorliegen, legt den Schluss nahe, dass bei länger-kettigen Polyol-Molekülen der Reaktionsmechanismus über einen direkten Loch-Transfer überwiegt. Da bspw. bei Sorbit nicht Glucose als äquivalenter Aldehyd einer Oxidation gebildet wird, zeigt, dass ein anderer Reaktionsverlauf bevorzugt wird. Dieser Weg geht mit dem Bruch einer Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung innerhalb eines Polyol-Moleküls einher, der sich dadurch bedingt, dass zwei Hydroxy-Gruppen eines Moleküls an ein Photokatalysator-Teilchen angebunden sind.²⁵⁰ Dadurch erfolgt die Bildung eines kurzkettigen Aldehyd-Moleküls und eines weiteren Radikals, dass anschließend unter Abgabe eines Elektrons an das

²⁴⁸ Sanwald et al., Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols, S. 812.

²⁴⁹ Ebd.

²⁵⁰ Ebd., S. 814.

Leitungsband des Photokatalysator-Teilchens zu einem weiteren Aldehyd-Molekül weiterreagiert (siehe Abb. 13)²⁵¹

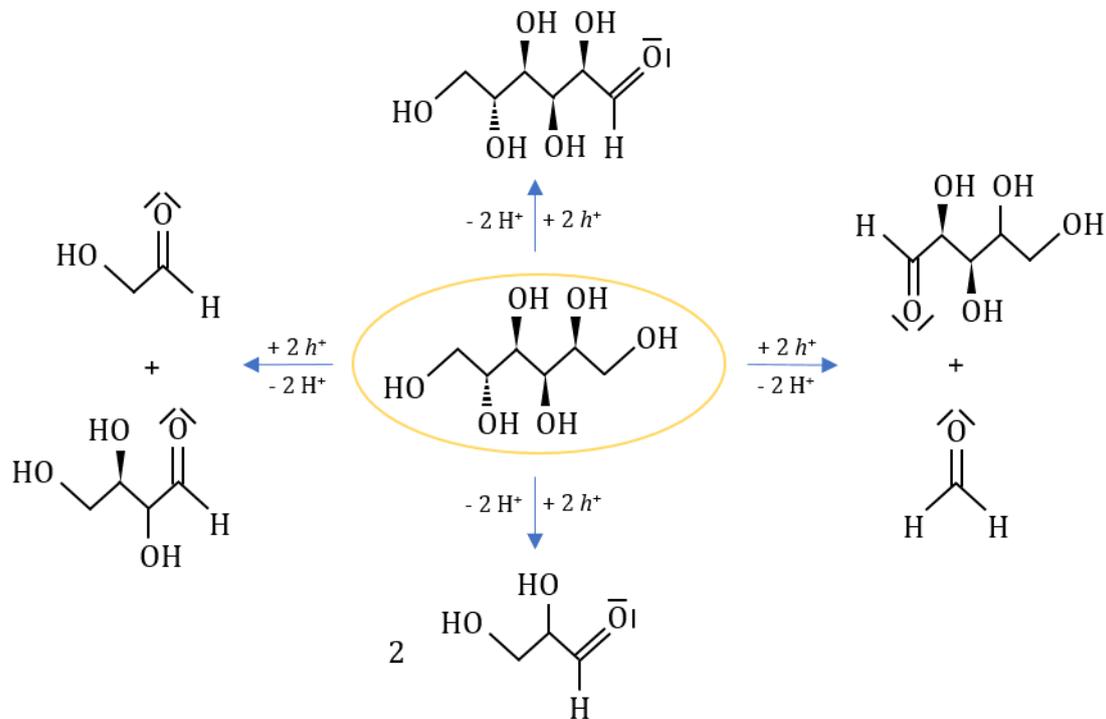


Abb. 13: Vorgeschlagener Reaktionsweg bei längerkettigen Polyol-Molekülen durch direkten Loch-Transfer am Beispiel von Sorbit (Mitte).²⁵²

Der Vergleich der Bildungsraten von Wasserstoff bei den hier vorgestellten Stoffen zeigt, dass das Volumen an Wasserstoff mit der Anzahl der Hydroxy-Gruppen von Ethylenglycol zu Xylit ansteigt. Bei gleichen Konzentrationen bilden die mehrwertigen Alkohole ebenfalls mehr Wasserstoff als Methanol. Die zunehmende Anzahl von Hydroxy-Gruppen bei Polyol-Molekülen führt daher eindeutig zu einer höheren Reaktivität.²⁵³

3.3.4. Photoreformierung von Zuckern

Für die Herstellung von Wasserstoff können als Substrate auch andere Kohlenhydrate wie Saccharide herangezogen werden. Die Vielzahl an Hydroxy-Gruppen, die in den verschiedenen Saccharid-Molekülen vorliegen, bilden eine nötige Voraussetzung für die photokatalytischen Prozesse. **Glucose**, der bereits durch Kawai und Sakata besondere

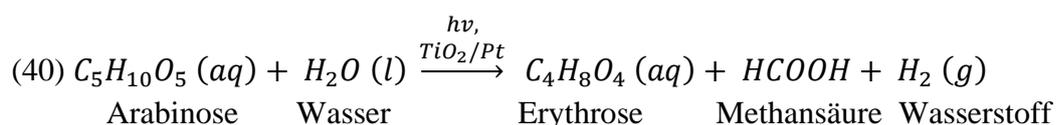
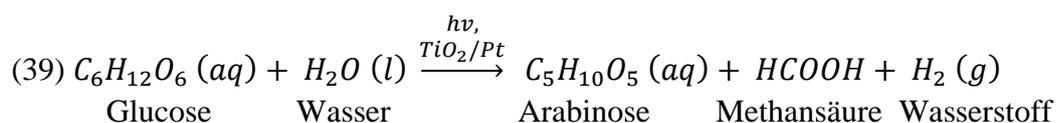
²⁵¹ Sanwald et al., Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols, S. 814-815.

²⁵² Ebd., S. 815.

²⁵³ Kennedy et al., Hydrogen generation by photocatalytic reforming of potential biofuels, S. 453.

Aufmerksamkeit geschenkt wurde, ist schon vielfach Gegenstand der Untersuchungen gewesen.^{254 255}

Untersuchungen zur Photoreformierung von Glucose ergaben, dass die gebildeten Produkte und ihr Anteil sowohl von der Kristallstruktur des Titandioxids, als auch von den Reaktionsbedingungen, ob diese unter Sauerstoffausschluss oder der Anwesenheit von Sauerstoff durchgeführt wurden, abhängig sind.²⁵⁶ Verschiedene mit Platin belegte Titandioxid-Proben (P 25 (Anatas/Rutil), Rutil und Brookit) weisen daher eine unterschiedliche Selektivität für die gebildeten Produkte auf. Allerdings zeigt sich, dass bei den meisten Varianten²⁵⁷ die Produkte Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Arabinose, Erythrose und Methansäure sowie Fructose und Gluconsäure nachweisbar sind.²⁵⁸ Für einen Photokatalysator auf Basis von P 25 zeigt sich bei der Photoreformierung von Glucose unter anaeroben Bedingungen, dass der Anteil von Arabinose, Erythrose und Methansäure in der wässrigen Phase überwiegt. Bei aeroben Bedingungen sind auch Fructose und Gluconsäure anteilig stärker vertreten.²⁵⁹ Damit sind auch bei Glucose in ähnlicher Weise wie bei den bereits beschriebenen Polyolen die Bildung der Reaktionsprodukte abhängig von äußeren Bedingungen. Allerdings liefern sie schlussendlich bei einer vollständigen Reaktion die Produkte Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid.



Unter Ausschluss von Sauerstoff ist im ersten Reaktionsschritt besonders die Bildung mehrerer Oxidationsprodukte (39)²⁶⁰ und nicht die Bildung eines Oxidationsprodukts der Glucose, der Gluconsäure auffällig. Im weiteren Reaktionsverlauf ist die Bildung von Erythrose mit der photokatalytischen Umsetzung von Arabinose zu erklären (40).²⁶¹ Es ist daher anzunehmen, dass auch hier Glucose-Moleküle an Titandioxid-Teilchen durch direkten Loch-Transfer unter der Bildung von Methansäure-Molekülen und Arabinose-Molekülen oxidiert werden. Dabei adsorbieren Glucose-Moleküle mit ihren Hydroxy-Gruppen an der

²⁵⁴ Lan, Lan; Daly, Helen; Sung, Rehana; Tuna, Floriana; Skillen, Nathan; Robertson, Peter K. J.; Hardacre, Christopher; Fan, Xiaolei: *Mechanistic Study of Glucose Photoreforming over TiO₂-Based Catalysts for H₂ Production*, in: ACS Catalysis 13 (13), 2023, S. 8574-8587.

²⁵⁵ Bahadori, Elnaz; Ramis, Gianguido; Zanardo, Danny; Menegazzo, Federica; Signoretto, Michela; Gazzoli, Delia; Pietrogiacomi, Daniela; Di Michele, Alessandro; Rossetti, Ilenia: *Photoreforming of Glucose over CuO/TiO₂*, in: Catalysts 10 (5), 2020, S. 1-20.

²⁵⁶ Bellardita, Marianna; Garcia-Lopez, Elisa Isabel; Marci, Giuseppe; Palmisano, Leonardo: *Photocatalytic formation of H₂ and value-added chemicals in aqueous glucose (Pt)-TiO₂ suspension*, in: International Journal of Hydrogen Energy 41 (14), 2016, S. 5939-5942.

²⁵⁷ Für diese Arbeit sind von besonderer Bedeutung die Photokatalysatoren auf Basis von P 25.

²⁵⁸ Bellardita et al., *Photocatalytic formation of H₂*, S. 5939.

²⁵⁹ Ebd., S. 5942-5944.

²⁶⁰ Ebd., S. 5944

²⁶¹ Ebd.

Oberfläche von Titandioxid-Teilchen. Die Bindung von Glucose an Titandioxid findet in ähnlicher Weise statt wie bei Polyolen. Sie wurde analytisch bestätigt.²⁶² Während der Oxidationsprozesse werden aus den Glucose-Molekülen Protonen abgespalten. Die dabei entstehenden Alkoxid-Anionen werden dann oxidiert, wobei Elektronen an die Titandioxid-Teilchen übertragen werden. Dabei entstehen ebenfalls Molekül-Radikale, die in verschiedenen Reaktionen weiterreagieren können. Hierdurch werden im weiteren Reaktionsverlauf überwiegend Aldehyde und Methansäure gebildet und schließlich auch Kohlenstoffdioxid.²⁶³ (40) zeigt, dass auch kürzerkettige Monosaccharid-Moleküle in ähnlicher Weise photokatalytisch umgesetzt werden können wie Glucose-Moleküle. Bei der Photoreformierung von Arabinose können Methansäure, Erythrose und Glycerinaldehyd als Hauptprodukte in der wässrigen Phase identifiziert werden, wobei Glycerinaldehyd als Produkt der Photoreformierung von Erythrose angenommen wird.²⁶⁴ Untersuchungen zur Aufschlüsselung der Herkunft der Protonen, die zu Wasserstoff-Molekülen reduziert werden, konnten am Beispiel der Photoreformierung von Glucose erste Erkenntnisse liefern, wobei die eingesetzten Substratlösungen sehr gering konzentriert waren ($0,006 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$).²⁶⁵ Bei der Photoreformierung von Glucose in Deuteriumoxid (D_2O) konnte nur Deuterium (D_2) als Produkt identifiziert werden. Wasserstoff wurde nicht gebildet. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die bei der Photoreformierung erzeugten Wasserstoff-Moleküle hauptsächlich durch die Reaktion von Wasser-Molekülen mit Löchern der Titandioxid-Teilchen entstehen.²⁶⁶ Bei sehr geringen Konzentrationen von Glucose entsteht Wasserstoff überwiegend durch die Reduktion von Wasser, welches jedoch mit Abstand auch den größten Anteil ausmacht.

Andere Zucker wie Disaccharide zu deren bekanntesten Vertreter die **Saccharose** gehört, sind ebenso für die Photoreformierung nutzbar.²⁶⁷ Auch für diese Substrat-Moleküle lassen sich Reaktionsmechanismen und Reaktionsverläufe annehmen, wie sie bei den bereits vorgestellten Substrat-Molekülen erfolgen. Demzufolge ist als erster Schritt die Oxidation der Hydroxy-Gruppe oder der Aldehyd-Gruppe zu erwarten. Dabei werden die für die Bildung von Wasserstoff-Molekülen benötigten Protonen freigesetzt. Beim Abbau von Saccharose bzw. auch beim Abbau der Oxidationsprodukte der Saccharose erfolgt dann die Bildung von Methansäure, die schließlich zu Kohlenstoffdioxid oxidiert wird.²⁶⁸ Der vollständige photokatalytische Abbau von Saccharose kann nach (41) verlaufen.²⁶⁹ Damit sind bei den grundlegenden Reaktionsschritten kaum Unterschiede zu erwarten, jedoch

²⁶² Balducci, Gabriele: The adsorption of glucose at the surface of anatase: A computational study, in: *Chemical Physics Letters* 494 (1-3), 2010, S. 58-59.

²⁶³ Rossetti, Hydrogen Production by Photoreforming, S. 11.

²⁶⁴ Lan et al., Mechanistic Study of Glucose Photoreforming, S. 8578.

²⁶⁵ Ebd.

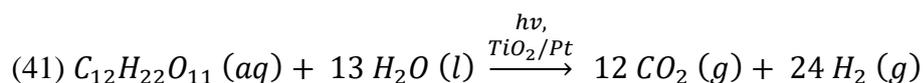
²⁶⁶ Ebd., S. 8281-8582.

²⁶⁷ Fu, Xianliang; Long, Jinlin; Wang, Xuxu; Leung, Dennis Y.C.; Ding, Zhengxin; Wu, Ling; Zhang, Zizhong; Li, Zhaohui; Fu, Xianzhi: *Photocatalytic reforming of biomass: A systematic study of hydrogen evolution from glucose solution*, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 33 (22), 2008, S. 6485-6486.

²⁶⁸ Ilie, Mirela; Cojocaru, Bogdan; Parvulescu, Vasile I.; Garcia, Hermenegildo: *Improving TiO_2 activity in photo-production of hydrogen from sugar industry wastewaters*, in: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (24), S. 15514-15516.

²⁶⁹ Ilie et al., Improving TiO_2 activity in photo-production of hydrogen, S. 15516.

können die gebildeten Nebenprodukte in der wässrigen Phase sich von denen anderer Zucker unterscheiden.



Vergleiche der Bildungsraten von Wasserstoff bei der Photoreformierung von Zuckern zeigen, dass diese bei den Monosacchariden Glucose und Fructose nahezu gleich sind,²⁷⁰ allerdings höher liegen als bei Saccharose.^{271, 272} Allerdings liegen die Bildungsraten unter denen von Polyolen wie Erythrit, Xylit und Sorbit.²⁷³ Disaccharide (so auch Maltose und Laktose) liefern im Allgemeinen schlechtere Ergebnisse als Monosaccharide.^{274, 275}

3.3.5. Photoreformierung von Polysacchariden – Beispiel Stärke und Cellulose

Auch die Stoffklasse der Polysaccharide kann für die Photoreformierung genutzt werden. Stärke und Cellulose sind auf dem Weg zum Gebrauch von Biomasse für die Photoreformierung vielfach untersucht worden, da sie anteilig in Substratgemischen vorliegen, die durch Industrie und Landwirtschaft als Abfälle in der Form von Zucker- oder Holzresten bereitgestellt werden können.

Bei der Photoreformierung von **Stärke**²⁷⁶ wird zumeist eine Vorbehandlung vorgeschaltet. Unter sauren oder alkalischen Bedingungen erfolgt die Hydrolyse der Stärke.^{277, 278} Dies dient der Erhöhung der Wasserstoffentwicklung durch die Bildung leichter während der Photoreformierung umzusetzenden Stoffe wie Glucose oder von Di- bzw. Oligosaccharide. Bei den Produkten der Photoreformierung von Stärke wurden neben Wasserstoff und Glucose auch Methansäure, Ethansäure, Gluconsäure, Glycolsäure und Lactate gefunden.²⁷⁹ Die Temperaturerhöhung alkalischer Stärke-Lösungen führt aufgrund der schnelleren Hydrolyse von Stärke ebenfalls zu einer Erhöhung der Wasserstoffausbeute.²⁸⁰ Abgesehen von der Vorbehandlung von Stärke-Lösungen müssen die Reaktionsschritte und -mechanismen der Photoreformierung von Stärke als äquivalent zu denen von Glucose angesehen werden. Auch die Bildung von Produkten wie Methansäure in der wässrigen Phase

²⁷⁰ Kennedy et al., Hydrogen generation by photocatalytic reforming of potential biofuels, S. 453.

²⁷¹ Ebd.

²⁷² Fu et al., Photocatalytic reforming of biomass, S. 6490-6491.

²⁷³ Kennedy et al., Hydrogen generation by photocatalytic reforming of potential biofuels, S. 453.

²⁷⁴ Garcia-Lopez et al., Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions, S. 7.

²⁷⁵ Kühnel, Solar Hydrogen Generation from Lignocellulose, S. 3293.

²⁷⁶ Als Stärke wird in dieser Arbeit die wasserlösliche Form, die Amylose bezeichnet. Falls sich auf den wasserunlöslichen Anteil der Stärke, das Amylopektin bezogen wird, ist dies gesondert gekennzeichnet.

²⁷⁷ Uekert, Taylor; Dorchies, Florian; Pichler, Christian; Reisner, Erwin: *Photoreforming of food waste into value-added products over visible-light-absorbing catalyst*, in: Green Chemistry 22 (10), 2020, S. 3262-3271.

²⁷⁸ Kurenkova, Anna Y.; Medvedeva, Tatiana B.; Gromov, Nikolay V.; Bukhtiyarov, Andrey V.; Gerasimov, Evgeny Y.; Cherepanova, Svetlana V.; Kozlova, Ekaterina A.: *Sustainable Hydrogen Production from Starch Aqueous Suspensions over a Cd_{0.7}Zn_{0.3}S-Based Photocatalyst*, in: Catalysts 11 (7), 2021, S. 6-11.

²⁷⁹ Basis war ein Cd_{1-x}Zn_xS-Photokatalysator. (Kurenkova, Sustainable Hydrogen Production from Starch)

²⁸⁰ Kurenkova, Sustainable Hydrogen Production from Starch, S. 7-9.

legen den Schluss nahe, dass u.a. Glucose photokatalytisch umgesetzt wird, da Methansäure ein typisches Abbauprodukt dieser ist. Damit unterscheiden sich auch bei Polymeren die photokatalytischen Prozesse nicht von den anderen hier bereits vorgestellten Substraten.

Die Aufschlüsselung des exakten Reaktionsverlaufs bei der Photoreformierung von **Cellulose** ist immer noch Gegenstand aktueller Forschung.²⁸¹ Auch hier legten die Forschungen von Kawai und Sakata den Grundstein zur weiteren Auseinandersetzung mit der Photoreformierung von Cellulose.^{282, 283} Thermodynamisch betrachtet unterscheiden sich die Photoreformierung von Polysacchariden wie Stärke oder Cellulose nicht. Allerdings sind aufgrund der kompakten Struktur der Cellulose-Makromoleküle und der Wechselwirkungen zwischen den Molekül-Ketten andere Bedingungen an eine erfolgreiche Photoreformierung gestellt als bei Saccharose- oder Amylose-Molekülen.²⁸⁴ Eine besondere Herausforderung ist die schlechte Wasserlöslichkeit von Cellulose. Die Hydrolyse von Cellulose findet nahezu nicht statt und auch die Wasserlöslichkeit dieser Strukturen ist stark eingeschränkt.²⁸⁵ Leichte Steigerungen der Ausbeuten an Wasserstoff bei der Photoreformierung konnten in alkalischem Milieu erzielt werden.²⁸⁶ Die meisten Forschungsansätze verfolgen daher die Vorbehandlung der wasserunlöslichen Cellulose. Durch saure oder alkalische Hydrolyse werden die Cellulose-Moleküle gespalten, wodurch kleinere Oligomer-Moleküle mit nur wenigen Monomer-Einheiten gebildet werden können.²⁸⁷

Daneben verfolgt ein Ansatz die Spaltung von Cellulose mittels hoch konzentrierter Metallsalz-Lösungen. Diese Lösungen konnten erfolgreich für die Photoreformierung von Cellulose genutzt werden. Sie haben den Vorteil, dass vergleichsweise milde Bedingungen vorliegen, bei denen die Bildung löslicher Zucker erfolgt, die dann während der Photoreformierung zu Arabinose, Erythrose und Methansäure sowie Wasserstoff umgesetzt werden.²⁸⁸ Damit erfolgt die eigentliche Photoreformierung, indem Zucker-Moleküle an Photokatalysator-Teilchen adsorbieren und Elektronen an die gebildeten Lücken im Valenzband des Photokatalysator-Teilchens übertragen. Zwar beeinträchtigen die hohen Metallsalz-Konzentrationen die Aktivität des Photokatalysators etwas, allerdings wird dies durch die Verbesserung der Löslichkeit und Abbau von Cellulose wieder aufgefangen.²⁸⁹

Der Einsatz eines neuartigen Photoredox-Stufen-Katalysators auf Basis von Titandioxid²⁹⁰ ermöglichte erstmals die direkte Photoreformierung wasserunlöslicher Cellulose zu

²⁸¹ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 7.

²⁸² Kawai/Sakata, Conversion of carbohydrate into hydrogen, S. 474-476.

²⁸³ Kühnel, Solar Hydrogen Generation from Lignocellulose, S. 3293.

²⁸⁴ Ebd.

²⁸⁵ Tewari, Yadu B.; Lang, Brian E.; Decker, Stephen R.; Goldberg, Robert N.: *Thermodynamics of the hydrolysis reactions of 1,4-β-d-xylobiose, 1,4-β-d-xylotriose, d-cellobiose, and d-maltose*, in: The Journal of Chemical Thermodynamics 40 (10), 2008, S. 1517-1526. S. xxx

²⁸⁶ Kühnel, Solar Hydrogen Generation from Lignocellulose, S. 3293.

²⁸⁷ Zhao, Heng; Liu, Jing; Zhong, Na; Larter, Steve; Li, Yu; Kibria, Golam; Su, Bao-Lian; Chen, Zhangxin; Hu, Jinguang: *Biomass Photoreforming for Hydrogen and Value-Added Chemicals Co-Production on Hierarchically Porous Photocatalysts*, in: Advanced Energy Materials 13 (21), 2023, S. 1-23.

²⁸⁸ Pichler, Christian; Uekert, Taylor; Reisner, Erwin: *Photoreforming of biomass in metal salt hydrate solutions*, in: Chemical Communications 56 (43), 2020, S. 5745.

²⁸⁹ Pichler, Photoreforming of biomass, S. 5745.

²⁹⁰ Bei dem Photoredox-Stufen-Katalysator handelt es sich um einen Mischkatalysator, der die homogene Katalyse mit TEMPO (2,2,6,6-tetramethylpiperidin-1-oxyl) mit einer heterogenen Katalyse mit einem sensibilisierten Photokatalysator (Zr-RuCP⁶-Zr-RuP⁶@Pt-TiO₂) verbindet. (Kobayashi, Photoredox Cascade Catalyst, 2023).

Wasserstoff. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ausbeuten an Wasserstoff zwar im Vergleich halb so groß wie von gleichkonzentrierten²⁹¹ Glucose-Lösungen waren, jedoch über denen einer gleichkonzentrierten 2-Propanol-Lösung lagen.²⁹² Insgesamt lässt sich feststellen, dass es bei Kohlenhydraten mit geringem Molekulargewicht einfacher ist, Wasserstoff zu entwickeln als bei Kohlenhydraten mit größerem Molekulargewicht wie Polymeren.²⁹³

3.3.6. Biomasse und Kunststoffe als Substrate

Waren die bisher betrachteten Substrate und die vorgestellten experimentellen Untersuchungen aus der Forschung überwiegend auf einzelne Substanzen beschränkt, soll in diesem Kapitel auf die Möglichkeiten geblickt werden, wie Biomasse in der Photoreformierung genutzt werden kann. Anders als Reinstoffe sind Stoffgemische, wie sie in Abfälle aus Kläranlagen, der Lebensmittelindustrie oder der Landwirtschaft vorkommen, mit größeren Herausforderungen bei der photokatalytischen Umsetzung zu Wasserstoff verbunden. Bei dieser unbehandelten Biomasse ist die Wasserlöslichkeit ein entscheidender Faktor zum Gelingen, um perspektivisch den Anforderungen an eine industrielle Umsetzung gerecht werden zu können (*siehe Kap. 3.5.*).

Als Rohmaterialien wurden für die Photoreformierung bereits Holz, Reishülsen, Sägemehl oder Algen verwendet,²⁹⁴ weitere aus Biomasse gewonnene Bestandteile sind in Erprobung. Teilweise erfordern sie jedoch eine Vorbehandlung. Der Einsatz unbehandelter Biomasse mit Bestandteilen aus Cellulose, Hemicellulose und Lignocellulose stellt besondere Anforderungen an die Photoreformierung. Vor allem die mäßige Wasserlöslichkeit, aber auch die starke Eigenfärbung vieler Substrate behindert eine effektive Photoreformierung. Im ersten Schritt bedarf es einer mechanischen Vorbehandlung, die kleine Stücke liefert. Danach muss im Folgeschritt eine chemische Behandlung der organischen Stoffe erfolgen. Es werden unter anderem Hydrolysen bei sauren oder alkalischen pH-Werten oder enzymatische Verfahren genutzt.^{295, 296} Die Spaltung großer Polymer-Moleküle liefert schlussendlich kleinere Moleküle, die leichter an Photokatalysator-Teilchen binden können. Dadurch wird die Entwicklungsrate an Wasserstoff erhöht.²⁹⁷ Die Bildung kleiner Moleküle wie Glucose-, Fructose- oder verschiedener Saccharid-Moleküle ermöglicht eine leichtere Adsorption an den Photokatalysator-Teilchen. Die Reaktionsverläufe und -mechanismen können an dieser Stelle äquivalent zu denen bei Glucose und anderen Zuckern angesehen werden, inklusive ähnlicher Abbauprodukte, die in der wässrigen Phase anfallen können. Ein Beispiel einer in der Papierindustrie als Abfall anfallenden Substanzklasse ist Lignocellulose (oder Lignine). Sie macht an der pflanzlichen Biomasse neben Cellulose und

²⁹¹ Die Konzentration der Cellulose wurde auf das Monomer Glucose bezogen. (Kobayashi, Photoredox Cascade Catalyst, 2023)

²⁹² Kobayashi, Atsushi: *Photoredox Cascade Catalyst for Efficient Hydrogen Production with Biomass Photoreforming*, in: *Angewandte Chemie* 62 (46), 2023, S. 3.

²⁹³ Fu et al., Photocatalytic reforming of biomass, S. 6490-6491.

²⁹⁴ Garcia-Lopez et al., Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions, S. 6.

²⁹⁵ Ebd., S. 7.

²⁹⁶ Xu, Xinyuan; Shi, Lei; Zhang, Shu; Ao, Zhimin; Zhang, Jinqiang; Wang, Shaobin; Sun, Hongqi: *Photocatalytic reforming of lignocellulose: A review*, in: *Chemical Engineering Journal* 469, 2023, S. 1-18.

²⁹⁷ Garcia-Lopez et al., Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions, S. 7.

Hemicellulose den drittgrößten Anteil (ca. 15-20 %) aus.²⁹⁸ Bei Lignocellulose oder Ligninen handelt es sich um schwer wasserlösliche Biopolymere, die überwiegend in den Zellwänden von Pflanzen zu finden sind. Basis der Lignocellulose-Moleküle sind Phenylpropanoid-Moleküle (Cumarylalkohol-, Coniferylalkohol-, Sinapylalkohol-Moleküle), die auf vielfältige Weise miteinander verknüpft sind.²⁹⁹ Metallsalz-Hydrat-Lösungen konnten erfolgreich für die Photoreformierung von lignocellulosehaltiger Biomasse aus Holz verwendet werden.³⁰⁰

Neben natürlicher Biomasse sind in den letzten Jahren verschiedene Publikationen zur Photoreformierung künstlicher Polymere (Kunststoffe) veröffentlicht worden.^{301, 302} Bei den meisten Kunststoffen ist eine direkte Photoreformierung nicht möglich. Vielmehr bedarf es einer Vorbehandlung, bei der die Kunststoffe in einem Lösungsmittel gelöst werden. Dabei wird der pH-Wert meist in einen alkalischen Bereich eingestellt. Aus der ökologischen Perspektive ist diese alkalische Behandlung relativ unbedenklich, wodurch diese Anwendung der Photoreformierung attraktiv erscheint. Allerdings erhöht die Vorbehandlung auch mögliche Kosten. Dazu kommt, dass vielfach einzelne Sorte an Kunststoffen isoliert untersucht wurden, in der Wirklichkeit jedoch Kunststoffe aus zahlreichen unterschiedlichen Komponenten bestehen oder zum Teil Verunreinigungen enthalten. Das kann die Effizienz und Geschwindigkeit des photokatalytischen Abbaus behindern.³⁰³

3.4. Einfluss des Photokatalysators auf die Photoreformierung

Die Zuhilfenahme eines Co-Katalysators bei Photokatalysatoren oder auch der Einsatz von Mischkatalysatoren bei photokatalytischen Prozessen kann die Ausbeute an Produkten deutlich erhöhen. Diese Beobachtung führte dazu, dass in den letzten Jahren verstärkt im Bereich der Entwicklung neuer und Verbesserung bekannter Photokatalysatoren geforscht wurde, um immer effizientere Materialien zu finden. Dass der Einsatz von Co-Katalysatoren sich positiv auf die Wasserstoffausbeute bei der Photoreformierung auswirkt, zeigten bereits Kawai und Sakata. Im folgenden Kapitel wird der Fokus auf den Einsatz der Photokatalysatoren bei der Photoreformierung gesetzt, um einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu geben. Im Fokus stehen dabei solche Photokatalysatoren, die auf Basis von Titandioxid sind und der Einsatz von Co-Katalysatoren zur Optimierung von Photokatalysatoren, da eine Variante für das entwickelte Experiment herangezogen wurde.

²⁹⁸ Garcia-Lopez et al., Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions, S. 7.

²⁹⁹ Ebd.

³⁰⁰ Pichler, Photoreforming of biomass, S. 5744-5745.

³⁰¹ Uekert, Taylor; Kasap, Hatice; Reisner, Erwin: *Photoreforming of Nonrecyclable Plastic Waste over a Carbon Nitride/Nickel Phosphide Catalyst*, in: Journal of the American Chemical Society 141 (38), 2019, S. 15201-15210.

³⁰² Li, Wenxi; Zhao, Wenxuan; Zhu, Haoyu; Li, Zhi-Jun; Wang, Wanglei: *State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics: from fundamental principles to catalysts and applications*, in: Journal of Materials Chemistry A 11 (6), 2023, S. 2503-2527.

³⁰³ Li et al., State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics, S. 2504-2507.

3.4.1. Varianten nutzbarer Photokatalysatoren auf Basis von Titandioxid

Die photokatalytischen Eigenschaften von Titandioxid als einem der bekanntesten und am meisten verwendeten Photokatalysatoren sind bereits in *Kapitel 3.1.* dargestellt worden. Auch für die Photoreformierung von organischen Substraten kann Titandioxid³⁰⁴ herangezogen werden. Allerdings zeigten bereits frühe Untersuchungen, dass die Ausbeuten an Wasserstoffgas im Vergleich zu modifizierten Titandioxid-Photokatalysatoren, die mit Edelmetallen belegt oder bei denen es sich um Photokatalysator-Gemische handelt, deutlich geringer waren.³⁰⁵ Daraus ergeben sich die Fragen, welchen Einfluss Co-Katalysatoren auf Photokatalysatoren im Allgemeinen nehmen und welche Bedeutung sie für den Einsatz von Titandioxid als solchen im Speziellen haben.

Dass mit Edelmetallen wie Gold,³⁰⁶ Palladium³⁰⁷ oder Platin³⁰⁸ belegte Titandioxid-Photokatalysatoren, aber auch Mischkatalysatoren mit Kupferoxid³⁰⁹ oder Rutheniumoxid³¹⁰ sowie sensibilisierte Titandioxid-Photokatalysatoren^{311, 312} einen deutlichen Effekt auf die Entwicklung von Wasserstoff bei der Photoreformierung besitzen, wurde von verschiedenen Forschungsgruppen publiziert.³¹³ Die Wasserstoffausbeute ist dabei von zwei zentralen Faktoren abhängig, zum einen von der Art des Metalls, das als Co-Katalysator eingesetzt wird und zum anderen von der Beladung des Photokatalysators mit dem Co-Katalysator.³¹⁴ Wichtig für photokatalytische Prozesse ist die Trennung von Ladungsträgern, die in Form der Excitonen während der Bestrahlung gebildet werden. Erst dadurch können die Redoxprozesse ablaufen. Verschiedene Gründe für eine zu schnelle Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren kommen in Betracht. Bei Titandioxid ist die photokatalytische

³⁰⁴ Titandioxid in den Strukturen Anatas, Brookit und Rutil wurden verschiedentlich untersucht hinsichtlich ihrer photokatalytischen Eigenschaften. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese bei Anatas am höchsten ist. Rutil dagegen weist eine geringere photokatalytische Aktivität auf. (Bellardita et al., 2016) Allerdings konnte im Fall der Photoreformierung auch gezeigt werden, dass Anteil an Rutil zugesetzt zu Anatas sich positiv auf die Wasserstoff-Ausbeute auswirkten (Bellardita et al., 2016). Des Weiteren wurde auch der Einfluss der Kristallstruktur unterschiedlicher Varianten des Titandioxids auf die Bildung und Ausbeute der Abbauprodukte von eingesetzten Substraten (bspw. Glucose) nachgewiesen (Bellardita et al., 2016).

³⁰⁵ Kawai/Sakata, Conversion of carbohydrate into hydrogen, S. 474-476.

³⁰⁶ Chen, Wan-Ting; Chan, Andrew; Sun-Waterhouse, Dongxiao; Llorca, Jordi; Idriss, Hicham; Waterhouse, Geoffrey I.N.: *Performance comparison of Ni/TiO₂ and Au/TiO₂ photocatalysts for H₂ production in different alcohol-water mixtures*, in: *Journal of Catalysis* 367, 2018, S. 27-42.

³⁰⁷ Melchionna, Michele; Beltram, Alessandro; Montini, Tiziano; Monai, Matteo; Nasi, Lucia; Fornasiero, Paolo; Prato, Maurizio: *Highly efficient hydrogen production through ethanol photoreforming by a carbon nanocone/Pd@TiO₂ hybrid catalyst*, in: *Chemical Communications* 52 (4), 2016, S. 764-767.

³⁰⁸ Bellardita et al., Photocatalytic formation of H₂, S. 5934-5947.

³⁰⁹ Bahadori, Photoreforming of Glucose over CuO/TiO₂, S. 1-20.

³¹⁰ Gu, Quan; Long, Jinlin; Fan, Lizhou; Chen, Liming; Zhao, Lulu; Lin, Huaxiang; Wang, Xuxu: *Single-site Sn-grafted Ru/TiO₂ photocatalysts for biomass reforming: Synergistic effect of dual co-catalysts and molecular mechanism*, in: *Journal of Catalysis* 303, 2013, S.141-155.

³¹¹ Kobayashi, Photoredox Cascade Catalyst, S. 1-5.

³¹² Petersen, Malte; Worliczek, Paul; Max, Johannes B.; Nabiyan, Afshin; Wejner, Manuel; Eichhorn, Jonas; Streb, Carsten; Schacher, Felix H.; Wilke, Timm: *Hydrogen Evolution Reaction with Sunlight for School Chemistry Education*, in: *World Journal of Chemical Education* 9(4), 2021, S. 190-196.

³¹³ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 12.

³¹⁴ Al-Azri et al., The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production, S. 361-364

Aktivität unter anderem von der Oberflächenstruktur und den Eigenschaften in Bezug auf die Korngröße abhängig.³¹⁵

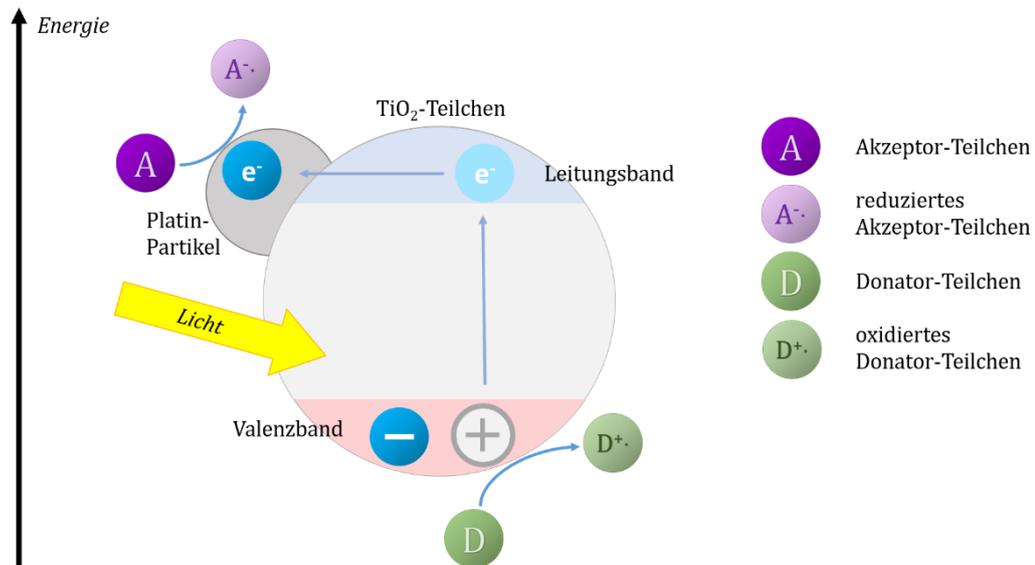


Abb. 14: Schematische Darstellung der allgemeinen Prozessschritte am Photokatalysator mit eingesetztem Co-Katalysator

Die Metall-Partikel auf Titandioxid-Teilchen begünstigen den Transfer von Elektronen aus dem Leitungsband des Halbleiter-Teilchens auf das Edelmetall-Partikel. Dies begründet sich darin, dass der Unterschied zwischen dem Energieniveau des Edelmetalls und dem Fermi-Niveau des Titandioxids zur Bildung einer Schottky-Barriere zwischen diesen Komponenten führt. Bei Bestrahlung fließen die Elektronen im Leitungsband der Titandioxid-Teilchen zum Metall-Partikel, wodurch die Ladungstrennung erfolgt und eine Rekombination erschwert wird.³¹⁶ Bei Vergleichen von Gold, Palladium oder Platin als Co-Katalysatoren zeigt sich in Vielzahl an Ergebnissen, die je nach untersuchten Faktoren eine Varianz an Ergebnissen liefert, die nicht eine eindeutige Aussage zulassen, welcher Co-Katalysator am besten für die Photoreformierung von organischen Substraten herangezogen werden kann. Bei niedrigen Massenanteilen von Co-Katalysatoren (0,1%) auf Titandioxid (P 25) zeigten Metalle wie Gold, Palladium und Platin relativ ähnlich Ergebnisse, wobei Platin als Co-Katalysator leicht bessere Wasserstoffausbeuten lieferte.³¹⁷ Untersuchungen zu höheren Masseanteilen (1%) konnten dagegen zeigen, dass mit Palladium belegtes Titandioxid (P 25) höhere Ausbeuten an Wasserstoff liefert als Titandioxid-Photokatalysatoren, die Platin und Gold als Co-Katalysator tragen, wobei die letztgenannten vergleichbare Werte lieferten.³¹⁸ Die

³¹⁵ Rosario, Adriane V.; Pereira, Ernesto C.: *The role of Pt addition on the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: The limit between doping and metallization*, in: Applied Catalysis B: Environmental 144, 2014, S. 840-841.

³¹⁶ Rosario/Pereira, *The role of Pt addition on the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles*, S. 841.

³¹⁷ Conte et al., *Low Metal Loading Photo-Catalysts*, S. 14-15.

³¹⁸ Al-Azri et al., *The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production*, S. 361-363.

Kombination zweier Edelmetalle als Co-Katalysatoren auf Titandioxid (insgesamt 1%) lieferten im Vergleich zu einem einzelnen Co-Katalysator bessere Ergebnisse bei der Wasserstoffproduktion.³¹⁹ Damit bietet sich ein recht diverses Bild zur Wirkung der Edelmetalle als Co-Katalysatoren. Experimentell konnten alle Untersuchungen jedoch zeigen, dass die Ausbeute an Wasserstoff deutlich höher ist als beim Einsatz von Titandioxid (P 25) ohne Co-Katalysatoren.^{320, 321} Was die Rolle des Co-Katalysators für die Photoreformierung von Biomasse angeht, müssen in Zukunft noch weitere Forschungen unternommen werden.

Neben der Art des Co-Katalysators ist als zweiter wichtiger Faktor die Beladung des Photokatalysators von großer Bedeutung. Sie nimmt ebenfalls Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der Ladungstrennung oder Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren und kann entweder den gewollten (Ladungstrennung) oder ungewollten Prozess (Rekombination) im Photokatalysator befördern. Wenn die Beladung mit Edelmetallen zu hoch ist, wird das Absorptionsvermögen des Photokatalysators verringert.³²² Folglich können weniger Photonen von den Photokatalysator-Teilchen absorbiert werden, wodurch die folgenden Redoxprozesse behindert werden. Schlechte Ergebnisse traten vor allem dann auf, wenn entweder die Oberfläche des Photokatalysators zu gering war oder das Porenvolumen nach der Oberflächenfunktionalisierung deutlich abnahm.³²³ Da aber bereits eine geringe, fein verteilte Edelmetallbeladung die Ladungstrennung positiv beeinflussen kann und zur Steigerung der Katalysatorleistung beiträgt^{324, 325} sollte die Beladung die Oberfläche nicht versiegeln. Experimentelle Untersuchungen konnten zudem zeigen, dass sich die Größe der Platin-Partikel deutlich auf die Wasserstoffproduktion auswirkt. Die Erhöhung der Platin-Partikelgröße (>1 nm) führt zu einem Rückgang der Bildungsrate von Wasserstoff. Wenn die Platin-Partikel deutlich kleiner waren als 1 nm, zeigte sich eine positive Wirkung auf die Photoreformierungs-Prozesse. Die Wasserstoffproduktion stieg an.³²⁶ Der Grund für die schlechteren Ausbeuten bei einer großen Partikelgröße liegt vermutlich in der schnellen Rekombination von Elektronen und Löchern. Bei kleinen Platin-Partikel (<1 nm) ist die Größe optimal für den schnellen Übergang der Elektronen aus dem Leitungsband der Titandioxid-Partikel.³²⁷

Neben mit Edelmetallen beladenen Titandioxid-Photokatalysatoren sind in jüngster Zeit noch weitere Mischkatalysatoren entwickelt worden, die besonders für die Photoreformierung von Cellulose-basierter Biomasse herangezogen wurden. Hierzu zählen unter anderem mit Nickelsulfid beladene Titandioxid-Photokatalysatoren (Ni-S/TiO₂) oder nano-strukturierte

³¹⁹ Conte et al., Low Metal Loading Photo-Catalysts, S. 14-15.

³²⁰ Ebd., S. 14-16.

³²¹ Al-Azri et al., The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production, S. 355-356.

³²² Rossetti, Hydrogen Production by Photoreforming, S. 2.

³²³ Conte et al., Low Metal Loading Photo-Catalysts, S. 14-16.

³²⁴ Ebd.

³²⁵ Lan, Lan; Daly, Helen; Jiao, Yilai; Yan, Yin; Hardacre, Christopher; Fan, Xiaolei: *Comparative study of the effect of TiO₂ support composition and Pt loading on the performance of Pt/TiO₂ photocatalysts for catalytic photoreforming of cellulose*, in: International Journal of Hydrogen Energy 46, 2021, S. 31064.

³²⁶ Lan et al., Comparative study of the effect of TiO₂ support composition, S. 31064.

³²⁷ Ebd.

Nickeloxid-Titandioxid- Photokatalysatoren (NiO/TiO₂).^{328, 329} Direkte Vergleiche zwischen Pt/TiO₂- und CuO_x/TiO₂-Photokatalysatoren bei der Erzeugung von Wasserstoff aus Glycerin zeigten, dass sich der Pt/TiO₂-Photokatalysator stabiler und effektiver erwies. Die Verwendung eines CuO_x/TiO₂-Photokatalysators ermöglicht jedoch eine größere Vielfalt und höhere Ausbeuten dieser organischen Produkte aus dem umgesetzten Glycerin.³³⁰

3.4.2. Weitere Photokatalysatoren für die Photoreformierung

Neben den vorgestellten Photokatalysatoren auf Basis von Titandioxid sind für die Photoreformierung verschiedene Studien zu zwei weiteren Gruppen von Photokatalysatoren zu finden, die einerseits als Hauptkomponente Cadmiumsulfid und andererseits Kohlenstoffnitride besitzen.³³¹ Daneben sind auch noch weitere Materialien zur photokatalytischen Umsetzung von Biomasse experimentell untersucht worden, z.B. Mischkatalysatoren aus Zinkoxid und Zinksulfid³³² sowie Photokatalysatoren auf Basis von Tantalaten.^{333, 334} Insgesamt betrachtet ist die Varianz an möglichen Materialien breit. Im Folgenden sollen kurz die Vor- und Nachteile der beiden genannten Gruppen dargestellt werden.

Cadmiumsulfid (Bandlücke $E_g = 2,4$ eV) zählt wie auch Titandioxid zu den Stoffen, die photokatalytische Eigenschaften besitzen.³³⁵ Cadmiumsulfid wird häufig mit weiteren Katalysatoren als Mischkatalysator eingesetzt. Mit Nickelsulfid und Cadmiumoxid dotiertes Cadmiumsulfid erhöht die Ausbeuten an erzeugtem Wasserstoff auch bei Substraten wie Cellulose, Lignocellulose oder Biomasse deutlich. Besonders die Zugabe von Cadmiumoxid ermöglicht eine gute Absorption von Substraten an der Oberfläche des Photokatalysators. Dadurch können während der Photoreformierung organische Substrat-Moleküle zu kleineren Molekülen unter gleichzeitiger Freisetzung von Protonen abgebaut werden.³³⁶ Ein großer Vorteil ist zudem, dass von Cadmiumsulfid bereits Licht im sichtbaren Spektralbereich (ca. 400 nm) absorbiert werden kann, um die photokatalytischen Prozesse in Gang zu setzen.³³⁷ Damit ist das benötigte Licht etwas energieärmer als solches, dass bei Titandioxid-Photokatalysatoren benötigt wird. Ein erheblicher Nachteil gegenüber Titandioxid ist jedoch die hohe Toxizität der Komponenten Cadmiumsulfid und Cadmiumoxid.³³⁸

³²⁸ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 13.

³²⁹ Bahadori, Photoreforming of Glucose over CuO/TiO₂, S. 17.

³³⁰ Kozlova, Ekaterina A.; Kurenkova, Anna; Gerasimov, Evgeny; Gromov, Nikolay V.; Medvedeva, Tatiana B.; Saraev, Andrey A.; Kaichev, Vasily V.: *Comparative study of photoreforming of glycerol on Pt/TiO₂ and CuO_x/TiO₂ photocatalysts under UV light*, in: Materials Letters 283 (128901), 2021, S. 4.

³³¹ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 13.

³³² Ebd., S. 14.

³³³ Clarizia et al., Hydrogen Generation through Solar Photocatalytic Processes, S. 6-8.

³³⁴ Sun, Feng; Wang, Ping; Yi, Zhouxiang; Wark, Michael; Yang, Junhe; Wang, Xianying: *Construction of strontium tantalate homo-semiconductor composite photocatalysts with tunable type II junction structure for overall water splitting*, in: Catalysis Science & Technology 8 (12), 2018, S. 3027-3031.

³³⁵ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 13.

³³⁶ Ebd.

³³⁷ Ebd.

³³⁸ Ebd.

Ein weiterer Typ von häufig für die Photoreformierung genutzten Photokatalysatoren sind solche auf Basis von graphitischem Kohlenstoffnitrid ($g\text{-C}_3\text{N}_4$).³³⁹ Vorteilhaft ist hierbei, dass es ein preiswertes, stabiles und schwermetallfreies Material ist,³⁴⁰ das Licht im sichtbaren Spektrum absorbiert (Bandlücke $E_g = 2,4 \text{ eV}$). Dies ist durch ein ausgedehntes, π -Elektronensystem der Kohlenstoffnitrid-Moleküle begründet.³⁴¹ Günstig zur Erhöhung der photokatalytischen Aktivität ist der Zusatz von Nickelphosphiden als Co-Katalysator. Dadurch lässt sich die Ausbeute an Wasserstoff bei der Photoreformierung von Cellulose bzw. Biomasse nochmals erhöhen.³⁴² Aus verschiedenen Gründen wird dieser Photokatalysatortyp als besonders geeignet für photokatalytische Prozesse angesehen. Neben dem Einsatz bei der Photoreformierung werden graphitische Kohlenstoffnitrid-Photokatalysatoren auch für Water-Splitting herangezogen sowie für die Umwandlung von Kohlenstoffdioxid, den Abbau von Schadstoff und die Synthese von Chemikalien.³⁴³ Die Forschung an diesem Photokatalysator ist ein vielversprechender Ansatz, mit sichtbarem Licht Biomasse zu Wasserstoff und anderen Nebenprodukten umzusetzen, bei dem es jedoch noch weiterer Untersuchungen bedarf.³⁴⁴

3.5. Photoreformierung - Möglichkeiten einer industriellen Umsetzung

Das Interesse an dem Thema Photoreformierung nahm in der fachwissenschaftlichen Forschung der letzten Jahre deutlich zu. Der Fokus der meisten Publikationen liegt dabei auf dem Aspekt der Wasserstoffherstellung und der Bereitstellung eines nachhaltigen Energieträgers.³⁴⁵ Diese Option wird häufig auch im Zusammenhang mit einer Perspektive für die industrielle Nutzung der Photoreformierung verknüpft. Die Perspektive „grünen“ Wasserstoff über diesen Weg herzustellen wirkt in Anbetracht von Förderungen zur Umwandlung der Industrie und der Reduzierung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen vielversprechend.

Bei der Betrachtung der Photokatalysatoren, die für die Prozesse der Photoreformierung von Biomasse in Frage kommen, ergeben sich je nach Variante eine Vielzahl an Vor- und Nachteilen. Der Einsatz von Titandioxid als Basis für Photokatalysatoren beruht darauf, dass es eine hohe chemische Stabilität aufweist und somit keine Photokorrosion eintritt,³⁴⁶ es keine akute Toxizität besitzt³⁴⁷ und als eine preisgünstige Massenware angesehen werden kann.³⁴⁸ Nachteilig ist jedoch, dass es zwar im nahen UV-Bereich das Absorptionsmaximum besitzt,

³³⁹ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 13.

³⁴⁰ Zheng, Yun; Lin, Lihua; Wang, Bo; Wang, Xinchun: *Polymeres graphitisches Kohlenstoffnitrid für die nachhaltige Photoredoxkatalyse*, in: *Angewandte Chemie* 127 (44), 2015, S. 13060.

³⁴¹ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 14.

³⁴² Ebd.

³⁴³ Zheng et al., Polymeres graphitisches Kohlenstoffnitrid, S. 13074-13075.

³⁴⁴ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 14.

³⁴⁵ Ebd., S. 28.

³⁴⁶ Al-Azri et al., The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production, S. 355-356.

³⁴⁷ Einschränkung muss auf die Gefahren von nanoskaliertem Titandioxid hingewiesen werden.

³⁴⁸ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 7.

aber dadurch ein großer Teil des von der Sonne emittierten Lichts, das auf der Erdoberfläche einstrahlt, nicht genutzt werden kann. Hier sind Katalysatoren mit einer geringeren Bandlücke von Vorteil. Alternativ können Titandioxid-Photokatalysatoren sensibilisiert werden, um auch Spektralbereiche im sichtbaren Licht zu absorbieren. Auch hier muss bei der Präparierung des Photokatalysators auf die Kosten solcher Verfahrensschritte geblickt werden. Die Beladung mit Edelmetallen ermöglicht, dass die Ausbeuten an Wasserstoffgas unabhängig vom eingesetzten Substrat um ein Vielfaches erhöht werden können. Nachteilig sind jedoch die damit verbundenen Kosten, die mit der Bereitstellung solcher Metalle einhergehen. Forschungsergebnisse zeigen jedoch auch, dass mit Edelmetall beladene Titandioxid-Photokatalysatoren durch andere mit einem kostengünstigeren Kupferoxid-Cokatalysator zu ersetzen sind.³⁴⁹ Damit können für diesen Photokatalysatortyp die Kosten reduziert werden. Weitere Photokatalysatoren wie die auf Basis von Kohlenstoffnitrid, die für die Photoreformierung von Biomasse geeignet sind, sind ebenfalls eine Option.

Auf Seiten der Substrate spielen ebenfalls viele Faktoren mit hinein, wenn es um die Bewertung der Photoreformierung für eine industrielle Produktion geht. Zu berücksichtigen sind hier zunächst die einsetzbaren Substrate selbst. Ihre Eigenschaften und ihre Bereitstellung bilden den Kern bei einer möglichen Abwägung, welche Substrate für eine industrielle Photoreformierung, die gleichzeitig den Anforderungen an eine nachhaltige Wasserstoffproduktion genügen, geeignet sind. Wie bereits beschrieben ist die Wasserlöslichkeit ein entscheidender Faktor für die Erhöhung der Wasserstoffausbeute. Besonders für die Photoreformierung von Biomasse wie z.B. Cellulose müssen Vorbehandlungen des eingesetzten Substrates vorgenommen werden, damit die Löslichkeit in Wasser erhöht wird, bzw. die Polymere zu Monomeren (im Falle der Cellulose zu Glucose) abgebaut werden. Alkalische oder saure Vorbehandlungen müssen dementsprechend in die Prozesskette miteinbezogen werden. Daneben muss auch auf die Bereitstellung und Gewinnung der Ausgangsstoffe geblickt werden, wie diese gewonnen werden. Biomasse kann als Substrat angesehen werden, das vielfach zur Verfügung steht, insbesondere wenn es als Abfall anderer Industriezweige eine kostengünstige Alternative zur Entsorgung bietet. Bei anderen Substraten, die wegen ihrer Wasserlöslichkeit günstiger scheinen wie Methanol, Ethanol oder Glycerin muss auch auf die Produktionswege dieser Stoffe geblickt werden. energie- bzw. kostenintensiv hergestellte Ausgangsstoffe sind nicht nur aus ökonomischer Sicht, sondern auch aus ökologischer Perspektive wenig geeignet für die photokatalytische Umsetzung zu Wasserstoff. Der Ursprung der Substrate sollte somit möglichst in den Nebenprodukten anderer chemischer Prozesse liegen. Eine vielversprechende Möglichkeit wäre hier die Nutzung von Glycerin, welches u.a. in größeren Mengen als Nebenprodukt bei der Herstellung von Bio-Diesel anfällt.³⁵⁰ Bei der Annahme, dass die Produktion von Biodiesel in den kommenden Jahren weiter steigt, wäre dies eine Möglichkeit, Entsorgungskosten zu reduzieren.³⁵¹

³⁴⁹ Kozlova et al., Comparative study of photoreforming of glycerol, S. 128901.

³⁵⁰ Rumayor et al., Prospective life cycle assessment of hydrogen production by waste photoreforming, S. 2.

³⁵¹ Ebd.

Des Weiteren müssen auch die optimalen Bedingungen für die Photoreformierung von Biomasse oder organischer Substrate in industrielle Verfahrensprozesse eingebettet werden. Besonders die Ermittlung der optimalen Konzentration von Substrat-Lösungen ist für die Steigerung der Ausbeute an Wasserstoff entscheidend. Hierzu zählt auch, dass bereits Spuren anderer Substrate, die im Labormaßstab durch den Einsatz von Reinstoffen ausgeschlossen sind, nicht jedoch unter Realbedingungen angenommen werden können, einen großen Einfluss auf die Ausbeute an Wasserstoff nehmen.³⁵²

Mit hinein spielen zudem weitere Faktoren wie Temperatur oder pH-Wert, die einen deutlichen Einfluss auf die Photoreformierung verschiedener Substrate haben. Die während der Photoreformierung entstehenden Produkte nehmen ihrerseits auch Einfluss auf die Produktionsrate von Wasserstoff. Dies muss vor allem für Semi-Batch formatige Ansätze berücksichtigt werden, da zwar Gase kontinuierlich abgeführt werden können, nicht jedoch die flüssige Phase.³⁵³

All diese genannten Faktoren spielen bei der Beurteilung der Einsatzmöglichkeit der Photoreformierung für industrielle Zwecke eine entscheidende Rolle. Als Hilfsmittel bei der Reifebewertung neuer Technologien, kann eine *Technology Readiness Level-Skala* (TRL-Skala) herangezogen werden. Mithilfe dieser neunstufigen Skala können Aussagen getroffen werden, wie weit eine bestimmte Technologie bereits entwickelt ist, ob sie zu Beginn der universitären Forschung (Stufe 1) oder vollständig in der Industrie bei Unternehmen Anwendung findet und vielfach erprobt ist (Stufe 9).^{354, 355} Gleichzeitig geht mit jeder nächsthöheren Stufe eine Verringerung des Risikos für Unternehmen einher.³⁵⁶ Auch für verschiedene Aspekte der Photokatalyse ermöglicht die Anwendung dieser Skala eine Einordnung und Bewertung dazu, an welchem Entwicklungspunkt eine jeweilige Technologie steht. Solche Einschätzungen zu verschiedenen Prozessen der Photokatalyse wurden bereits durchgeführt und zeigen eine Bandbreite an Positionen der photokatalytischen Anwendungen auf dieser Skala von 1 bis 9.³⁵⁷ So kann die Anwendung photokatalytischer Prozesse im Bereich der selbstreinigenden Oberflächen als eine voll ausgereifte Technologie angesehen werden, die auch industriell von Bedeutung ist (Stufe 9). Dagegen sind solche Anwendungen im Bereich Umweltsanierung im Mittelfeld der Skala im Übergang von ausgereifter, universitärer Forschung hin zu einer ersten Pilotierung im industriellen Maßstab einzusortieren. Die Photoreformierung von Biomasse zur Gewinnung des chemischen Energieträgers Wasserstoff als weitere Anwendung photokatalytischer Prozesse ist jedoch auf der Skala noch voll im Bereich der universitären Forschung zu lokalisieren.³⁵⁸ Dass der letztgenannte Prozess auf dieser TRL-Skala am Anfang steht, ist der

³⁵² Lopez Tenllado et al., Photocatalytic production of hydrogen from binary mixtures of C-3 alcohols, S. 4.

³⁵³ Sola, et al., Photocatalytic H₂ production, S. 19630.

³⁵⁴ Ashkavand, Mostafa; Jentsch, Sebastian; Eggers, Natascha; Birth-Reichert, Torsten: *Readiness Levels. Kennzahlen zur systemtechnischen Bewertung - Eine Übersicht* (Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung), Magdeburg 2023, S. 4.

³⁵⁵ Sauser, Brian J.; Verma, Dinesh, Ramirez-Marquez, Jose Emmanuel; Gove, Ryan: *From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels*. [Konferenzbeitrag] Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles 07.-08.04.2006, S. 2.

³⁵⁶ Ashkavand et al., Readiness Levels, S. 4.

³⁵⁷ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 20.

³⁵⁸ Ebd.

Komplexität der chemischen Prozesse während der Photoreformierung geschuldet.³⁵⁹ Dies wird besonders deutlich durch die in den vorherigen Kapiteln dargestellte Varianz an möglichen Zwischenprodukten, die bereits bei einfachen Substraten wie Methanol, Ethanol oder Glycerin entstehen können. Zwar wird in der meisten Literatur die Möglichkeit der Nutzung dieser Nebenprodukte als wertvolle Chemikalien und zum Teil auch als Basischemikalien hervorgehoben, allerdings muss bei Blick auf die Wirtschaftlichkeit solcher Prozesse ein anderer Blickwinkel gewählt werden. Hier ist die Einordnung auf der TRL-Skala in den Stufen 1 bis 2 zu suchen, da auch in der Grundlagenforschung noch weitere Untersuchungen nötig sind zur Validierung erster Ergebnisse.³⁶⁰ Nichtsdestoweniger ist die Forschung in diesem noch recht jungen Feld der Photoreformierung elementar und unabdingbar, um den genannten Schwierigkeiten der noch nicht vollständig entschlüsselten Reaktionsverläufe oder der Optimierung von Photokatalysator-Materialien zu begegnen und Lösungswege zu finden, dass die Photoreformierung und die Herstellung von „grünem“ Wasserstoff industriell bedeutsam werden kann.

3.6. Potentiale und Herausforderungen der Photoreformierung

Eine bloße wirtschaftliche Betrachtung würde jedoch die für eine umfassende Bewertung der Photoreformierung nötigen ökologischen und auch gesellschaftlichen Perspektiven außer Acht lassen. Dabei muss eine Vielzahl an Faktoren beachtet werden, die in ihrer Fülle und Abhängigkeiten untereinander an dieser Stelle nur auszugsweise dargestellt werden können. So stark die Umsetzung der Photoreformierung mit Herausforderungen auf industrieller wie auch wirtschaftlicher Ebene verbunden ist, so groß sind jedoch die Potentiale besonders im ökologischen Bereich, wenn es um nachhaltige und zukunftsfähige Energieversorgung geht. Vor allem die Nutzung der Solarenergie für die Photoreformierung ist ein vielversprechender Ansatz. Grundsätzlich würde die Energiemenge, die täglich durch die Sonne auf der Erdoberfläche eingestrahlt wird, die vom Menschen jährlich auf der Erde benötigte Energiemenge bei Weitem übertreffen.³⁶¹ Um die Nutzung fossiler Energieträger, die mit dem Ausstoß von Kohlenstoffdioxid einhergeht, in Zukunft weiter deutlich einzuschränken und so die Emissionen zu reduzieren, scheint die Nutzung der Solarenergie ein geeigneter Weg zu sein, den Herausforderungen der Zukunft im Sinne einer nachhaltigen Umgestaltung des Energiesektors weltweit zu begegnen³⁶² (siehe Abb. 15). Die Umwandlung von Solarenergie in elektrische Energie oder in chemische Energie in Form von Chemikalien oder Treibstoffen wie Wasserstoff bilden zwei mögliche Lösungswege bei der Bewältigung der benannten Probleme.³⁶³

³⁵⁹ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 20.

³⁶⁰ Ebd.

³⁶¹ Christoforidis/Fornasiero, Photocatalytic Hydrogen Production, S. 1524.

³⁶² Kremer, Richard: *Photokatalytische Wasserstoffherstellung. Modellexperimente mit homogenen und heterogenen Systemen für Unterricht und Lehre*. Dissertation, Wuppertal 2023, S. 8.

³⁶³ Kremer, Photokatalytische Wasserstoffherstellung, S. 8.

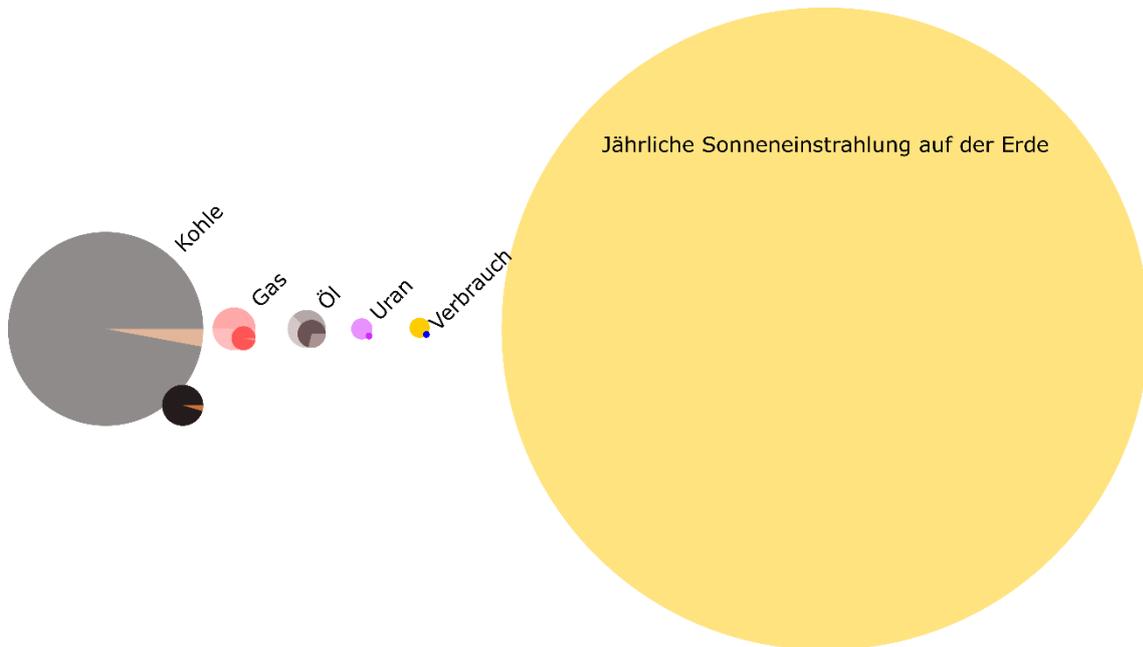


Abb. 15: Vergleich des Primärenergieverbrauchs der Menschheit (2014) zu nutzbaren fossilen und nuklearen Energieressourcen der Erde sowie der jährlichen Sonneneinstrahlung. Darstellung von Richard Kremer³⁶⁴

Die photokatalytische Produktion von Wasserstoff ist dabei neben der photokatalytischen Reduktion von Kohlenstoffdioxid zu Kohlenwasserstoffen eine Möglichkeit, einen chemischen Energieträger herzustellen, der gespeichert werden kann.³⁶⁵ Die Herstellung von Wasserstoff über den Weg der Photoreformierung bietet die Möglichkeit, eine Vielzahl von Stoffen zu Wasserstoff und weiteren Nebenprodukten umzusetzen. Besonders aber die Nutzung von Synergien bei der Photoreformierung ermöglicht die Minimierung von Kohlenstoffdioxidemissionen durch die Bereitstellung eines CO₂-neutralen und hochwertigen Energieträgers Wasserstoff bei gleichzeitiger Nutzung von Abfällen aus Landwirtschaft oder der Lebensmittelindustrie, die andernfalls aufwändig entsorgt oder lediglich verbrannt würden. In diesem Zusammenhang wurde in den letzten Jahren nicht nur den aus Abfällen gewonnenen Substraten mehr Aufmerksamkeit geschenkt, sondern auch der Verwendung von Abfällen selbst im Hinblick auf die Förderung einer Kreislaufwirtschaft.³⁶⁶

Bei den eingesetzten Substraten ist jedoch besonders auf den Ursprung dieser zu achten. Eine CO₂-Neutralität des gebildeten Wasserstoffs oder des Prozesses der Photoreformierung selbst kann nur gewährleistet werden, wenn es sich bei den Substraten um Biomasse oder um aus Biomasse zweiter Generation gewonnene Stoffe handelt.³⁶⁷ Substrate auf Basis fossiler Energieträger wie Kohle, Erdgas oder Erdöl könnten nicht als CO₂-neutral bezeichnet werden. Somit ist aus ökologischer Perspektive die Nutzung von Alkoholen, die unter Einsatz fossiler Energieträger gewonnen werden, kein möglicher Ansatz, Kohlenstoffdioxid-Emissionen zu vermeiden. Auch hierbei müssen noch zahlreiche weitere Faktoren bei der Herstellung von Biomasse berücksichtigt werden, wie der Einsatz von Düngemitteln, der vor

³⁶⁴ Kremer, Photokatalytische Wasserstoffherstellung, S. 8.

³⁶⁵ Christoforidis/Fornasiero, Photocatalytic Hydrogen Production, S. 1524.

³⁶⁶ Garcia-Lopez et al., Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions, S. 6.

³⁶⁷ Christoforidis/Fornasiero, Photocatalytic Hydrogen Production, S. 1525.

allem aus ökologischer Perspektive aber auch ökonomischer Perspektive mitberücksichtigt werden muss. Als sehr attraktiv wird die Variante der Photoreformierung von Kunststoffen in jüngster Zeit stärker diskutiert, da mit ihr auch ein Weg angeboten wird, der Problematik der immer stärker zunehmenden Mengen an Kunststoffmüll zu begegnen, indem diese zu wertvollen Produkten wie bspw. Wasserstoff abgebaut werden können. Aber auch hier muss berücksichtigt werden, dass Kunststoffe zumeist auf Basis fossiler Grundchemikalien hergestellt werden. Bei der Photoreformierung dieser Abfallprodukte entstehendes Kohlenstoffdioxid würde nicht als CO₂-neutral angesehen werden können, da sein Ursprung in fossilen Quellen liegt.³⁶⁸ Durch Fermentation von Biomasse gewonnene Alkohole oder Zucker, die durch den enzymatischen Abbau von Biomasse erhalten werden, können aber wie auch das bei der Biodiesel-Herstellung gewonnene Glycerin zu nachwachsenden Rohstoffen hinzugezählt werden. Bei der Photoreformierung dieser Substrate ist somit die CO₂-Neutralität gewährleistet. Wie bereits dargestellt konnte auch die Behandlung von Biomasse mittels Metallsalz-Lösungen die Löslichkeit deutlich erhöhen, wodurch gleichzeitig die Ausbeuten an Wasserstoff gesteigert werden konnten. Damit bilden perspektivisch auch biomassebasierte Substrate oder Substratgemische mit eigentlich wasserunlöslichen Anteilen eine Möglichkeit, diese zu Wasserstoff umzusetzen. Natürlich muss auch an dieser Stelle die ökologische Bilanz des Einsatzes dieser Zusatzstoffe berücksichtigt werden.

Aber auch noch weitere Faktoren müssen in einer umfassenden Betrachtung der Photoreformierung berücksichtigt werden. Anders als bei der Nutzung des Sonnenlichts für die Photoreformierung muss im Falle der Nutzung künstlicher Lichtquellen zur photokatalytischen Herstellung von Wasserstoff auch diese in die Bewertung einfließen. Beim Einsatz von LED-Photoreaktoren zur Photoreformierung müssen die Quelle(n) des bereitgestellten Stroms (wie auch bei der Herstellung „grünen“ Wasserstoffs durch Elektrolyse) für den Wirkungsgrad der gefahrenen Prozesse oder die Summe der Kohlenstoffdioxid-Emissionen mit einbezogen werden.

Auch müssen neben der Bereitstellung der Substrate auch die eingesetzten Photokatalysator-Materialien beachtet werden. Neben den ökonomischen Faktoren müssen auch ökologische Aspekte berücksichtigt werden. Hierzu zählen die zuvor benannten Punkte der Umweltverträglichkeit. Die eingesetzten Photokatalysatoren sollten möglichst für Pflanzen und Lebewesen nicht toxisch sein. Zudem sollten sie ohne großen energetischen Aufwand herzustellen sein. Dazu kommen soziale Faktoren, die unter Umständen auch mit zu berücksichtigen sind. Hierzu zählt bspw. der Abbau vor allem von Edelmetallen wie Platin oder Palladium, die zum Teil mit erheblichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt einhergehen. Ein Beispiel ist hierfür der Platinabbau in Südafrika, der mit Wasserverknappung für die ansässige Bevölkerung und Landnahme durch die Minenbetreiber einhergeht.³⁶⁹

³⁶⁸ Li et al., State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics, S. 2522-2523.

³⁶⁹ Brot für die Welt: *Studie: Edles Metall – Unwürdiger Abbau Platin aus Südafrika und die Verantwortung deutscher Unternehmen*, Berlin 2018; online unter: https://www.brot-fuer-die-welt.de/fileadmin/mediapool/2_Downloads/Fachinformationen/Analyse/Analyse75-de-v10-Web.pdf (Zugriff: 28.11.2024).

Die Photoreformierung als technisches Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff bietet vielfach Chancen, aktuellen und drängenden Problemstellungen im Bereich Klimaschutz, Reduzierung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen und einer nachhaltigen Umgestaltung wirtschaftlicher Prozesse einen möglichen Lösungsweg aufzuzeigen. Die Produktion von „grünem“ Wasserstoff als einem speicherbaren, chemischen Energieträger, der sinnvoll im Schwerlastverkehr, der Schifffahrt oder auf der Schiene eingesetzt werden kann, eröffnet die Option, diese Bereiche zukunftsweisend umzugestalten und einen Beitrag zu leisten zum Ziel bis 2050 in Deutschland keine Kohlenstoffdioxid-Emissionen freizusetzen. Auch die Photoreformierung kann ergänzend zur Elektrolyse von Wasser mittels Stroms aus erneuerbaren Energien einen gewinnbringenden Beitrag zur Deckung des zukünftig steigenden Bedarfs an Wasserstoff leisten. Die Bereitstellung von „grünem“ Wasserstoff ist letztendlich die entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche und vor allem nachhaltige Transformation des Energie- und Verkehrssektors. So groß und attraktiv die Möglichkeiten sein mögen, die mit der Photoreformierung von Biomasse einhergehen, so sehr ist dieser Bereich auch noch auf weitere Forschung angewiesen. Denn aktuell erscheint dieses Verfahren zwar ökologisch sehr attraktiv, es ist jedoch noch nicht industriell umsetzbar. Hier müssen noch verschiedenen Probleme gelöst und sich Herausforderungen angenommen werden, damit perspektivisch diese Technologie in der Breite einsatzfähig ist.

4. Von der Forschung an die Schule

Die Relevanz des Themas Photoreformierung im schulischen Kontext wird in *Kapitel 6* näher betrachtet. Die Konzeption eines Versuchs für den Chemieunterricht ist an weitere Bedingungen geknüpft, die eine Umsetzung auch für die breite Masse der Chemielehrkräfte befördern. Daher stellten sich an die Entwicklung eines Versuchs bestimmte Bedingungen, damit ein Experiment schultauglich für den Unterricht ist und so praktisch einsetzbar wird. Es wird daher in den folgenden Kapiteln kurz auf mögliche, auftretende Probleme geblickt und wie sie für diesen Versuch berücksichtigt wurden. Zunächst werden die Ergebnisse einer Umfrage vorgestellt, die im Herbst 2020 durchgeführt wurde, um die Entwicklung des Versuchs zur Photoreformierung darzustellen. In diesem Teil werden auch die Ergebnisse der Laboruntersuchungen zu verschiedenen Aufbauten, in denen das Experiment realisiert wurde, vorgestellt, bevor abschließend ein kurzes Fazit zum Experiment gezogen wird.

4.1. Uni fragt Schule: Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht

Die Aufbereitung eines neuen Themenbereichs für schulische Kontexte stand im Vordergrund der Entwicklung eines Experiments. Zu Beginn des Vorhabens wurde daher die Umfrage „*Uni fragt Schule: Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht*“ an Lehrkräfte gestartet, mit der erste Rückmeldungen zum Thema Photoreformierung bzw. der photokatalytischen Umsetzung von Biomasse im Allgemeinen und der Eignung für den schulischen Chemieunterricht eingeholt werden sollten. Die Umfrage kombinierte mehrere Anliegen. Nicht nur die Relevanz des Themas Photoreformierung für den schulischen Kontext sollte erfragt werden, sondern auch der Stellenwert von BNE im Chemieunterricht und die Bedeutung bilingualer Angebote im Fach Chemie. Damit sollten erste Eindrücke aus dem Praxisfeld gesammelt werden und diese in das weitere Forschungsvorhaben und die Entwicklung von Experimenten und Materialien einfließen.

4.1.1. Fragebogen

Der grundsätzliche Aufbau des Fragenkatalogs und die Gestaltung der Items orientierte sich an Dörschelln³⁷⁰ und Zeller.³⁷¹ Eine Auswahl bestimmter Items bildet die Basis der Fragebogens. Sie wurde für die Befragung angepasst bzw. erweitert, sodass sie der Fragestellung zu BNE und innovativen Experimenten im Chemieunterricht sowie dem Aspekt Bilingualer Unterricht gerecht werden.

³⁷⁰ Dörschelln, Jennifer: *Organische Leuchtdioden. Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht. Dissertation*, in: Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth (Hrsg.) *Studien zum Physik- und Chemielernen*, Band 274, Berlin: Logos 2019, S. 139-142.

³⁷¹ Zeller, Diana: *Didaktische Erschließung von Titandioxid für den Chemieunterricht - Entwicklung und Optimierung von Experimenten, didaktischen Konzepten und Medien. Dissertation*, Wuppertal 2019, S. 254-265.

Der Fragebogen selbst gliedert sich in drei Abschnitte. Unter dem Punkt *Allgemeines* erfolgt die Abfrage weniger Merkmale zur Charakterisierung der Stichprobe. Anschließend folgen 13 Fragen zur Gestaltung und Umsetzung von BNE im naturwissenschaftlichen Unterricht (Chemie, Physik, Biologie, Naturwissenschaften) und sieben Fragen zur Umsetzung bilingualen Unterrichts unter dem Aspekt BNE. Zu den grundlegenden Daten, die von jedem Teilnehmer anonym erfragt wurden, gehören die unterrichteten Fächer und entsprechend ihre Kombinationen, das Geschlecht und die Jahre an Lehrerfahrung inklusive des Referendariats. Letztere wurden gestaffelt nach Jahren erfragt (*siehe Tab. 4*). Hierdurch sollten auch zu Fragen des zweiten und dritten Teils der Umfrage Rückschlüsse ermöglicht werden. Hierzu gehört der Zusammenhang, welche Lehrkräfte in Abhängigkeit ihrer Lehrerfahrung und ihrer Fächerkombination bereits Erfahrung im Bereich BNE gesammelt haben bzw. sie BNE in ihrem Unterricht konkret umsetzen.

FRAGE	ANTWORTMÖGLICHKEITEN					
Welche Fächer unterrichten Sie?	offene Frage					
Welches Geschlecht haben Sie ?	männlich	weiblich	divers	keine Antwort		
Über wie viel Lehrerfahrung (inkl. Referendariat) verfügen Sie ?	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	10 - 20 Jahre	20 - 30 Jahre	> 30 Jahre	keine Antwort

Tab. 4: Grundfragen Kohorte

Im anschließenden Fragenblock zu *BNE im Chemieunterricht* wurden sowohl einige allgemeine, geschlossene Fragen zu BNE im single- oder multiple-choice Format als auch konkrete offene Fragen zur Umsetzung im eigenen Unterricht gestellt. Die Lehrkräfte wurden explizit gebeten, die Relevanz für verschiedene Themenkomplexe in ihrem Unterricht einzuschätzen. Hierzu wurden sieben Bereiche ausgewählt, die bereits schwerpunktmäßig in der Didaktik der Chemie der Bergischen Universität Wuppertal (BUW) beforscht werden. Unter anderem wurde so die Relevanz der Photoreformierung bzw. der photokatalytischen Umsetzung von Biomasse für den Chemieunterricht erfragt. Neben konkreten Themengebieten wie der Photoreformierung, biologischer Brennstoffzellen oder alternativer Solarzellen auf Titandioxid-Basis wurden auch Antwortmöglichkeiten vorgeschlagen, die ein etwas weitergefasstes Themenfeld ansprechen, wie bspw. die Nutzung alternativer Antriebe oder Wasserstoff als Energieträger. Hierbei handelt es sich um Punkte, die konkrete Bezüge zum Kernlehrplan Chemie Sek. II im Inhaltsfeld Elektrochemie setzen.³⁷² Damit sollten auch Themen aufgeführt werden, die wie Brennstoffzellen eine Kernlehrplananbindung aufweisen und so neben der aktuellen Forschung hierzu auch die Synthese von Wasserstoff aufgreifen können.

Hier konnten die Lehrkräfte zudem Wünsche äußern, zu welchen Themen sie Materialien (inkl. einer Abfrage des präferierten des Formats) benötigen und zu welchen Themen sie ein

³⁷² Ministerium für Schule und Bildung Nordrhein-Westfalen (MSB NRW): *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen Chemie*, Düsseldorf 2022, S. 50-52; online unter: https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/314/klp_gost_ch_2022_06_07.pdf (10.09.2023).

Schülerlaborangebot nutzen würden. Damit sollte auch ermittelt werden, in welcher Form sich ein Angebot an Lehrkräfte richten könnte, das einerseits den Fokus auf BNE setzt und andererseits innovative Forschung aufgreift und es für den Schulbereich einsetzbar macht. Ebenso wurde nach dem Interesse an Lehrkräftefortbildungen gefragt, um eine Einschätzung zu gewinnen, ob Themen wie Photoreformierung, Wasserstoff als Energieträger oder die Nutzung alternativer Antriebe für zukünftige Fortbildungsformate überhaupt in Frage kommt. *Tabelle 5* zeigt die Auswahl einiger Fragen, die an die Lehrkräfte gerichtet wurden.

FRAGE	ANTWORTMÖGLICHKEITEN															
Was verstehen Sie unter einer Bildung für nachhaltige Entwicklung?	offene Frage															
Welche Zielsetzung verbinden Sie mit Bildung für nachhaltige Entwicklung?	offene Frage															
Ist Ihnen die Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung - NRW bekannt?	ja	nein	keine Antwort													
Werden BNE-bezogene Themen bereits in Ihrem Unterricht umgesetzt?	ja	nein	keine Antwort													
Wenn ja, welche?	offene Frage															
Welche der folgenden Themen haben Sie in Ihrem Fachunterricht bereits umgesetzt?	Brennstoffzelle	Biologische	synthese	künstliche Photo-	Energieträger	Wasserstoff als	Nutzung alterna-	tiver Antriebe	Biomasse	Photokatalytische	Umsetzung von	alternativen Solar-	zellen	CCS	keine der angege-	benen Themen
Wie schätzen Sie die Relevanz für einen BNE-Bezug dieser Themenkomplexe in Ihrem Unterricht ein?																
künstliche Photosynthese	sehr hoch	hoch	gering	sehr gering	keine Antwort											
Wasserstoff als Energieträger	sehr hoch	hoch	gering	sehr gering	keine Antwort											
Nutzung alternativer Antriebe	sehr hoch	hoch	gering	sehr gering	keine Antwort											
Photokatalytische Umsetzung von Biomasse	sehr hoch	hoch	gering	sehr gering	keine Antwort											
Wünschen Sie sich zu den genannten Themen ein Schülerlaborangebot?	ja	nein	keine Antwort													
Würden Sie an einer Lehrerfortbildung zur experimentellen Erschließung von Themen mit konkreten Bezügen zu BNE teilnehmen? Bitte begründen Sie kurz.	ja	nein	keine Antwort													

Tab. 5: Auswahl einiger Fragen zu BNE

Im Anschluss an den Fragenblock zu BNE wurden im dritten und letzten Teil noch weitere Fragen zum bilingualen Unterricht im Fach Chemie angeführt. Diese Fragen und der vollständige Fragebogen lassen sich im digitalen Anhang finden.

4.1.2. Durchführung

Die Umfrage zu BNE im naturwissenschaftlichen Unterricht wurde mit dem freien Online-Umfragetool *LimeSurvey* erstellt und durchgeführt. Dieses Tool ermöglicht ebenfalls die Auswertung von Fragen sowie die Übertragung der Ergebnisse in andere Dateiformate zur weiteren Auswertung. Die Befragung selbst richtete sich an drei verschiedene Gruppierungen von Schulen, um so einen möglichst großen Kreis an Lehrkräften ansprechen zu können und die Stichprobengröße zu maximieren. Zu diesen Schulen gehörten alle Schulen mit MINT-EC-Zertifikat in NRW³⁷³ sowie 75 Schulen in ganz Deutschland mit ausgewiesenem bilingualem Unterricht in den Naturwissenschaften Biologie und Chemie. Hierzu kamen die Schulen derjenigen Lehrkräfte, die das Schülerlabor Chemielabothek der BUW bereits besucht haben und außerdem alle Gymnasien und Gesamtschulen des Bergischen Städtedreiecks (Wuppertal, Solingen, Remscheid), um sowohl teilnehmende wie auch potentiell teilnehmende Schulen an den Angeboten der Schülerlabors Chemielabothek zu erreichen, die in der Region des ZDI-Zentrum Best³⁷⁴ liegen und daher eine engere Anbindung an die BUW besitzen. Insgesamt wurden so 202 Lehrkräfte persönlich angeschrieben. Der Link zur Online-Umfrage wurde an die entsprechenden Personen bzw. Fachleitungen Chemie der jeweiligen Schulen geschickt mit der zusätzlichen Bitte, diese Umfrage im Kollegium für interessierte Lehrkräfte, die naturwissenschaftliche Fächer unterrichten, weiter zu verbreiten und zu teilen. Die Laufzeit der Umfrage belief sich auf den Zeitraum vom 8. September 2020 bis zum 31. Oktober 2020.

4.1.3. Ergebnisse

Insgesamt nahmen an der Online-Umfrage 77 Lehrkräfte teil, allerdings zeigte sich bei der genauen Betrachtung der zurückgesandten Fragebögen, dass lediglich 36 Personen einen vollständig ausgefüllten Fragebogen eingereicht hatten.³⁷⁵ Damit erwies sich die Stichprobe bei einem so großen Adressatenkreis als vergleichsweise klein. Nichtsdestoweniger besitzen

³⁷³ Zu dem Zeitpunkt der Umfrage (September 2020) gehörten in NRW 101 Schulen (100 Gymnasien, 1 Gesamtschule) diesem Netzwerk an. MINT-EC steht für das nationale Excellence-Netzwerk von Schulen mit gymnasialer Oberstufe, die im Bereich des mathematisch-naturwissenschaftlich-technischen Unterrichts herausragende Leistungen bringen. Das Netzwerk setzt sich dabei das Ziel, diese Schulen und ihre Lernende, Lehrkräfte und Schulleitungen bei der Entwicklung von MINT-Angeboten zu unterstützen und fördern. Aktuell (Stand April 2024) gehören diesem Netzwerk 337 Schulen in ganz Deutschland an. Schirmherr ist seit 2009 die Kultusministerkonferenz.

³⁷⁴ Das ZDI-Zentrum Best ist Teil der Gemeinschaftsoffensive des Landes NRW „Zukunft durch Innovation. NRW“. Es dient der Förderung des naturwissenschaftlichen Nachwuchses.

³⁷⁵ Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *BNE und Chemieunterricht - BNE als roter Faden durch die Schulchemie und Beispiel einer Lerneinheit zur Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid*, in: CHEMKON 30 (3), 2021, S. 98.

die Antworten und Ergebnisse dieser Umfrage einen hohen Stellenwert und einige interessante Besonderheiten. Grundsätzlich nahmen an der Umfrage überwiegend Chemielehrkräfte teil (25 Lehrkräfte),³⁷⁶ von denen 16 eines oder zwei weitere naturwissenschaftliche Fächer (neun Biologie, fünf Mathematik, zwei Physik, zwei Informatik, eine Technik) unterrichteten. Somit lässt sich eindeutig sagen, dass die Umfrage die intendierte Zielgruppe erreichen konnte. Die ausschließlich aus MINT-Lehrkräften bestehende Kohorte ermöglicht, dass trotz der geringen Größe der Stichprobe, wertvolle Aussagen für MINT-Fächer und im Besonderen auch Chemie aus der Praxis gewonnen werden können. Die Lehrerfahrung der meisten Teilnehmenden belief sich auf einen Zeitraum zwischen 20 und 30 Jahren.

Der zweite Umfrageteil startete mit zwei offenen Fragen zu BNE. Durch dieses Fragenformat ergab sich ein sehr diverses Antwortbild. Bei dem, was die Teilnehmenden unter BNE verstehen, zeigte sich, dass vielfach Themen wie Klimaschutz, Klimawandel und Ressourcen sowie auch die nachhaltige Entwicklung in verschiedenen Dimensionen (ökologisch, ökonomisch, sozial) inklusive der 17 SDGs benannt wurden. Neben diesen konkreten Beispielen können vielen Antworten unter dem Aspekt zusammengefasst werden, dass BNE Lernende befähigen soll, nachhaltig zu handeln, indem Auswirkungen des eigenen Handelns verstanden und reflektiert, eigene Urteile auf Basis von Fachwissen gebildet, Lösungsmöglichkeiten entworfen und Verhaltensmuster geändert werden.³⁷⁷

Bei der Zielsetzung von BNE benannten die Lehrkräfte meist inhaltliche und themengeleitete Ziele wie auch die Entwicklung von Kompetenzen von Lernenden, sich Informationen zu beschaffen, Entscheidungsprozesse zu bewerten und abzuwägen, kritisch zu hinterfragen und selbstständig zu lernen. Erwähnt wurde des Weiteren, dass BNE auch vernetztes Lernen in fächerübergreifenden Bereichen zum Ziel hat. Nur knapp 45 % der Teilnehmenden kannten die Leitlinie BNE NRW fast die Hälfte (47 %) hingegen nicht (siehe Abb. 15).³⁷⁸

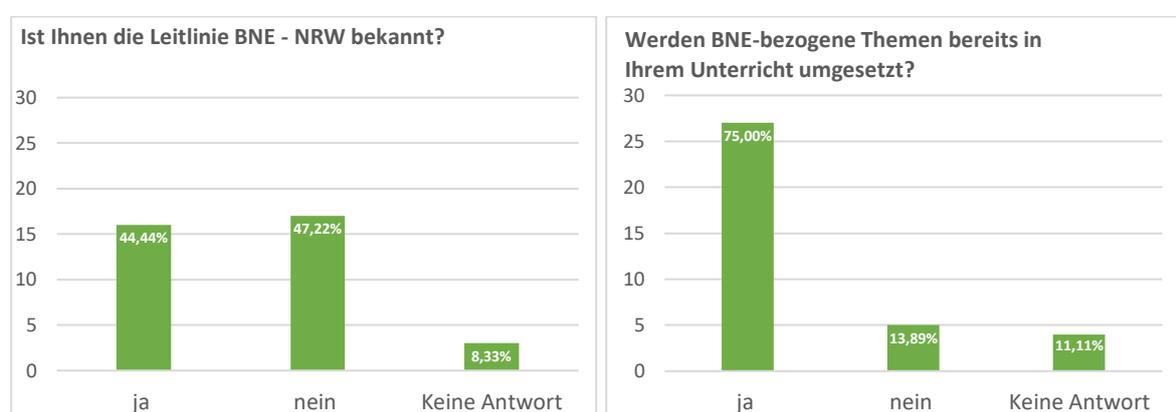


Abb. 15: Antworten der Lehrkräfte zur Leitlinie BNE NRW und Umsetzung BNE-bezogener Themen im Unterricht

Ob Themen im Unterricht bereits durch die Lehrkräfte mit Bezug zu BNE umgesetzt werden, bejahten 75 %. Bei den im Fachunterricht umgesetzten Themen mit BNE-Bezug ließen sich

³⁷⁶ Kiesling, BNE und Chemieunterricht, S. 98.

³⁷⁷ Ebd., S. 99.

³⁷⁸ Ebd., S. 98-99.

die genannten Themen in Gruppen zusammenfassen. Am häufigsten wurden Themen benannt, die sich zu Klimawandel und Klimaschutz zuordnen lassen, gefolgt von Themen zu Ressourcen und Rohstoffe, Abfall und Abfallvermeidung, Energie, Kunststoffe, Naturschutz und Artenschutz sowie Landwirtschaft. Auffällig ist, dass die Nennung dieser Themenbereiche davon abhängt, welche Fächer die jeweiligen Lehrkräfte unterrichten. Naturschutz, Artenschutz und Landwirtschaft wurde nur von Lehrkräften benannt, die Biologie unterrichten. Ressourcen und Rohstoffe sowie Energie wurde überwiegend von Chemielehrkräften angeführt. Themen wie Klimawandel und Klimaschutz sowie Abfall und Abfallvermeidung traten hingegen bei Antworten beider Fachlehrertypen auf.³⁷⁹

Die Förderung von Kompetenzen in den Bereichen Erkennen, Bewerten und Handeln, der Aufbau eines vernetzten fächerübergreifenden Wissens sowie die Betrachtung von Fragestellungen aus verschiedenen Dimensionen wurden nur von einzelnen Lehrkräften mit BNE in Verbindung gesetzt, nicht jedoch von der Breite der Teilnehmenden. Vielfach blieben die Aussagen zu Zielen und Inhalten von BNE daher oberflächlich und wurden mit nachhaltigkeitsbezogenen Themen wie Umwelt- oder Klimaschutz in Verbindung gebracht. Im Hinblick darauf, was BNE ausmacht und welche Themen in diesem Zusammenhang genannt wurden, lässt sich bei MINT-Lehrkräften ein stärkerer Fokus auf ökologische oder ökonomische Perspektiven erkennen. Zwar wurden auch Aspekte wie fächerübergreifendes Lernen benannt, die soziale Perspektive auf Themen des naturwissenschaftlichen Unterrichts oder der Bedeutung dieser für BNE wurde lediglich von einer Lehrkraft erwähnt. Dass jedoch auch andere Dimensionen wie Soziales, Politik und Kultur ebenfalls von Bedeutung sind und eingebunden werden sollen, scheint im naturwissenschaftlichen Unterricht noch nicht vollständig angekommen zu sein.³⁸⁰

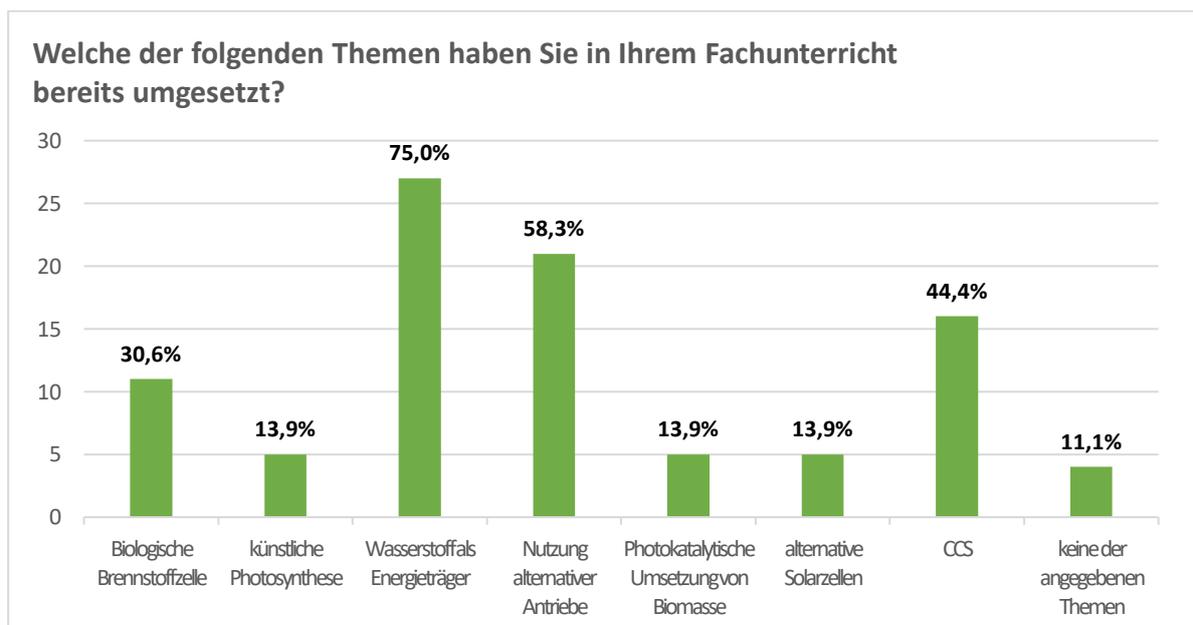


Abb. 16: Angaben zur Umsetzung bestimmter Themen im Fachunterricht

³⁷⁹ Kiesling, BNE und Chemieunterricht, S. 99.

³⁸⁰ Ebd., S. 99-100.

Wird der Blick auf die Themen gerichtet, die den Lehrkräften in dieser Umfrage vorgeschlagen wurden, ist erkennbar, dass besonders solche Themenbereiche angegeben werden, die eine starke Anbindung an die schulischen Curricula besitzen. So gaben drei Viertel der Teilnehmenden an, dass sie „Wasserstoff als Energieträger“ in ihrem Unterricht thematisieren (siehe Abb. 16). Bei der Relevanz ausgewählter Themenbereiche zeigt sich, dass von den Lehrkräften, die eine Einschätzung abgaben, den meisten Themen eine hohe Bedeutung zugeschrieben wurden (siehe Abb. 17). Am deutlichsten fiel die Zustimmung zum Thema „Wasserstoff als Energieträger“ aus, dem 87 % der Teilnehmenden mindestens eine hohe Relevanz zuordneten. Aber auch die „Nutzung alternativer Antriebe“ wurde als bedeutend bzw. sehr bedeutend eingeschätzt.

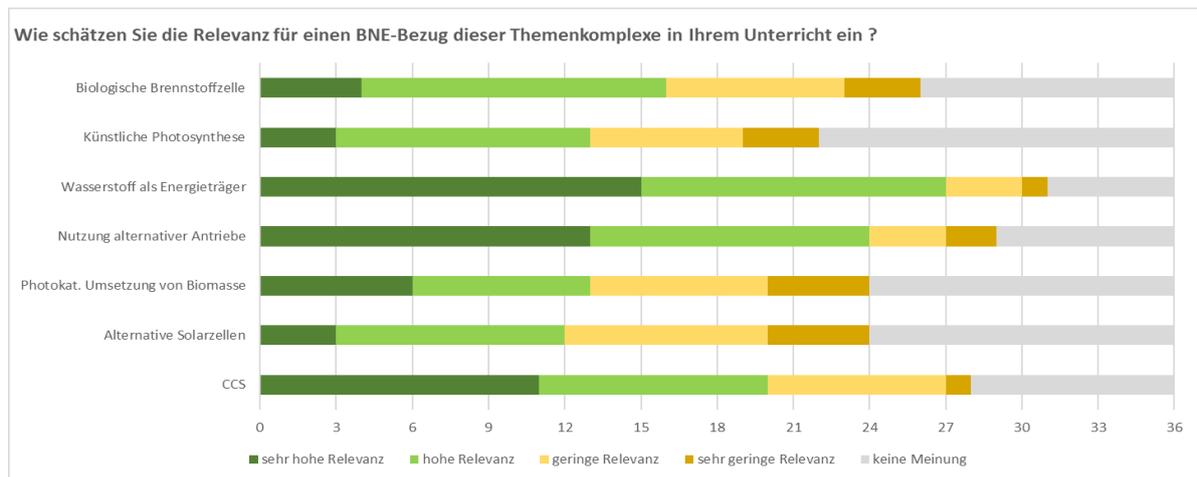


Abb. 17: Einschätzung der Relevanz bestimmter Themenbereiche für den Fachunterricht mit Bezug zu BNE

Im Blick auf diese zwei Fragen wird deutlich sichtbar, dass die von den Lehrkräften umgesetzten Themen im Naturwissenschaftlichen Unterricht mit der Wahrnehmung ihrer Relevanz korrelieren. Themen, die kaum im Unterricht hinzugezogen werden, besitzen für die Lehrkräfte auch eine geringere Relevanz. Es lässt sich aber auch erkennen, dass die teilnehmenden Lehrkräfte in einem hohen Maße den innovativen Themen aus der aktuellen Forschung trotz eines bisher geringeren Einbezugs in den naturwissenschaftlichen Unterricht einen großen Stellenwert für diesen einräumen. Die größte Zustimmung liegt zwar bei Themen, die bereits in Lehrplänen erwähnt werden und somit konkrete Bezüge zu bindenden Vorgaben geben, aber nur wenige Teilnehmer schrieben den angeführten und nicht in den Kernlehrplänen verankerten Themen eine geringe oder sehr geringe Bedeutung zu.

Das Interesse der Lehrkräfte an dem Einbezug innovativer Themen und aktueller Themen des gesellschaftspolitischen Diskurses spiegelt sich in dem Wunsch wider, dass zu den genannten Themen Schülerlaborangebote existieren sollen. Mehr als die Hälfte der Antwortgebenden (55 %) äußerten diesen Wunsch, von denen der überwiegende Teil ein Angebot in einem zeitlichen Umfang von etwa fünf bis sechs Stunden geeignet finden würde (siehe Abb. 18a & 18b).

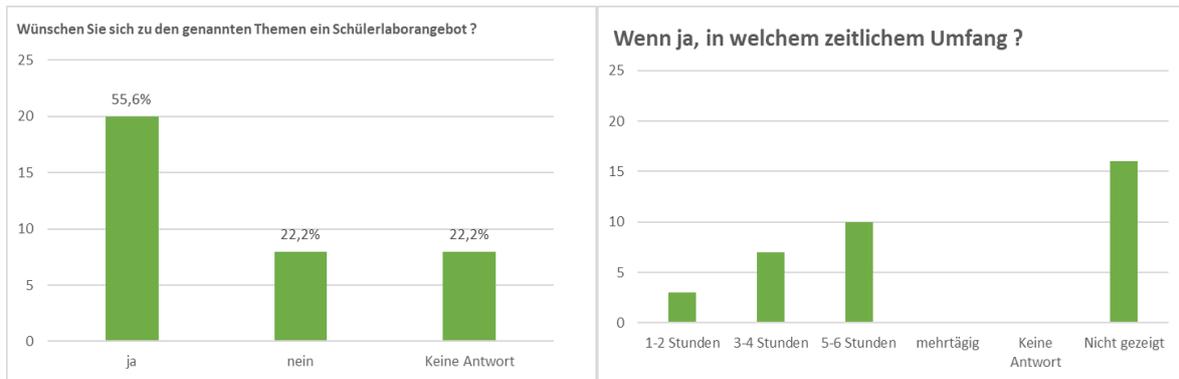


Abb. 18a & 18b: Fragen zum Angebot eines Schülerlabors

Auch die Bereitschaft, an Lehrkräftefortbildungen zu den gewählten Themen teilzunehmen wurde mit 86 % Zustimmung angegeben (siehe Abb. 19). Mehr als die Hälfte der Lehrkräfte nutzte zudem die Option, eine Begründung abzugeben, warum sie an Lehrkräftefortbildungen zu den genannten Themen grundsätzlich teilnehmen würden.

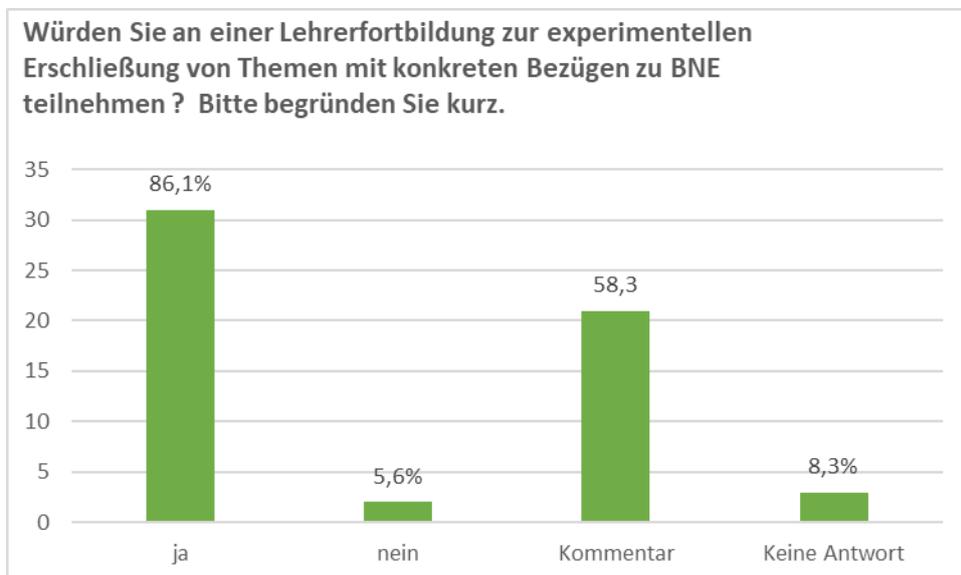


Abb. 19: Meinungsbildung zu Lehrkräftefortbildungen zu den ausgewählten Themen

Neben einem allgemeinen Weiterbildungsinteresse wurde von verschiedenen Teilnehmenden die Aktualität der Themen hervorgehoben. Außerdem benannten mehrere Personen, dass sie dadurch Einbindungsmöglichkeiten in den Unterricht aufgezeigt bekommen wollten. Ein Großteil stellte auch zur Bedingung, dass die Teilnahme an einer Lehrerfortbildung auch daran geknüpft sei, dass die dort dargestellten Inhalte einen konkreten Lehrplanbezug aufweisen und im schulpraktischen Alltag ein- und umsetzbar seien.

5. Photoreformierung: Experimentelle Konzeption

5.1. Anforderungen an praktische Umsetzung von Experimenten in der Schule

Ausgangspunkt der experimentellen Konzeption eines Experiments für den Chemieunterricht, das die Photoreformierung zeigt, bildete die in *Kapitel 3* herangezogene Literatur, in der verschiedene Versuchssettings vorgestellt wurden. Für die Umsetzung im schulischen Kontext und für die Realisierung geeigneter Experimente für den Chemieunterricht müssen jedoch nicht nur die praktisch möglichen Varianten für die Photoreformierung berücksichtigt, sondern auch Anforderungen beachtet werden, die durch Vorgaben an das praktische Arbeiten im Chemieunterricht mit Schülerinnen und Schülern gemacht werden.

Da das Experiment im Chemieunterricht als Teil des Erkenntnisprozesses der Lernenden zuzuordnen ist, kommt ihm eine besondere Rolle bei der Vermittlung der Chemie zu.³⁸¹ Zu grundlegenden Anforderungen an Schulexperimente zählen unter anderem, dass Experimente eine fachliche Richtigkeit aufweisen und das zeigen, was Gegenstand der Erarbeitung ist. Deutliche Effekte sollten erkennbar und eine Durchführung erfolgreich sein. Außerdem sollte das Experiment angemessen für die intendierte Altersstufe sein und an das Vorwissen der Lernenden anknüpfen. Wichtige Aspekte sind zudem, dass das Experiment sicher durchführbar ist, es zeitlich in den Rahmen des Unterrichtsverlaufs eingebunden werden kann und möglichst der Ausstattung und den räumlichen Bedingungen an Schulen gerecht wird.³⁸²

Die benannten Anforderungen sollten auch bei der Konzeption eines Versuchs zur Photoreformierung für den Chemieunterricht berücksichtigt werden. Sie flossen in die Überlegungen zur Gestaltung und zum Aufbau ein. Das entwickelte Experiment sollte die Photoreformierung darstellen und entsprechend als gewünschtes Ergebnis die Entstehung von Wasserstoffgas zeigen. Besonders das Gefährdungspotential sowie der zeitliche Rahmen, die erfolgreiche Durchführbarkeit mit deutlich sichtbaren Effekten und der Gebrauch von Laborgeräten, die in den meisten Chemiesammlungen an Schulen zu finden sind, waren zentrale Punkte, die bei der Entwicklung und der Weiterentwicklung der in *Kapitel 5.4.* und *Kapitel 5.6.* beschriebenen Experimente mitberücksichtigt werden sollten. Konzipiert werden sollte zudem ein Versuch, der für Lernenden der gymnasialen Oberstufen intendiert wurde, da mit ihm intensiver über Hintergründe zur Herstellung von Wasserstoff auf verschiedenen Wegen bewertet werden sollte.

³⁸¹ Bader, Hans Joachim; Lühken, Arnim: *Legitimation des Experiments für den Chemieunterricht*, in: Katrin Sommer, Judith Wambach-Laicher, Peter Pfeifer (Hrsg.) *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*, Seelze: Aulis 2018, S. 461.

³⁸² Bader, Hans Joachim; Lühken, Arnim: *Anforderungen an ein Schulexperiment*, in: Katrin Sommer, Judith Wambach-Laicher, Peter Pfeifer (Hrsg.) *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*, Seelze: Aulis 2018, S. 464-467.

5.2. Vorbereitungen zum Versuch Photoreformierung

Die Durchführung der Versuche zur Photoreformierung sollten mit der Maßgabe geschehen, dass der eingesetzte Photokatalysator möglichst günstig und schulgängig beziehbar bzw. herstellbar ist. Ein leicht zu beziehender Stoff ist Titandioxid, das wie bereits in *Kapitel 3.4.1.* erläutert als Photokatalysator in der Photoreformierung organischer Substrate häufig Verwendung findet. Da mit Edelmetall beladene Titandioxid-Photokatalysatoren nicht im Handel zu erwerben sind, wurde der Photokatalysator im Labor hergestellt. Die Herstellung orientierte sich an einer für den Schulbereich geeigneten Modifikation,³⁸³ in der der Photokatalysator photochemisch hergestellt wird.^{384, 385} In Anlehnung an diese Versuchsvorschrift wurde eine Durchführung entwickelt, die im Folgenden näher dargestellt ist.

5.3. Herstellung des Photokatalysators

Der für alle Versuchsreihen verwendete Photokatalysator auf Basis von Titandioxid wurde nach der gleichen Versuchsvorschrift hergestellt. Grundsätzlich bestehen zum einen nasschemische und photochemische Herstellungswege für mit Edelmetall beladene Photokatalysatoren.³⁸⁶ Herangezogen wurde ein photochemischer Weg, bei dem zunächst 1 g Titandioxid (P25) in etwa 70 mL Wasser suspendiert wurde. Mithilfe einer Osram Ultravitalux-Lampe (300 W) wurde diese für fünf Minuten bestrahlt. Dann wurden 150 µL einer w = 8 %igen Hexachloroplatinsäure-Lösung ($c = 1,54 \text{ mol/L}$) hinzugefügt und direkt im Anschluss 150 µL einer Triethanolamin-Lösung ($c = 1,5 \text{ mol/L}$) zugegeben. Die Suspension wurde dann für weitere fünf Minuten bestrahlt, bevor die Lampe entfernt wurde. Anschließend wurde die Suspension filtriert, der Rückstand gewaschen und getrocknet. Der Feststoff wurde dann zu einem Pulver zerrieben, das für die Versuche zu Photoreformierung fertig einsatzbereit war.

Erkennbar war nach der Bestrahlung, dass die zu Beginn rein weiße Suspension von Titandioxid bis zum Hinzufügen der Hexachloroplatinsäure-Lösung keine Farbveränderung aufwies. Nach den zweiten fünf Minuten war jedoch eine Graufärbung der Suspension zu beobachten. Auch der getrocknete Feststoff und das Pulver besaßen eine leicht graue Farbe, die bei allen neu hergestellten Photokatalysatorenproben wiederholt in gleicher Weise auftrat (siehe Abb. 20).

³⁸³ Kremer, Photokatalytische Wasserstoffherstellung, S. 116-117.

³⁸⁴ Bae, Eunyong; Choi, Wonyong; Park, Jaiwook; Shin, Hyeon Suk; Kim, Seung Bin; Lee, Jae Sung: *Effects of Surface Anchoring Groups (Carboxylate vs Phosphonate) in Ruthenium-Complex-Sensitized TiO₂ on Visible Light Reactivity in Aqueous Suspensions*, in: The Journal of Physical Chemistry B 108 (37), 2004, S. 14093-14101.

³⁸⁵ Chen, Shen-Ming; Lu, Norman; Chen, Jun-Yu; Yang, Cheng-Yu; Yeh, Yun-Peng; Feng, Tsung-Yao; Shih, Yang-hsin; Kokulnathan, Thangavelu; Chen, Dong: *Enhanced photocatalytic degradation of atrazine by platinumized titanium dioxide under 352 nm irradiation*, in: Water Science and Technology 75 (5), 2017, S. 1128-1137.

³⁸⁶ Skillen et al., Photocatalytic Reforming of Biomass, S. 12.



Abb. 20: Titandioxidsuspension vor der Bestrahlung (links) und nach der Zugabe von Reagenzien und einer Bestrahlungszeit von 10 Minuten (rechts)

Zur Untersuchung des Photokatalysators wurden zudem REM-Aufnahmen gemacht, die Einblick in die Beschaffenheit des Photokatalysator-Pulvers geben können (siehe Abb. 21a & 21b). Deutlich erkennbar ist die nanoskalierte Oberflächenstruktur der Agglomerate (siehe Abb. 21a). Wie bereits in Kapitel 3.4.1. dargestellt, ist die poröse und große Oberfläche des Photokatalysators eine entscheidende Voraussetzung für eine effektive Umsetzung von organischen Substraten während der Photoreformierung. Abbildung 21b zeigt den Photokatalysator nach dem Einsatz in Versuchen zur Photoreformierung. Der nach der Photoreformierung abfiltrierte Photokatalysator wurde gewaschen, getrocknet und anschließend in einer Brennerflamme ausgeglüht, um mögliche Spuren organischer Substrate zu beseitigen. Die Oberflächenstruktur des Photokatalysators ist hierbei recht ähnlich zu der der frisch hergestellten Variante (siehe Abb. 21a). Der Einsatz dieses bereits verwendeten und erneut eingesetzten Photokatalysators ist in Kapitel 4.8.8. dargestellt.

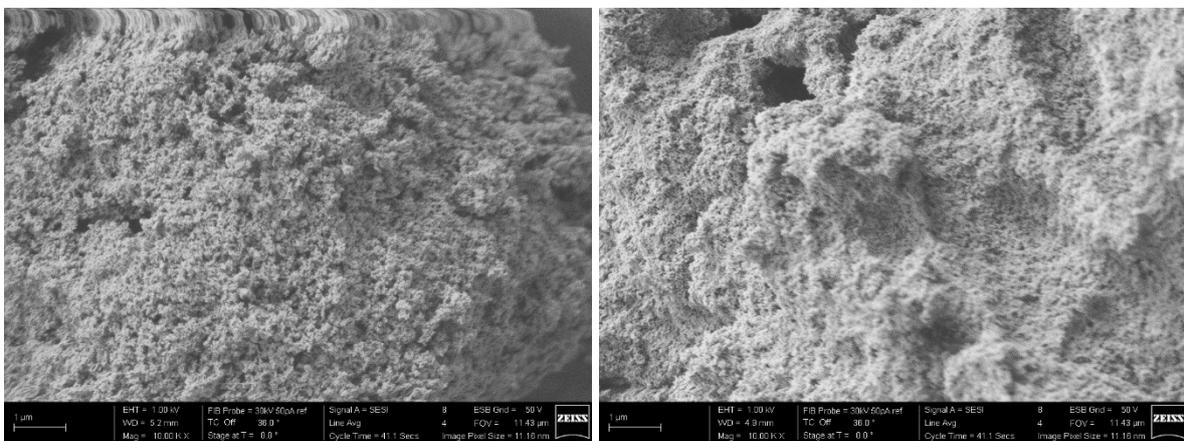


Abb. 21a & 21b: REM-Aufnahmen des hergestellten Pt/TiO₂-Photokatalysators. a (links): Pt/TiO₂-Photokatalysator nach der Herstellung. b (rechts): Pt/TiO₂-Photokatalysator nach der Photoreformierung (Skalierung entspricht 1 µm)

5.4. Versuchskonzept 1: Schott-Glas (Großer Aufbau)

Zunächst stand im Vordergrund die Entwicklung eines Versuchsaufbaus, mit dem die Photoreformierung mithilfe gängiger Labormaterialien umgesetzt werden konnte. Die Konzeption des Versuchsaufbaus orientierte sich an vorhandenen in der Chemiedidaktik genutzten Aufbauten von Photoreaktoren.³⁸⁷ Daneben war die Lichtquelle von zentraler Bedeutung. Sie sollte möglichst einfach erhältlich sein, um eine Umsetzung in einem schulischen Kontext zu ermöglichen. Daher fiel hier die Wahl zu Beginn auf die in verschiedenen publizierten Versuchen zur Photochemie in chemiedidaktischen Kontexten genutzte Ultravitalux-Lampe von Osram.^{388, 389} Die Aufbau wurde während der Erprobungen abgewandelt, um auch Unterschiede aufzuzeigen zwischen einem mit Platin belegten Titandioxid-Photokatalysator und einem Titandioxid-Photokatalysator. Um die Ergebnisse von Kawai und Sakata nachzuvollziehen, wurde zunächst mit Glucose-Lösungen als Substrat-Lösungen gearbeitet.

5.4.1. Materialien³⁹⁰

800 mL Becherglas (hohe Form), 400 mL Becherglas, 250 mL Schott-Glas mit Gewinde und offenem Deckel mit Dichtung, Thermometer, 2 x Rührfisch, 2 x Heizplatte, durchbohrter Stopfen, Zweiwegehahn (Medizintechnik), Verbinder (Medizintechnik), 2 x 20 mL Spritze, 10 mL-Spritze, Kanüle, Ultravitalux-Lampe, Stativmaterial (Klemmen, Muffen), Ultraschallbad, Petrischale

5.4.2. Versuchsdurchführung³⁹¹

70 mg des TiO₂/Pt-Katalysators werden abgewogen und in ein 250- mL Schott-Glas gegeben. Auf einer Heizplatte werden etwa 500 mL destilliertes Wasser in einem 800 mL Becherglas (hohe Form) auf mindestens 60 °C erhitzt (*siehe Abb. 22a*) Auf einer zweiten Heizplatte werden zeitgleich 300 mL einer Glucose-Lösungen (50 g/L) auf 60 °C erhitzt (*siehe Abb. 22a rechts*). Sobald die Glucose-Lösung die Zieltemperatur erreicht hat, werden etwa 50 mL der Lösung in das Schott-Glas gefüllt. Unter Schwenken wird der Katalysator in der Lösung gleichmäßig verteilt, sodass eine weißlich-trübe Suspension entsteht. Zu einer besseren Verteilung des Katalysators kann das Schott-Glas für drei Minuten in ein Ultraschallbad gestellt werden. Anschließend wird so viel der verbliebenen Glucose-Lösung bis zum unteren Rand des Gewindes am Flaschenhals des Schott-Glases gefüllt (Dies entspricht etwa

³⁸⁷ Im Schülerlabor *Chemie-Labothek* der Bergischen Universität Wuppertal existiert das Kursangebot „*Photochemie - Licht in unserer Umgebung*“. Innerhalb dessen wird unter anderem ein Versuch zum photochemischen Abbau von Blattpigmenten durchgeführt, bei dem ein Photoreaktor genutzt wird.

³⁸⁸ Ibanez, Jorge G.; Tausch, Michael W.; Bohrmann-Linde, Claudia; Fernandez-Gallardo, Isabel; Robles-Leyzaola, Aino; Krees, Simone; Meuter, Nico; Tennior, Mathias: *The Basis for Photocatalytic Writing*, in: *Journal of Chemical Education* 88 (8), S. 1116-1118.

³⁸⁹ Zeller, Didaktische Erschließung von Titandioxid für den Chemieunterricht, S. 92-95.

³⁹⁰ Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Photoreforming of Biomass - Producing Hydrogen from Sugar*, in: *World Journal of Chemical Education*. 9(4), 2021, S. 132.

³⁹¹ Ebd.

290 mL) (siehe Abb. 22b). Nachdem ein Rührfisch hinzugegeben wurde, wird das Schott-Glas mit einem durchbohrten Stopfen, in den ein Verbinder gesteckt wurde, sowie mit einer Dichtung und einem Deckel verschlossen (siehe Abb. 22c). Der Aufbau wird nun in das Wasserbad über einer Magnetrührplatte gestellt (siehe Abb. 22d). Der Spritzen-Kolben einer 20-mL Spritze mit aufgesetztem Zweiwegehahn wird nach oben zeigend über die Öffnung des Stopfens festgeklammert (siehe Abb. 22d). Das untere Ende des Spritzenkolbens soll dabei ins Wasserbad ragen. Mit einer beliebigen Spritze wird das Wasser bis zum Zweiwegehahn aufgezogen (siehe Abb. 22e). Nach Schließen des Zweiwegehahns wird eine 10-mL Spritze aufgesetzt. Die vor das Becherglas positionierte Ultravitalux-Lampe und die Magnetrührplatte werden eingeschaltet. Die Bestrahlung der Suspension erfolgt für mindestens 30 Minuten (siehe Abb. 22f).

Nach 30 Minuten wird der Zweiwegehahn geöffnet, das entstandene Gas vollständig in die 10 mL-Spritze aufgezogen und der Zweiwegehahn wieder geschlossen. Die 10-mL Spritze wird abgenommen und mit einer Kanüle verbunden. Hierüber wird die Hälfte des in der Spritze befindlichen Gasvolumens an Sauerstoffgas hinzugefügt. In eine mit Seifenlösung gefüllte Petrischale werden nun etwa 0,5 mL große Gasblasen des Gasmischs eingespritzt und mit einem Feuerzeug gezündet.

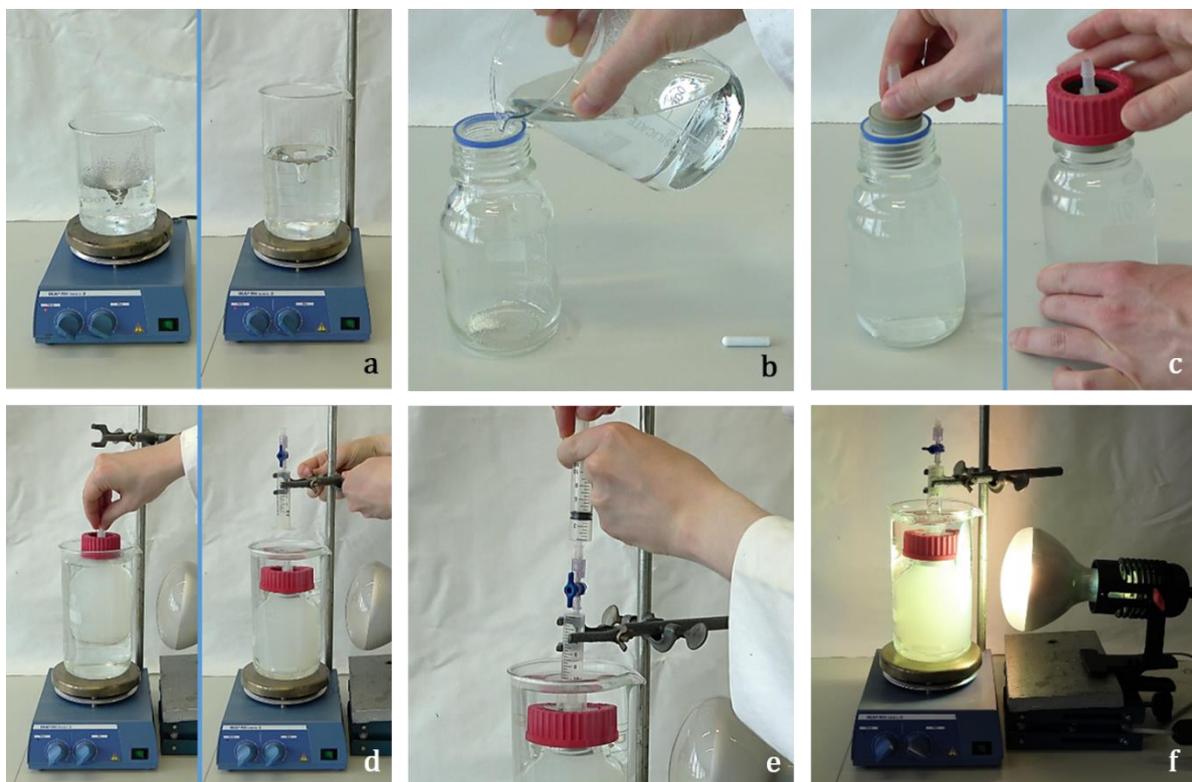


Abb. 22: Grundlegende Versuchsschritte (a-f) bei der Durchführung der Photoreformierung³⁹²

³⁹² Venzlaff/Bohrmann-Linde, Photoreforming of Biomass, S. 133.

5.4.3. Ergebnisse

Das Experiment zur Photoreformierung in dem dargestellten Aufbau wurde einerseits mit unterschiedlichen Substraten (Glucose, Methanol, Ethanol, Stärke) und andererseits mit zwei Varianten von Photokatalysatoren durchgeführt (TiO₂, Pt/TiO₂). Bei dem zuletzt genannten Varianten wurden Glucose-Lösungen (100 g/L) genutzt. Zur weiteren Analyse der Gasproben wurden diese mit einem Gaschromatographen³⁹³ untersucht.

5.4.4. Versuchserprobungen mit Glucose

Gegenstand erster Untersuchungen zur Photoreformierung unterschiedlicher Substrate war Glucose. Glucose, die für die ersten Forschungen zur Photoreformierung herangezogen wurde, wurde gewählt, da sie als Produkt der Photosynthese von allen Pflanzen gebildet wird und somit als ein nachwachsender Rohstoff angesehen werden kann. Die vollständige Reaktion der Photoreformierung von Glucose wurde schon von Kawai und Sakata als Gegenstück zur Reaktion der Photosynthese angesehen (*siehe Kap. 3.2.2.*).

Im beschriebenen Versuchsaufbau (*siehe Kap. 5.4.2.*) wurden verschiedene Glucose-Lösungen mit unterschiedlichen Mengenanteilen (100 g/L, 50 g/L, 2 g/L) verwendet. Zwei Glucose-Lösungen (50 g/L, 2 g/L) wurden jeweils für vier Stunden bestrahlt. Die Gasmengen wurden stündlich notiert. Sie sind in *Tabelle 6* aufgeführt. Das erhaltene Gas wurde gaschromatographisch untersucht. Eine weitere Glucose-Lösung (100 g/L) wurde über einen Zeitraum von sechs Stunden bestrahlt, wobei anders als bei den ersten beiden Lösungen in kürzeren Zeitabständen das Gasvolumen abgelesen wurde. Die Gasentwicklung ist in *Abbildung 23* dargestellt.

Glucose-Lösung, 50 g/L:

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	Ø V [mL]
1	7,5	9	9,5	8,7
2	12,5	14,5	15,5	14,2
3	16,5	19,5	20	18,7
4	20,5	24	25,5	23,3

Glucose-Lösung, 2 g/L:

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	Ø V [mL]
1	5	5	5,5	5,2
2	8	9	9	8,7
3	11,5	12,5	13	12,3
4	14	15,5	17,5	15,7

Tab. 6: Gasentwicklung bei der Bestrahlung verschiedener Glucose-Lösungen

³⁹³ Genutzt wurde ein Low-cost Gaschromatographen GC15 (AK Kappenberg), als Säule die Standard-Säule (Belegung: Siliconöl OV101 (20%), Träger: Chromosorb WHSP 80-100 msh, Länge: 1,20 m). Anwendungsgebiete dieser Säule sind anorganische und organische Gase. Als Trägergas wurde Stickstoff verwendet.

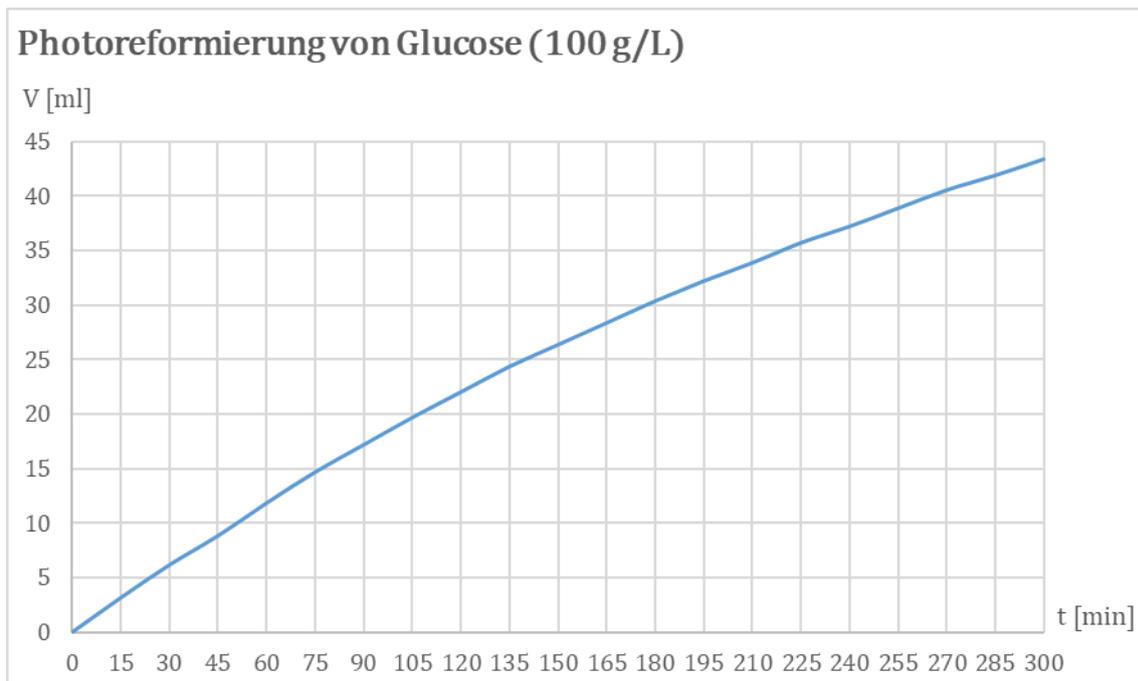


Abb. 23: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L). Gaschromatographisch wurden die Proben nach 10 mL, 20 mL und 30 mL untersucht.

Die Untersuchungen mit dem Gaschromatographen ergaben in allen Fällen, dass der Anteil an Wasserstoff in den entnommenen Gasproben zwischen 62,1 % und 91,6 % lag (*siehe digitaler Anhang*). Auffällig bei den Untersuchungen zur Photoreformierung von Glucose (100 g/L) ist, dass der Anteil an Wasserstoff bei der ersten entnommenen Probe (10 mL) nach etwa 50 Minuten deutlich geringer ist als bei den darauffolgend untersuchten Gasproben, die jeweils auch nach der Bildung von 10 mL untersucht wurden (85,7 %, 91,6 %). Die zuerst entnommene Gasprobe weist vermutlich dadurch einen höheren Anteil anderer Gase auf, da einerseits trotz des Abkochens der Substratlösung noch Restgase gelöst vorliegen und andererseits die Übergänge zwischen dem Schottglas, des darüber positionierten Spritzenkolbens und der Verbindungsstücke größere Totvolumen beinhalten, in denen noch Umgebungsluft vorliegt. Diese kann sich einerseits durch die erhöhten Temperaturen etwas ausdehnen und so im Spritzenkolben aufgefangen werden und andererseits die Konzentration des Wasserstoffgases verringern. Erkennbar ist zudem in diesem Versuchsaufbau, dass mit zunehmendem Masseanteil an Glucose in den Lösungen die Ausbeuten an Wasserstoff steigen. Dieser Befund konnte bei Untersuchungen zur Photoreformierung von Ethanol nicht gemacht werden (*siehe Kap. 5.6.5.*).

Die Durchführung einer Knallgasprobe lieferte beim Zünden der in einer Seifenlösung geformten Gasblasen einen deutlichen Knall. Der erhaltene Wasserstoff bei der Photoreformierung von Glucose konnte zudem dazu verwendet werden, um eine Brennstoffzellenmodellfahrzeug³⁹⁴ anzutreiben. Damit konnte ergänzend zu den Untersuchungen mit dem Gaschromatographen und der Durchführung der Knallgasprobe gezeigt werden, dass das gebildete Gas zu einem hohen Anteil aus Wasserstoff besteht.

³⁹⁴ Bei dem verwendeten Modellfahrzeug handelte es sich um ein *Horizon FCJJ-23 H-Racer 2.0 Alternative Energien Brennstoffzellen-Auto* des Unternehmens Horizon Fuel Cell Technologies.

Zur Untersuchung des Abbaus von Glucose während der Photoreformierung wurde neben den zwei Glucose-Lösungen mit 100 g/L und 50 g/L auch eine Glucose-Lösung mit einem Anteil von 2 g/L gewählt. Dieser Massenanteil ergab sich daraus, dass nach der Bestrahlungszeit Glucose-Teststreifen³⁹⁵ genutzt wurden, um einen möglichen Abbau der Glucose qualitativ nachzuvollziehen. Die gewählten Teststreifen lassen bis zu einem Masseanteil von 2 g/L anhand des Abgleichs mit einer Farbskala eine Aussage zu, zu welchem Anteil Glucose in der Lösung vorliegt. Nach vier Stunden Bestrahlungszeit wurde die Suspension untersucht. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 24* festgehalten. Zu erkennen sind allenfalls Nuancen an Unterschieden. Der Test wurde mehrfach wiederholt. Ein eindeutiger Farbunterschied zwischen beiden Teststreifen konnte jedoch bei keiner Probe erzielt werden. Der Abbau von Glucose während der Photoreformierung kann somit in dem gegebenen Zeitrahmen nicht in diesem Umfang erfolgen, dass der Massenanteil deutlich abnimmt und durch Methoden wie den Einsatz von Glucose-Teststreifen nachgewiesen werden kann.

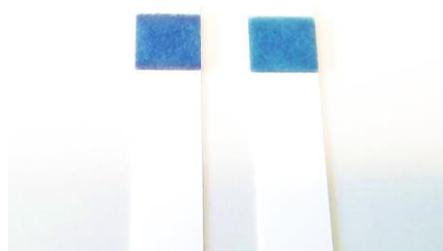


Abb. 24: Glucose-Teststreifen. Links: Test der Lösung vor Versuchsbeginn. Rechts: Test nach beendetem Versuch

5.4.5. Versuchserprobungen mit Alkoholen

Im Anschluss an die Versuchsreihen, bei denen Glucose im Zentrum der Untersuchungen stand, wurden auch Alkohole getestet. Ausgewählt wurden Methanol und Ethanol als einfachste Vertreter dieser Stoffklasse. Ausgewählt wurde zunächst eine Ethanol-Lösung (10 Vol. %; $c = 1,71 \text{ mol/L}$). Die Bildungsraten des Gases während der Bestrahlung sind in *Tabelle 7* dargestellt. Sie zeigen, dass bei dreimal höheren Konzentrationen der Lösungen im Vergleich zu den in *Kapitel 5.4.4.* vorgestellten Glucose-Lösungen in einem gleichen Zeitraum wesentlich mehr Gas entwickelt wurde. Noch deutlicher erweist sich der Unterschied zwischen einer Ethanol- und einer Methanol-Lösung gleicher Konzentrationen. Hierbei liefert die Photoreformierung von Methanol die höheren Ausbeuten an Gas im gleichen Zeitraum (*siehe Tab. 8*).

³⁹⁵ Genutzt wurden QUANTOFIX Glucose-Teststreifen der Marke Macherey-Nagel, die in einem Bereich von 0-2000 mg/L Glucose funktionieren.

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	Ø V [mL]
1	20	23,5	21	21,5
2	39,5	42,5	41	41

Tab. 7: Gasentwicklung bei der Bestrahlung einer Ethanol-Lösung (10 Vol. %; c = 1,71 mol/L)

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	Ø V [mL]
1	22	26,5	28	25,5
2	43	50,5	54,5	49,3

Tab. 8: Gasentwicklung bei der Bestrahlung einer Methanol-Lösung (6,9 Vol. %; c = 1,71 mol/L)

Bei der Untersuchung der Gasproben, die am Ende des Zeitraums gemacht wurden, konnte festgestellt werden, dass die Anteile an Wasserstoffgas in der Gasprobe der Photoreformierung von Ethanol durchschnittlich nach 120 Minuten bei 87,8 % lag (Methanol: 88,7 %). Alkohole konnten somit ohne Weiteres zur Photoreformierung herangezogen werden und lieferten dabei in kürzerer Zeit höhere Gasausbeuten. Dieser Fakt wurde auch bei der Entwicklung bzw. Erprobung des zweiten Versuchsaufbaus berücksichtigt, bei dem Ethanol im Fokus verschiedener Messreihen und Untersuchungen stand (siehe Kap. 5.6.).

5.4.6. Versuchserprobungen mit Wasser

Erprobt wurde im Rahmen dieses Aufbaus auch die photokatalytische Umsetzung von Wasser in Form der Water-Splittings. Dazu wurde das 250 mL Schottglas vollständig mit Wasser gefüllt (entsprach 287 mL) und 70 mg des Pt/TiO₂-Photokatalysators hinzugegeben. Die Lösung wurde vor Versuchsbeginn mit Stickstoff gespült. Nach drei Minuten im Ultraschallbad wurde der Aufbau wie in Kapitel 5.4.2. beschrieben vervollständigt und bestrahlt. Die Temperatur des Wasserbades betrug bei allen drei Ansätzen 60-61 °C. Die Bestrahlung wurde über einen Zeitraum von vier Stunden durchgeführt. Die zu beobachtende Gasentwicklung ist in Tabelle 9 aufgeführt.

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	Ø V [mL]
2	5	6	5	5,3
4	10,5	12	11	11,2

Tab. 9: Gasentwicklung bei der Bestrahlung von Wasser

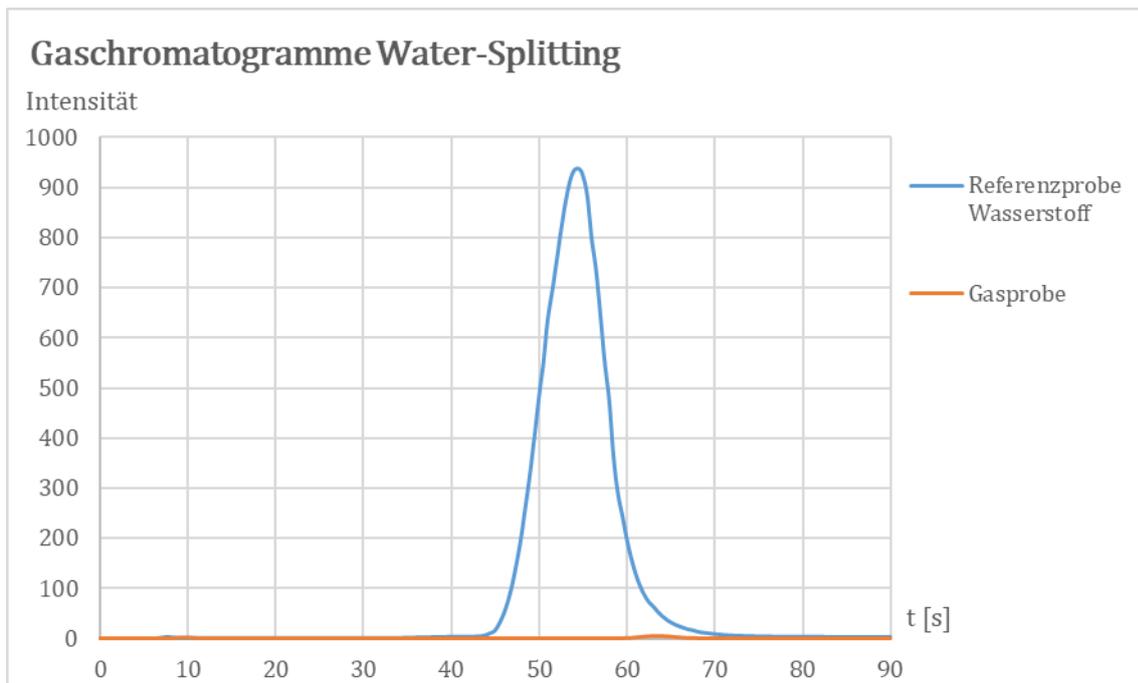


Abb. 25: Gaschromatogramm der Gasprobe aus dem 2. Ansatz

Die gaschromatographischen Untersuchungen der ersten beiden Ansätze ergaben, dass im Vergleich zur Referenzprobe mit Wasserstoff keine Indizien für die Anwesenheit von Wasserstoff in der Probe vorlagen (siehe Abb. 25). Der sehr niedrige Peak bei der Gasprobe liegt noch knapp innerhalb der Peakfläche der Referenzprobe. Ein möglicher berechenbarer Anteil an Wasserstoffgas in der Gasprobe läge bei unter 1 %. Das aufgefangene Gas muss auf den in der Lösung befindlichen Stickstoff zurückgeführt werden, der vermutlich bei höheren Temperaturen von etwa 60 °C aus der Lösung ausgetrieben wurde. Das Water-Splitting wie es von Honda und Fujishima durchgeführt wurde, konnte mit dem gewählten Aufbau so nicht nachvollzogen werden. Es ist anzunehmen, dass trotz leicht erhöhter Temperaturen, bei denen der Versuch durchgeführt wurde, die Oxidationsreaktion der Wasserspaltung thermodynamisch so stark eingeschränkt ist, dass kein Wasserstoffgas (und auch kein Sauerstoffgas) gebildet werden kann.

5.4.7. Versuchserprobungen mit Stärke und Cellulose

Neben Glucose, Methanol und Ethanol wurde auch Stärke in diesem Versuchsaufbau erprobt. Grundlage der eingesetzten Substrat-Lösung bildete wasserlösliche Stärke. Die Stärke-Lösung wurde dazu kurz bis zum Sieden erhitzt, um sie zu lösen. Der Mengenanteil betrug 10 g/L. Im Anschluss wurde diese Lösung für die Photoreformierung genutzt. Die Bestrahlung erfolgte über vier Stunden. Die während dieser Zeit erhaltenen Mengen an Gas sind in *Tabelle 10* aufgeführt. Durchschnittlich konnten nach dieser Bestrahlungszeit knapp 11 mL an Gas aufgefangen werden, deren Anteil an Wasserstoff etwa bei 67,2 % lag. Die Photoreformierung von Stärke liefert jedoch im Vergleich zur Photoreformierung von Glucose bei gleichen Masseanteilen jedoch insgesamt geringere Ausbeuten an Wasserstoff in einem ähnlichen Zeitraum.

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	∅ V [mL]
2	6,5	6,5	6	6,3
4	10,5	11,5	10	10,7

Tab. 10: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Stärke (10 g/L)

Auch Cellulose wurde als Substrat für die Photoreformierung in diesem Experiment ausgewählt. Genutzt wurde hierbei mikrokristalline Cellulose, die unbehandelt eingesetzt wurde (10 g/L). Der Versuchsaufbau blieb unverändert. Die Bestrahlung der Suspensionen erfolgte über acht Stunden hinweg. Die während dieser Zeit entwickelten Gasmengen sind in *Tabelle 11* dargestellt. Sie zeigen, dass Gas aufgefangen werden konnte. Allerdings ließen sich bei der gaschromatographischen Untersuchung im Anschluss keine Anteile an Wasserstoff nachweisen. Das aufgefangene Gas ist daher vermutlich wie auch beim Versuch zum Water-Splitting (*siehe Kap. 5.4.6.*) auf noch gelöste Gase der Umgebungsluft zurückgeführt werden.

t [h]	V [mL] 1. Ansatz	V [mL] 2. Ansatz	V [mL] 3. Ansatz	∅ V [mL]
2	5	6,5	7	6,2
4	7,5	9,5	9,5	8,8

Tab. 11: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Cellulose (10 g/L)

5.4.8. Variation des Photokatalysators

Zur Untersuchung, inwieweit die Beladung mit Platin auf Titandioxid im Vergleich zu reinem Titandioxid als Photokatalysator einen Einfluss auf die Bildungsraten von Wasserstoff nimmt, wurde neben dem Pt/TiO₂-Photokatalysator auch Titandioxid als Photokatalysator im Versuch eingesetzt. Der Versuchsaufbau und die Durchführung blieben ansonsten unverändert. Als Substrat wurde eine Glucose-Lösung (100 g/L) gewählt.

Beim Einsatz von Titandioxid als Photokatalysator zeigte sich während der Bestrahlung im direkten Vergleich beider Photokatalysatoren, dass zuerst bei dem Ansatz mit dem Pt/TiO₂-Photokatalysator eine Gasentwicklung zu beobachten war. Nach ca. 60 Minuten waren durchschnittlich 6,3 mL Gas aufgefangen worden. Die Bestrahlung wurde über einen Zeitraum von vier Stunden durchgeführt. Innerhalb dieses Zeitraums war bei dem Ansatz mit dem TiO₂-Photokatalysator keine weitere Gasentwicklung zu beobachten. Das entstandene Gas kann somit wie beim Water-Splitting auf das anfängliche Auffangen von Restgasen im Versuchsaufbau zurückgeführt werden.

Die Bedeutung eines Co-Katalysators auf einem Photokatalysator konnte an dieser Stelle sehr deutlich gezeigt werden. Erst die Belegung mit Platin bewirkt, dass unter den gegebenen Versuchsbedingungen eine Gasentwicklung zu beobachten war. Die Rolle des Co-Katalysators als Mittel, Ladungsträger besser zu trennen und Rekombinationen zu verhindern, fördert bzw. ermöglicht erst die Entwicklung von Wasserstoff. Nur mit einem platinieren Titandioxid-Photokatalysator wird im vorgestellten Aufbau eine Photoreformierung ermöglicht.

5.4.9. Diskussion

Insgesamt konnten die Versuchsergebnisse zeigen, dass das experimentelle Prozedere mit einfachen Laborgeräten zwar grundsätzlich in der Umsetzung erfolgreich war und dass Wasserstoff in einem größeren Umfang entwickelt werden konnte. Allerdings war dies jedoch mit vielen Entwicklungsschritten bei der Durchführung verbunden, die in verschiedenen leichten Variationen des Aufbaus mündeten. Hinzu kam, dass das pneumatische Auffangen des Wasserstoffgases mittels eines Spritzenkolbens einige Schwierigkeiten barg, die berücksichtigt werden mussten. Es wurden hierbei auch einige Variationen beim Auffangen des entstehenden Gases durchgeführt, in der Art, dass das Gas einerseits direkt in einem Spritzenkolben aufgefangen wurde und andererseits ebenfalls pneumatisch mittels eines mit Wasser gefüllten, klaren Schlauchs in einem Reagenzglas aufgefangen wurde. Letztere Variante wurde jedoch schnell verworfen, da selbst ein flexibler Schlauch zu leicht aus dem Reagenzglas wieder herausrutschen kann. Zwar ist im Schlauch visuell die Verdrängung des Wassers gut wahrzunehmen, allerdings beinhaltet ein längerer Schlauch ein zu großes Totvolumen an Gas, das nicht mehr für weitere experimentelle Zwecke verwendet werden kann.

Die Vorteile des dargestellten Aufbaus liegen darin, dass die gewählten Materialien als schulgängig angesehen werden können. Des Weiteren bringt die eingesetzte Lichtquelle den Nebeneffekt mit, dass die abgestrahlte Wärme während der Betriebszeit das Wasserbad auf einer Temperatur von 60-66 °C hält. Dadurch konnte die Photoreformierung bei optimalen Temperaturen für die Prozesse durchgeführt werden.

Als nachteilig bei diesem Aufbau erweisen sich verschiedenen Aspekte. Die gaschromatographischen Untersuchungen während des Verlaufs der Reaktion zeigten, dass die Anteile an Wasserstoffgas erst mit weiteren Probeentnahmen anstiegen. Überwiegend lagen die Anteile an Wasserstoff in den Gasproben bei 60-90 %. Diese Werte können vor allem auf das recht große Totvolumen innerhalb des Schottglases zurückgeführt werden. Durch den Aufsatz eines leicht konischen Stopfens gelingt es nicht, das Schottglas ohne eine Luftblase unterhalb des Stopfens zu verschließen. Des Weiteren stehen bedingt durch das pneumatische Auffangen des entwickelten Gases im Spritzenkolben das Wasserbad mit der Suspension im Schottglas im Austausch. Auch wenn dieser Austausch über den durchbohrten Stopfen vergleichsweise gering ist, sind sowohl Verdünnungseffekte anzunehmen als auch die Möglichkeit, dass der Photokatalysator in das Wasserbad übergeht. Als weitere Schwachstelle erweist sich der Aufsatz mit dem Spritzenkolben. In ihn wird über einen Zweiwegehahn und eine aufgesetzte Spritze zunächst das Wasser im aufgesetzten Spritzenkolben hochgezogen. Allerdings birgt das die Gefahr, dass selbst bei den kleinsten Undichtigkeiten, das Wasser aus dem Spritzenkolben wieder absinkt und ein Luftraum gefüllt mit Umgebungsluft entsteht. Potentiell aufgefangenes Wasserstoffgas würde dadurch stark verdünnt. Eine Knallgasprobe könnte nicht mehr erfolgreich durchgeführt werden. Ein weiterer Punkt ist die Temperatur des Wasserbades. Durch das konstant durch die Ultravitalux-Lampe aufgewärmte Wasserbad verdunstet während einer mehrstündigen Bestrahlungszeit ein erheblicher Teil des Wassers, der nachgefüllt werden muss, auch um zu verhindern, dass der Flüssigkeitsspiegel so stark absinkt, dass auch das Wasser aus dem aufgesetzten Spritzenkolben wieder herausläuft.

Auch der Einsatz der Ultravitalux-Lampe geht mit dem Problem einher, dass keine gezielte Bestrahlung der Suspension erfolgt. Ein Großteil der Strahlung geht in einem flächenmäßig großen Bereich an dem Aufbau vorbei. Die zwar preiswerte Lichtquelle scheint nur noch bedingt geeignet.³⁹⁶

Im Ausblick auf die Eignung im schulischen Kontext und die Anforderungen, die an ein Schulexperiment gestellt werden, ergeben sich eine Vielzahl an Herausforderungen, die mit dem vorgestellten Aufbau einhergehen. Unabdingbar zum Schutz der Schülerinnen und Schüler ist das Tragen von UV-Schutzbrillen, da die Ultravitalux-Lampe nicht nur den Versuchsaufbau, sondern auch die unmittelbare Umgebung stark beleuchtet. Des Weiteren sind die aufgefangenen Gasmengen bei dem Einsatz von Ethanol und Methanol in einer kürzeren Zeit zwar deutlich höher als bei Glucose, allerdings wäre eine Bestrahlung in der Zeit einer 90-minütigen Schulstunden nicht ausreichend, um größere Mengen an Gas zu gewinnen, mit denen eine Knallgasprobe oder einer gaschromatographische Untersuchung möglich wären. Auch der Aufbau des Experiments erfordert viele Einzelschritte, deren Abfolge genau beachtet werden muss. Besonders das Schließen des Zwei-Wege-Hahns ist entscheidend. Andernfalls könnte das Wasser aus dem Spritzenkolben wieder herausfließen, wodurch mögliches, aufgefangenes Gas entweicht. Nichtsdestoweniger ist mit diesem Aufbau mit relativ einfachen Materialien die Photoreformierung verschiedener Substrate grundsätzlich möglich. Der erhaltene Wasserstoff ermöglicht eine problemlose Durchführung einer Knallgasprobe oder sogar den Betrieb eines Modell-Brennstoffzellenfahrzeugs. Eine Weiterentwicklung des Versuchs erscheint daher als ratsam, um den Anforderungen an ein Schulexperiment stärker gerecht zu werden.

5.5. Aufbau im UV-Tauchlampenreaktor

Zur potentiellen Erhöhung der Ausbeute an Wasserstoffgas wurde parallel zu dem Versuchsaufbau im 250 mL-Gefäß ein Aufbau mit einem UV-Tauchlampenreaktor ausprobiert. Dieser Photoreaktor nutzt als Lichtquelle einen Quecksilberhochdruckbrenner (TQ 150) mit einem Emissionsspektrum von 240-580 nm, der in einem gekühlten Glasmantel³⁹⁷ in die Suspension der Glucose-Lösung (100 g/L) und des Pt/TiO₂-Photokatalysators (70 mg) hineintauchte. Das Volumen des Photoreaktors beträgt 300 mL. Bei vollständiger Befüllung verbleibt im oberen Teil des Photoreaktors ein kleiner Luftraum. Daher konnte eine Gasentwicklung nicht quantifiziert werden. Die Bestrahlung wurde über sechs Stunden hinweg durchgeführt. Im Anschluss an die Bestrahlung wurde eine Gasprobe aus dem Luftraum im Reaktor entnommen und mittels eines Gaschromatographen untersucht. Dabei konnte jedoch nur geringe Menge an Wasserstoff in der Gasprobe identifiziert werden (ca. 4,7 %). Aufgrund der fehlenden Möglichkeit, die Gasentwicklung genauer beziffern zu können und aufgrund der niedrigen Anteile an Wasserstoff in der Gasprobe, wurden keine weiteren Versuche mit dem Photoreaktor durchgeführt.

³⁹⁶ Tausch, Michael W.; Heffen, Maria; Krämer, René; Meuter, Nico: *Passendes Licht - Harmlose Stoffe*, in: Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule, 64 (2), 2015, S. 46.

³⁹⁷ Tausch, Michael W.: *Photochemische cis-trans-Isomerisierung*, in: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) 40 (2), 1987, S. 92.

5.6. Versuchskonzept 2: Reagenzglas (kleiner Aufbau)

Der in *Kapitel 5.4.* beschriebene Aufbau diente als Basis für die Weiterentwicklung des Experiments zur Photoreformierung. Beabsichtigt wurde, einen deutlich kompakteren Versuchsaufbau zu realisieren, um die bereits geschilderten Probleme bei der Handhabung mit dem Aufbau zu reduzieren und die immer noch recht lange Wartezeit, bis eine größere Menge an Wasserstoffgas entwickelt wurde, mit der neben der Knallgasprobe auch eine gaschromatographische Untersuchung erfolgen konnte, reduzieren zu können. Konzipiert wurde ein Aufbau in einem Reagenzglas, durch den das pneumatische Auffangen des Gases entfällt. Ein direktes Auffangen in einer Spritze erschien zudem als geeignete Alternative, das Gas für Folgeversuche verwenden zu können. Insgesamt wurde ein Aufbau und eine Versuchsdurchführung entwickelt, die im Folgenden näher vorgestellt werden.

5.6.1. Materialien³⁹⁸

Waage, Ultraschallbad, großes Reagenzglas (Quarzglas), Becherglas, Magnetrührplatte mit Rührfisch (kleine Form), durchbohrter Stopfen, 10-mL Spritze, 1-mL Spritze, Kanüle, Zweiwegehahn, Stativmaterial, Highpower-LED (365 nm), Gasbeutel mit Septum, Petrischale, Feuerzeug

5.6.2. Versuchsdurchführung³⁹⁹

50 mg des TiO_2/Pt -Katalysators werden in einem großen Reagenzglas aus Quarzglas eingewogen. Das Reagenzglas wird anschließend bis etwa 2 cm unterhalb des Randes mit einer Substrat-Lösung (wahlweise Methanol, Ethanol, Glucose, ect.) aufgefüllt und die Suspension für 3 Minuten in ein Ultraschallbad gegeben. Nachdem ein Rührfisch hinzugegeben wurde, wird das Reagenzglas mit einem durchbohrten Stopfen, in den eine 1-mL Spritze mit aufgesetztem Zweiwegehahn gesteckt ist, verschlossen. Das Reagenzglas mit dem befestigten Aufsatz wird in eine Stativklemme über einer Magnetrührplatte eingespannt. Anschließend wird eine 10-mL Spritze auf den Zweiwegehahn aufgesetzt, wobei der Stempel der Spritze nach unten gedrückt ist. Eine weitere Stativklammer wird unmittelbar über dem Stopfen eingespannt, sodass dieser fest auf dem Reagenzglas sitzt. Zuletzt wird sowohl die Magnetrührplatte (mind. 300 U/min) als auch die Highpower-LED (365 nm) zur Bestrahlung der Suspension eingeschaltet und für mindestens 30 Minuten bestrahlt. Der Aufbau ist in *Abbildung 26* zu sehen.

³⁹⁸ Venzlaff/Bohrmann-Linde, Photoreformierung, S. 256.

³⁹⁹ Ebd.

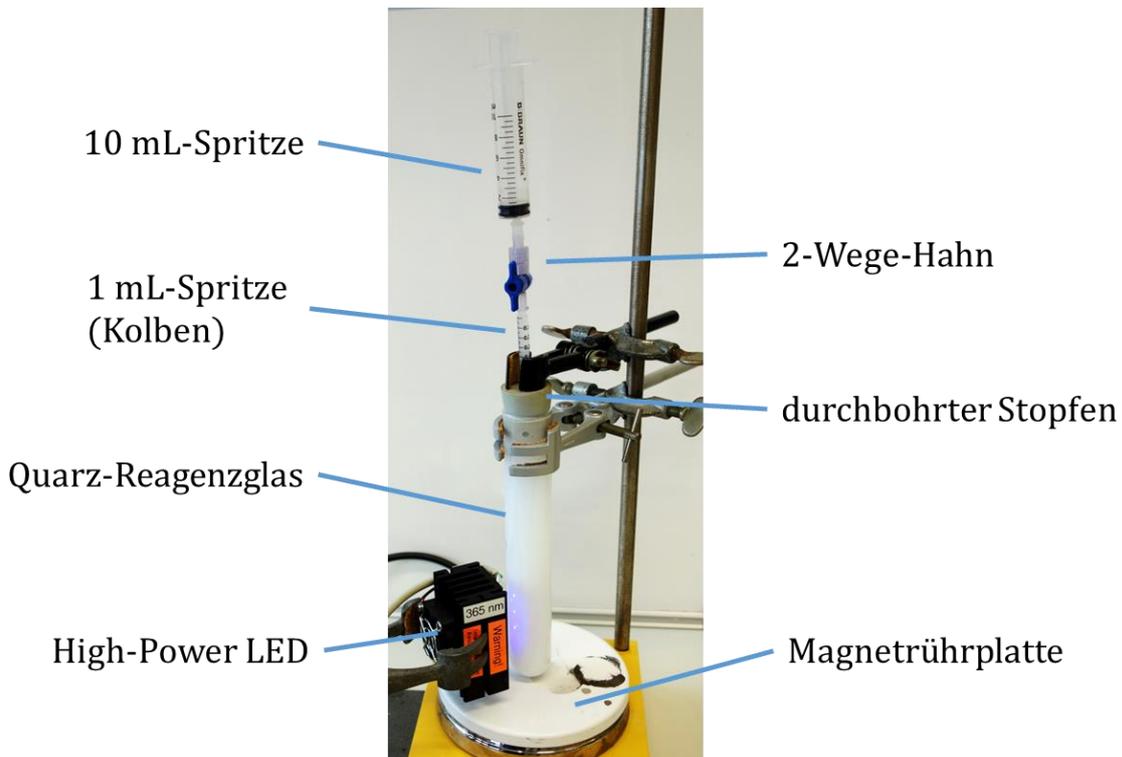


Abb. 26: Aufbau Photoreformierung im Reagenzglas (kleiner Aufbau)

Nach der Bestrahlung wird die 10-mL Spritze von der 1-mL Spritze abgenommen. Auf die 10-mL Spritze wird eine Kanüle gesetzt. Falls sich noch etwas Flüssigkeit in der Spritze befinden sollte, wird diese durch vorsichtigen Druck auf den Kolben der Spritze. Über die Kanüle wird ein Volumen an Sauerstoff eingeblasen, das der Hälfte des in der Spritze befindlichen Gasvolumens entspricht. In eine mit Seifenlösung gefüllte Petrischale werden nun etwa 0,5 mL große Gasblasen eingespritzt und mit einem Feuerzeug gezündet.

5.6.3. Ergebnisse zur Photoreformierung von Ethanol

Für die Untersuchungen beim vorher beschriebenen Aufbau wurde Ethanol als Substrat herangezogen. Ethanol-Lösungen zeigten bereits bei der Verwendung im größeren Versuchsaufbau höhere Wasserstoffausbeuten als etwa gleichwertig konzentrierte Glucose-Lösungen. Daneben ist es anders als Methanol nicht toxisch, wodurch ein leichterer Umgang mit diesem Stoff, vor allem in verdünnten Lösungen gegeben ist. Dies ist auch perspektivisch für den Einsatz im Schulunterricht von großer Bedeutung.

Einige der Beobachtungen bei der Photoreformierung von Ethanol konnten grundsätzlich auch bei anderen Versuchsreihen mit unterschiedlichen Substraten, Konzentrationen an Substraten oder bei der Änderung von Temperaturen gemacht werden. Zu Beginn der Bestrahlung ist während der ersten 10-15 Minuten keine Gasentwicklung zu beobachten. Erst danach nimmt die Entwicklung an Gas zu. Im weiteren Verlauf der Bestrahlung ist dann ein nahezu linearer Anstieg der Gasvolumina zu beobachten. *Abbildung 27* zeigt beispielhaft die durchschnittliche Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %). Das gewonnene Gas wurde im Anschluss an die Bestrahlung zum einen gaschromatographisch untersucht. Das Vorgehen hierbei ist in *Kapitel 5.6.3.1.* näher beschrieben. Daneben wurde

das Gas zudem in einer Knallgasreaktion getestet. In einem Verhältnis von 2:1 (Gasprobe:Sauerstoffgas) wurde die Gasprobe in einer Spritze mit Sauerstoffgas zusammengeführt und anschließend in eine Seifenlösung geleitet. Die entstandenen Gasblasen wurden unter einen deutlich wahrzunehmenden Knall gezündet. Bereits dieser Versuch mit der Gasprobe deutet darauf hin, dass Wasserstoffgas zu einem hohen Anteil in der Gasprobe vorliegen muss, da ansonsten die Knallgasprobe nicht mit diesem deutlichen Knall vollzogen worden wäre.

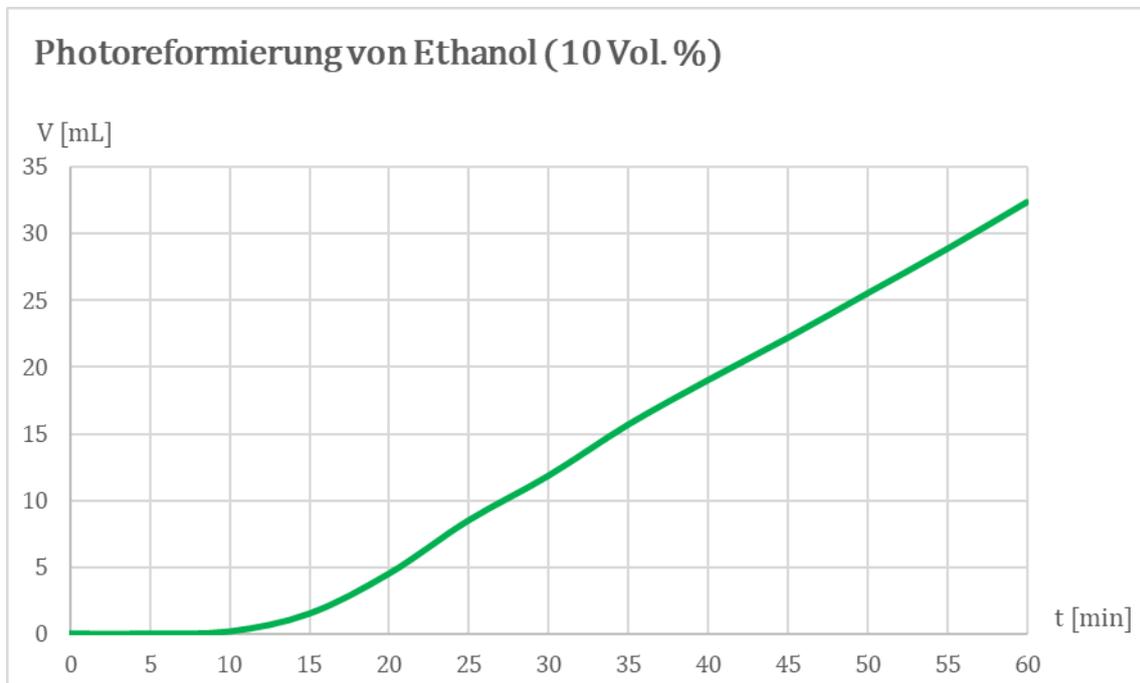


Abb. 27: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %)

Die zu Beginn der Photoreformierung beobachtete Anfangsphase, in der kein Gas gebildet wird, lässt sich nicht nur bei der Photoreformierung von Ethanol, sondern allen anderen eingesetzten Stoffen beobachten. Es lässt sich damit erklären, dass zum einen die photochemische Reaktion zunächst eine Phase benötigt, in der sie anläuft. Zum anderen lässt es sich auch mit der Sättigung der Lösung mit Wasserstoff erklären. Zwar ist bei Raumtemperatur die Löslichkeit von Wasserstoff in wässrigen Lösungen sehr gering,⁴⁰⁰ nichtsdestoweniger liegt zu Beginn der Reaktion kein Wasserstoff in der Lösung vor, sodass hier auch ein minimaler Sättigungsvorgang anzunehmen ist. Versuche, bei denen zuvor Wasserstoff in die Suspension eingeleitet wurden, zeigen, dass hierbei bereits nach den ersten fünf Minuten das erste Gas aufgefangen werden konnte (*siehe Abb. 28*). Der bei den anderen Messungen ohne diese Vorbehandlung sichtbare Knick zu Beginn der Bestrahlung ist sehr deutlich reduziert.

⁴⁰⁰ Diese liegt bei 20 °C bei 19,4 g/L; (Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA): Wasserstoff, GESTIS-Stoffdatenbank; <https://gestis.dguv.de/data?name=007010>, (14.03.2024)).

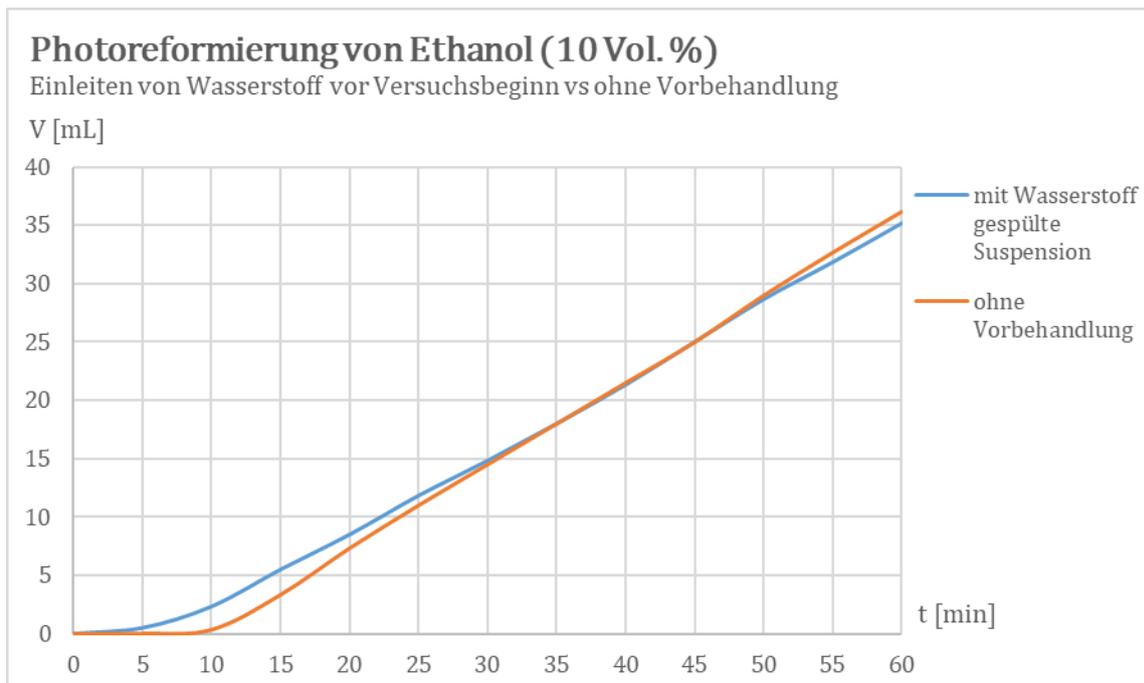


Abb. 28: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) im Vergleich zwischen einer mit Wasserstoff vorbehandelten Suspension und einer nicht vorbehandelten Suspension

5.6.3.1. Analyse der Gasproben

Zur Analyse der gewonnenen Gasproben wurden diese gaschromatographisch untersucht. Zum überwiegenden Teil erfolgte die Identifikation mit einem AK Kappenberg Low-cost Gaschromatographen GC15.⁴⁰¹ Teilweise wurden Gasproben auch mit einem Gaschromatographen der Firma Shimadzu (GC 2010 Pro)⁴⁰² durchgeführt. Sofern Messungen mit dem Gaschromatographen von Shimadzu durchgeführt wurden, ist dies gesondert vermerkt. Die Daten und Diagramme sind zudem im Anhang zu finden.

Im Falle der ersten Versuchserprobungen mit der Photoreformierung von Ethanol wurden die erhaltenen Gasproben in Bezug zu einer Referenzmessung mit Wasserstoffgas gesetzt. Damit sollte die Vergleichbarkeit aller Messungen gegeben sein. In den Gaschromatographen wurden bei jeder Messung 0,5 mL Gas injiziert. Dieses Vorgehen wurde auch für die weiteren Messungen mit dem Low-cost Gaschromatographen beibehalten. *Abbildung 29* zeigt beispielhaft Chromatogramme der Untersuchung der Gasproben im Vergleich zur Referenzprobe Wasserstoff. Deutlich erkennbar ist, dass die Retentionszeit sowohl der Referenz- als auch der Gasprobe übereinstimmen. Damit handelt es sich bei dem aufgefangenen Gas eindeutig um Wasserstoff. Durch Integration der Peakflächen lässt sich zudem die Aussage tätigen, dass der Anteil an Wasserstoff in den untersuchten Gasproben bei der Photoreformierung von Ethanol bei überwiegend über 90 % liegt. Diese relativ hohen

⁴⁰¹ Genutzt wurde als Säule die Standard-Säule (Belegung: Siliconöl OV101 (20%), Träger: Chromosorb WHSP 80-100 msh, Länge: 1,20 m). Anwendungsgebiete dieser Säule sind anorganische und organische Gase. Als Trägergas wurde Stickstoff verwendet.

⁴⁰² Genutzt wurde eine Carboxen-Säule (Carboxen®-1010 Porous Layer Open Tubular Kapillar-GC-Säule, Länge: 30 m, Innerer Durchmesser: 0,32 mm) für anorganische und kurzkettige organische Komponenten. Als Trägergas wurde Stickstoff verwendet.

Anteile ließen sich überwiegend auch bei weiteren Messungen nicht nur bei der Photoreformierung von Ethanol, sondern auch von anderen Substraten feststellen. Das entstandene Gas beinhaltet fast vollständig Wasserstoff. Dadurch verläuft die Knallgasreaktion bei einem Verhältnis von 2:1 (Gasprobe:Sauerstoffgas) positiv und akustisch deutlich wahrnehmbar.

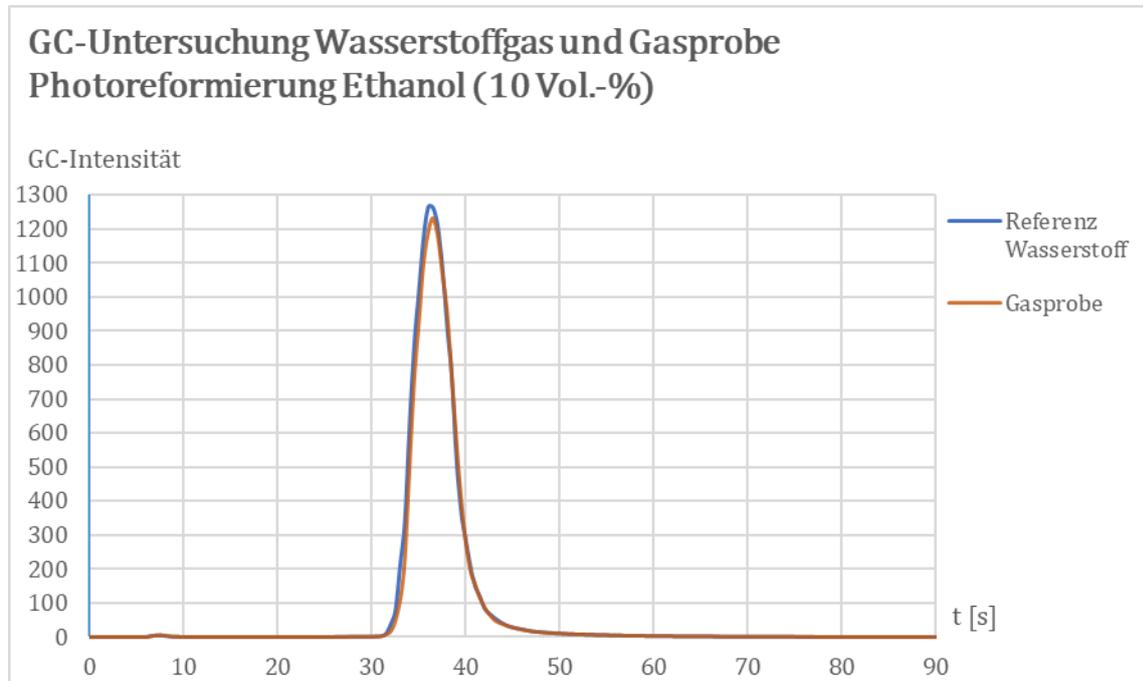


Abb. 29: Gaschromatogramm der erhaltenen Gasprobe bei der Photoreformierung von Ethanol im Vergleich zur Referenzmessung von Wasserstoffgas aufgenommen mit dem Low-cost Gaschromatographen

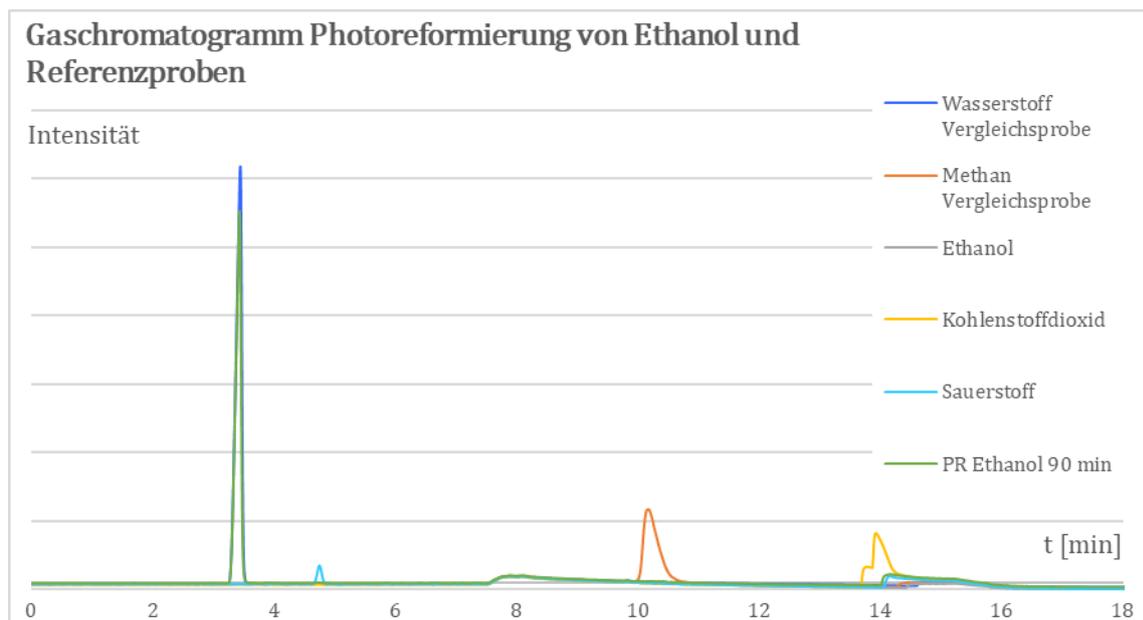


Abb. 30: Gaschromatogramm der erhaltenen Gasprobe bei der Photoreformierung von Ethanol im Vergleich zur Referenzmessung von Wasserstoffgas aufgenommen mit dem GC 2010 Pro

Zusätzlich konnten mit einem weiteren Gaschromatographen (Shimadzu) zum Ende dieses Forschungsvorhabens ebenfalls Messungen zur Untersuchung der Gasprobe unternommen werden. Auch hierbei wurde zunächst eine Referenzmessung mit Wasserstoffgas

durchgeführt, bevor eine Gasprobe der Photoreformierung von Ethanol untersucht wurde. In den Gaschromatographen wurden bei jeder Messung 50 μL Gas injiziert. *Abbildung 30* zeigt Chromatogramme der Untersuchung der Gasproben im Vergleich zur Referenzprobe Wasserstoff. Auch hier ist deutlich erkennbar, dass Wasserstoff in der Probe vorliegt.

Im Ausblick auf alle untersuchten Gasproben in den unterschiedlichen Versuchsreihen, auf die in den folgenden Kapiteln näher eingegangen wird, zeigt sich tendenziell, dass mit diesem Versuchsaufbau höhere Anteile an Wasserstoffgas zu erhalten sind als bei dem in *Kapitel 5.4.2.* beschriebenen Aufbau mit dem Schott-Glas. Gründe hierfür sind in dem kompakteren Aufbau, dem geringeren Totvolumen im Reagenzglas und der aufgesetzten 1 mL-Spritze zu suchen. Diese ermöglicht eine direkte Abführung des entstehenden Gases in die jeweils aufgesetzte Spritze.

5.6.3.2. Untersuchung der wässrigen Phase - Bildung von Ethanal

Wie auch bei den ersten Versuchen zur Photoreformierung von Glucose im großen Versuchsaufbau, sollten auch mögliche Produkte in der wässrigen Phase identifiziert werden. Besonders das während der Photoreformierung von Ethanol entstehende Ethanal war Gegenstand von Untersuchungen zum Nachweis von diesem Stoff. Als Nachweis wurde die Fehling-Probe durchgeführt. Sie wurde ausgewählt, da sie einerseits zuverlässig über einen Farbumschlag die Anwesenheit von Aldehyden anzeigt und andererseits als ein im Chemieunterricht gängiger Nachweis anzusehen ist.

Das Vorgehen bei der Untersuchung gestaltete sich in der Art, dass 4 mL der über drei Stunden bestrahlten Suspension mit 5 mL der zusammengeführten Lösungen aus Fehling I und Fehling II versetzt wurde. Das Gemisch wurde anschließend kurzzeitig erhitzt. Zu beobachten war, dass nach wenigen Minuten ein Farbumschlag von tiefblau nach dunkelgrün zu sehen war (*siehe Abb. 31*). Es lag schließlich eine klare Flüssigkeit vor. am Boden des Reagenzglases war ein schwach rötlich gefärbter Niederschlag erkennbar. Die Beobachtungen konnten sowohl beim Einsatz von reinem Ethanol, als auch vergälltem Ethanol gemacht werden.

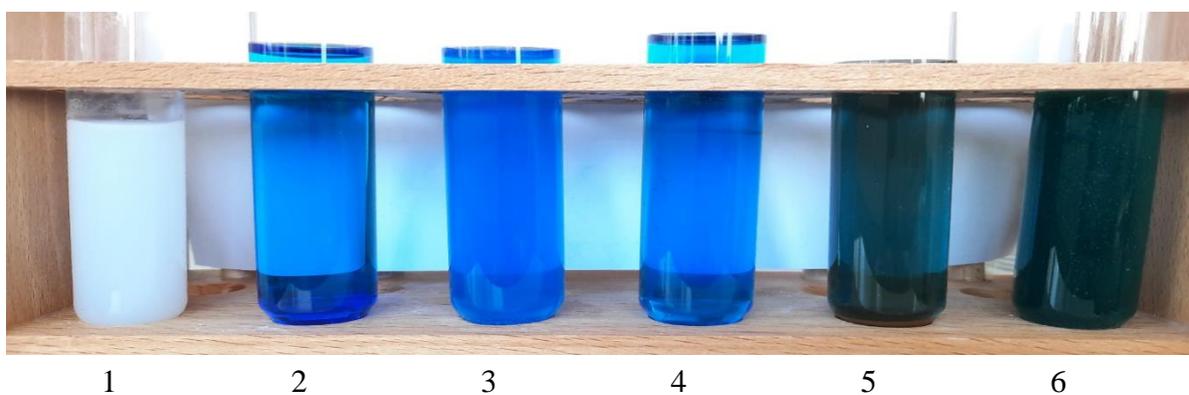


Abb. 31: Fehling-Probe: 1. Ethanol-Lösung, Photokatalysator, **nicht bestrahlt** (Vergleichsprobe); 2. Ethanol-Lösung (vergällt), Fehling **nicht bestrahlt**; 3. Ethanol-Lösung (unvergällt), Photokatalysator, Fehling, **nicht bestrahlt**; 4. Ethanol-Lösung (unvergällt), Fehling, **nicht bestrahlt**; 5. Ethanol-Lösung (vergällt), Photokatalysator, Fehling **bestrahlt**; 6. Ethanol-Lösung (unvergällt), Photokatalysator, Fehling, **bestrahlt**

Da die Filtration der Suspension aufgrund der zum Teil geringen Partikelgrößen nicht vollständig mithilfe einfacher Papierfilter gelingt, wurde sich für die Variante entschieden, Teile der Suspension direkt in der Fehling-Probe einzusetzen. Die tiefgrüne Verfärbung der Flüssigkeit nach dem Erhitzen liefert den Nachweis, dass ein Aldehyd in der Suspension vorliegen muss, auch wenn der „klassische“ rot-braune Niederschlag bei einer positiven Fehling-Probe nicht zu erkennen war. Die Entstehung von Ethanal als einzig möglichem Aldehyd, der während der Photoreformierung von Ethanol entstehen kann, konnte somit experimentell nachgewiesen werden. Um auszuschließen, dass andere Faktoren zur Verfärbung der Fehling-Probe führten, wurden wie in *Abbildung 31* zu sehen auch nicht bestrahlte Lösungen untersucht sowie Ethanol-Lösungen, deren Basis reiner, unvergällter Ethanol war. Bei den nicht bestrahlten Proben war jedoch kein Farbumschlag zu erkennen. Es konnte somit eindeutig nachgewiesen werden, dass erst durch die Bestrahlung der Suspension eine Fehling-Probe positiv ausfällt. Auch die bei vergälltem Ethanol beigemischten Stoffe nehmen keinen Einfluss auf die Fehling-Probe. Dass Licht die Prozesse der Photoreformierung in Gang setzen, konnte zudem dadurch ersichtlich werden, dass bei Proben 3 und 4 (*siehe Abb. 31*) nach mehreren Tagen, an denen sie dem Tageslicht und der Beleuchtung in den Laboren ausgesetzt waren, allmählich eine grüne Färbung auftrat. Mit dem gebildeten Ethanal entsteht zwar ein Stoff, der als Gefahrstoff für den Chemieunterricht klassifiziert werden kann. Über die Menge an Wasserstoff, die während der Photoreformierung erhalten wird, können jedoch auch Rückschlüsse zur Menge des entstehenden Ethanals gezogen werden. Schon bei der Annahme, dass pro Mol Wasserstoff ein Mol Ethanal entsteht, sind nach der Bildung von 20 mL Wasserstoff theoretisch 465 μL Ethanal entstanden.⁴⁰³ Die Konzentrationen des Ethanals in der wässrigen Phase sind somit sehr gering, wodurch dieser Versuch im Hinblick auf das Gefahrenpotential für Schülerinnen und Schüler als gering eingestuft werden kann. Zudem handelt es sich bei dem dargestellten Versuchsaufbau um ein nahezu geschlossenes System, wodurch zusätzlich ein Kontakt stark minimiert wird.

5.6.4. Langzeitbestrahlung

Mit dem in *Kapitel 5.6.2.* beschriebenen Versuchsaufbau wurden auch Langzeitbestrahlungen über zehn Stunden bei Raumtemperatur (22 °C) und Umgebungsdruck (1020 hPa) durchgeführt. Versucht wurde nachzuvollziehen, inwieweit eine Abnahme der Bildungsraten an Wasserstoffgas über einen längeren Zeitraum zu beobachten sind. Die Messwerte dieser Bestrahlungen wurden für die ersten zehn Stunden grafisch aufgetragen und sind in *Abbildung 32* wiederzufinden. Sie zeigen, dass auch über einen längeren Bestrahlungszeitraum hinweg, die Bildungsraten an Wasserstoff relativ konstant bleiben. Allerdings lassen sich leichte Abschwächungen der Gasentwicklung in den letzten Stunden der Bestrahlung erkennen (*siehe Abb. 32*). Im Vergleich der Intervalle zwischen 30 und 60 Minuten ist eine durchschnittliche Gasentwicklung von 23,8 mL zu beobachten, im Intervall zwischen 570 und 600 Minuten dagegen eine durchschnittliche Gasentwicklung von

⁴⁰³ Diese Berechnung liefert einen Maximalwert. Die tatsächliche Menge wird geringer sein, da auch Ethanal als Substrat für die Photoreformierung herangezogen werden kann. Auch Water-Splitting läuft parallel ab.

19,5 mL Daraus lässt sich schließen, dass in diesem Versuch die Edukte allmählich abnehmen, aber auch nach zehn Stunden nicht vollständig abgebaut sind. Die Gasentwicklung schwächt sich zwar ab, kommt aber nicht zum Erliegen.

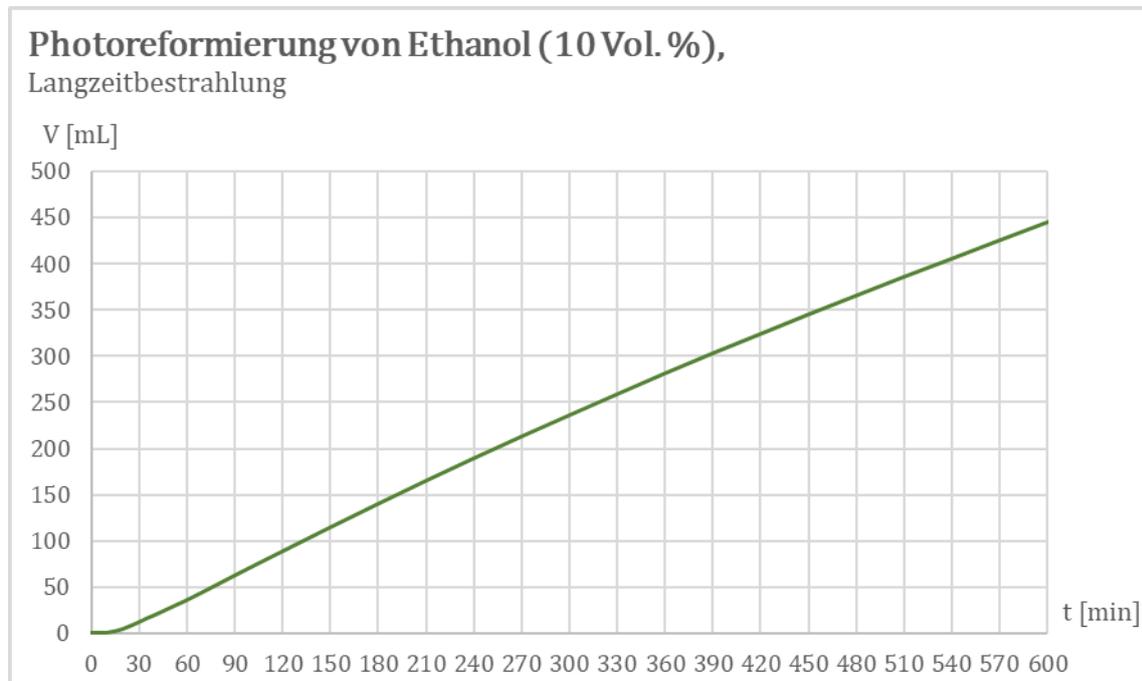


Abb. 32: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) über zehn Stunden

Die gaschromatographischen Untersuchungen dieser Proben zeigen wiederum nach dieser langen Bestrahlungszeit eine Besonderheit auf. Zwar ist der Anteil an Wasserstoffgas auch nach 20 Stunden der Bestrahlung mit durchschnittlich 93,9 % immer noch sehr hoch ist, allerdings ist im Chromatogramm noch ein weiterer Peak sichtbar (*siehe Abb. 33*). Dieser Peak konnte in Untersuchungen Methan zugeordnet werden. Vergleichsmessungen zu Wasserstoffgas und Methangas⁴⁰⁴ zeigen, dass zu etwa 7 %⁴⁰⁵ Methan gebildet wurde. Damit kann in Langzeitbestrahlungen in diesem Versuchsaufbau auch gezeigt werden, dass der photokatalytische Abbau von Ethanol-Molekülen auch über den Bindungsbruch zwischen den beiden Kohlenstoffatomen erfolgt. Unterschiede in den Gaschromatogrammen der untersuchten Gasproben lassen sich auch bei der Zuhilfenahme des Gaschromatographen von Shimadzu erkennen. Hier ist deutlich die Reduzierung der Intensität des Wasserstoffpeaks zu erkennen. Gleichzeitig nimmt die Fläche des Peaks bei Methan zu und die des Wasserstoffs bei der Photoreformierung von Ethanol ab. Eine eindeutige Aussage zur Intensität bzw. der Anwesenheit von Kohlenstoffdioxid bei den Proben lässt sich nicht machen (*siehe Abb. 34*). Dies begründet sich vermutlich darin, dass Kohlenstoffdioxid in der wässrigen Phase gelöst vorliegt.

⁴⁰⁴ Als Referenz für Methangas wurde ein Gasgemisch aus Methan (20 %) und Umgebungsluft (80 %) injiziert, da der Peak bei der Injektion von 100 % Methangas zu stark mit dem Peak der Referenzprobe Wasserstoff überschneidet.

⁴⁰⁵ Dass in der Summe ein höherer Wert als 100 % wiederzufinden ist, lässt sich darauf zurückführen, dass unmittelbar an den Peak von Wasserstoff der Peak von Methan anschließt. Eine exakte Trennung ist in dieser Darstellung nicht möglich, sodass der Tiefpunkt als Grenzen zwischen beiden Stoffen gewählt wurde.

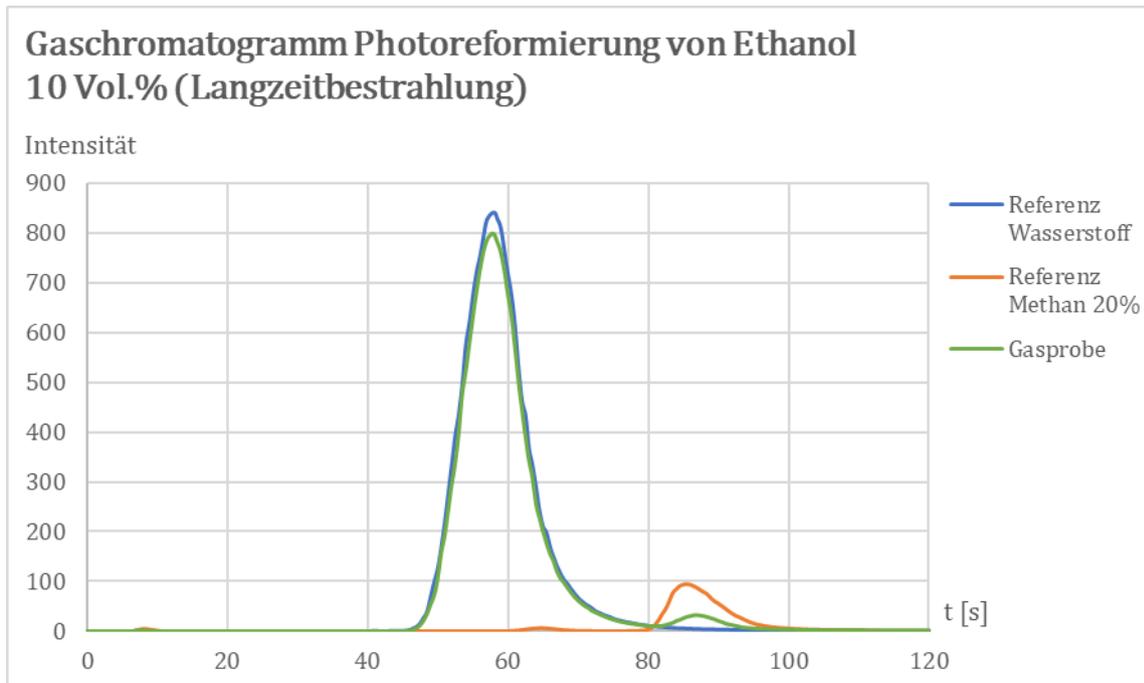


Abb. 33: Gaschromatogramm der Langzeitbestrahlung von Ethanol nach 20 Stunden (Low-Cost GC)

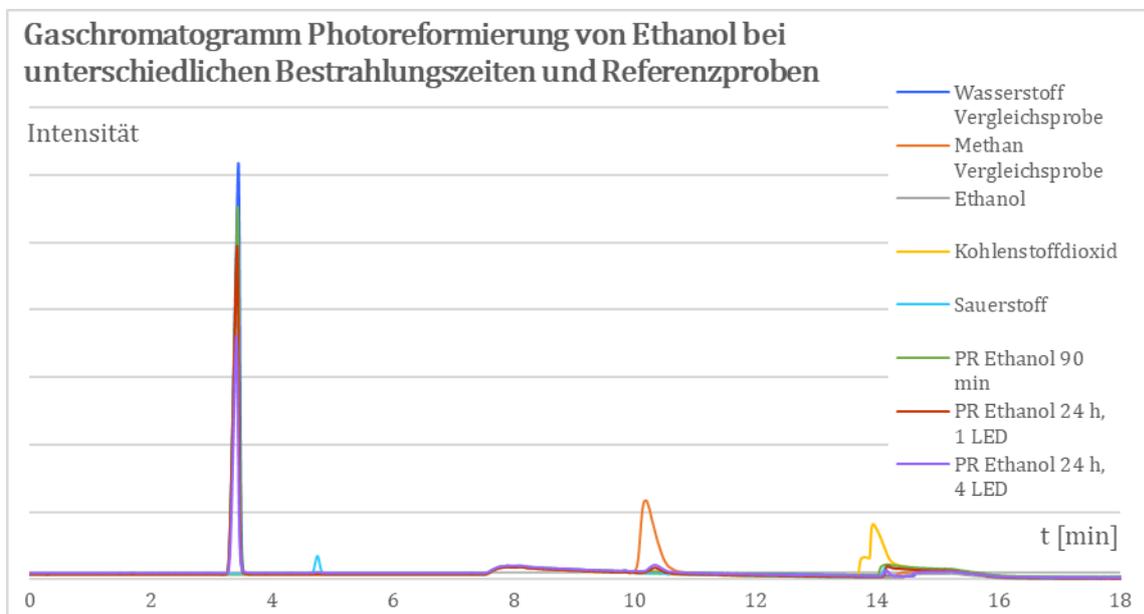


Abb. 34: Vergleich der Gaschromatogramme (GC 2010 Pro) der Bestrahlung von Ethanol nach 90 Minuten, 24 Stunden und 24 Stunden bei der Bestrahlung mit vier High-Power LED. Als Referenzen sind zudem Proben von Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Ethanol und Methan aufgeführt.

5.6.5. Änderung des Volumenanteils von Ethanol

Die Verwendung einer 10 Vol. %-igen Ethanol-Lösung für die Photoreformierung erfolgte zunächst aufgrund des leichten Ansetzens dieser Lösungen. Untersucht wurden jedoch auch Ethanol-Lösungen mit anderen Volumenanteilen, um dadurch den damit zusammenhängenden Einfluss der Konzentration nachvollziehen zu können. Verwendet wurden insgesamt vier Ethanol-Lösungen (5 Vol. %, 10 Vol. %, 20 Vol. %, 50 Vol. %⁴⁰⁶). Der Versuchsaufbau blieb unverändert. Die Bestrahlung erfolgte für 60 Minuten bei Raumtemperatur und Umgebungsdruck. Die Messwerte sind in *Abbildung 35* dargestellt.

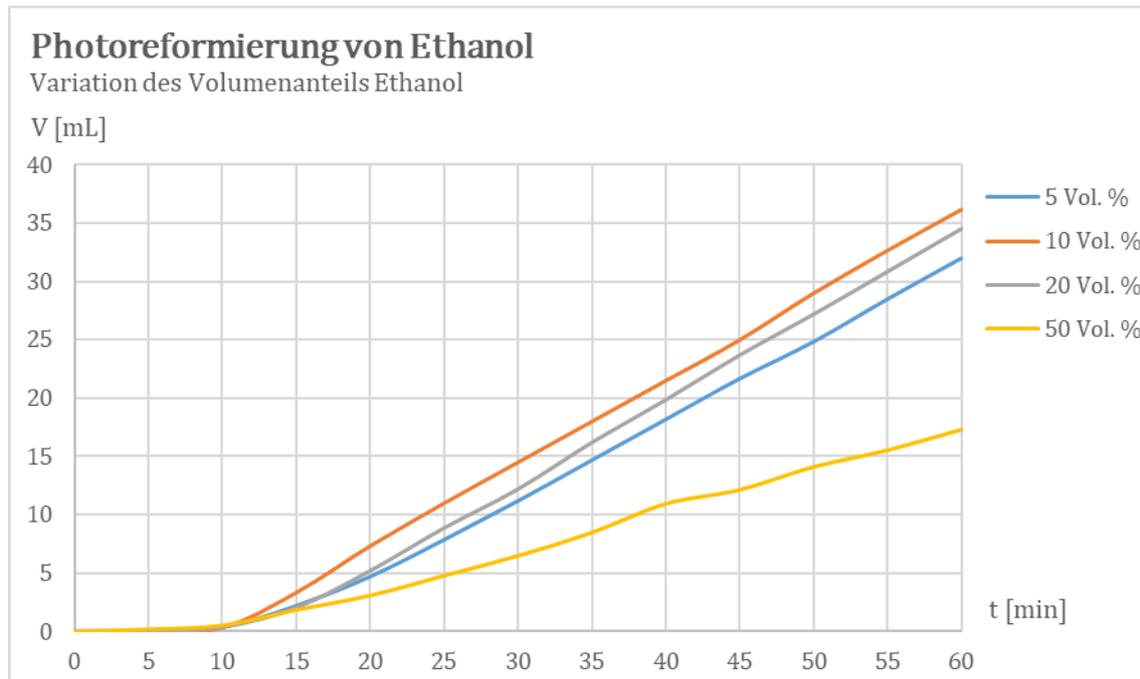


Abb. 35: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol bei unterschiedlichen Volumenanteilen der eingesetzten Lösungen

Aus den Werten wird ersichtlich, dass Ethanol-Lösungen mit einem geringen Volumenanteil (5-20 Vol. %) vergleichbare Ausbeuten liefern. Eine Tendenz, dass mit steigendem Volumenanteil auch mehr Gas entwickelt wird lässt sich nicht erkennen. Allerdings ist die Gasentwicklung bei Ethanol-Lösungen, die höhere Volumenanteile an Ethanol besitzen, verringert. Die experimentellen Ergebnisse stützen daher Befunde, dass im Allgemeinen die Photoreformierung von Substraten mit solchen Lösungen besser funktioniert, die geringere Konzentrationen und somit auch geringere Volumenanteile an Substraten besitzen. Auch bei Ethanol kann von dieser Tendenz ausgegangen werden. Die für die Experimente herangezogenen 10 Vol. %-igen Lösung von Ethanol scheinen daher ideal für die photokatalytische Umsetzung dieses Stoffs zu sein. Bei dem überwiegenden Teil der Messungen wurde daher entweder dieser Volumenanteil bei Ethanol, bzw. auch bei anderen Alkoholen gewählt.

⁴⁰⁶ Diese Messwerte wurden im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit ermittelt. Wisser, Carolin: *Photoreformierung zur Erzeugung von grünem Wasserstoff - Erprobung des Umsatzes verschiedener Alkohole als Substrate und didaktische Perspektive*, Bachelor-Thesis, Wuppertal 2024, S. 13.

5.6.6. Temperatur als Einflussfaktor

Dass die Temperatur für die Prozesse der Photoreformierung von Bedeutung ist, wurde bereits in *Kapitel 3.3.1.* dargestellt. Inwieweit sich jedoch ein Temperaturanstieg auf die tatsächlichen Gasausbeuten während der Photoreformierung von Ethanol auswirkt, war Gegenstand weiterer Untersuchungen. Der Versuchsaufbau wurde hierzu leicht abgeändert, sodass die Suspensionen auf unterschiedlich hohe Temperaturen gebracht werden konnte (*siehe Abb. 36*). Mithilfe einer Heizplatte konnte das Wasserbad um das Reagenzglas mit der Suspension auf eine konstante Temperatur gebracht werden. Neben der Raumtemperatur wurde die Photoreformierung ab 30 °C um jeweils 10 °C höhere Temperaturen durchgeführt. Der Abstand zwischen der Lichtquelle und der Suspension betrug etwa 1,5 cm, wobei die Bestrahlung sowohl durch ein wassergefülltes Becherglas aus Borosilicatglas als auch ein Quarzreagenzglas erfolgte. Die beobachtete Gasentwicklung ist in *Abbildung 37* aufgeführt.

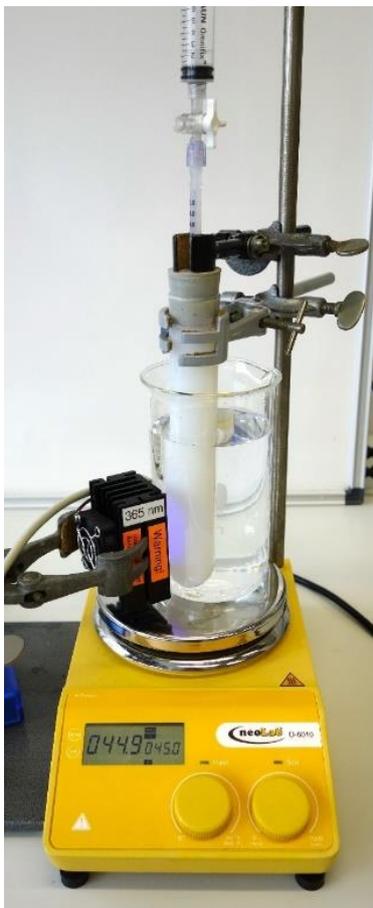


Abb. 36: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Photoreformierung

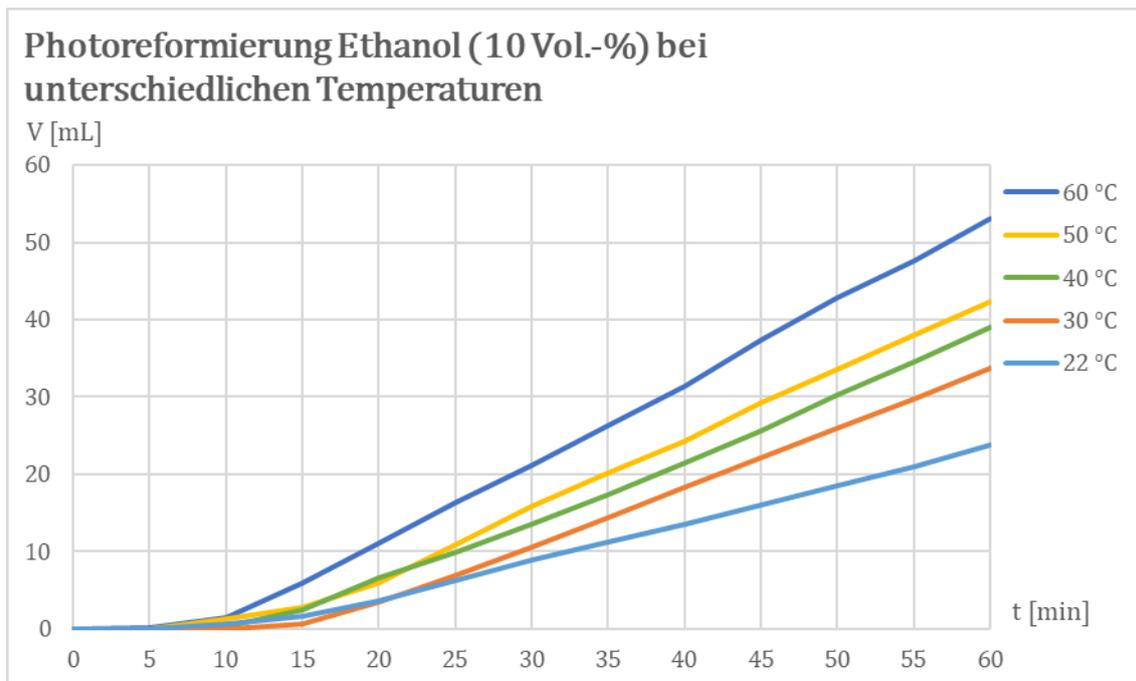


Abb. 37: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) bei unterschiedlichen Temperaturen

Deutlich zu erkennen ist, dass mit steigender Temperatur auch die Ausbeute an Gas zunimmt. Höhere Temperaturen als 60 °C wurden bei der Photoreformierung von Ethanol nicht gewählt, um zu verhindern, dass Ethanol in die Gasphase übergeht. Die Untersuchung der Gasproben zeigt, dass die Anteile an Wasserstoffgas bei der niedrigsten (22 °C) und der höchsten (60 °C) Temperaturen vergleichbar hoch zwischen 73-77 % liegen (siehe digitaler Anhang). Die Temperatur nimmt somit keinen Einfluss auf den Anteil des erzeugten Wasserstoffgases, der vergleichbar mit anderen Versuchserprobungen ist, jedoch auf die Bildungsraten von Wasserstoff, die erhöht werden. Für die Photoreformierung muss damit festgehalten werden, dass sowohl photochemische als auch thermische Prozesse berücksichtigt werden müssen.⁴⁰⁷ Das legt die Vermutung nahe, dass keine weiteren Nebenreaktionen durch die Erhöhung der Temperatur stattfinden.

5.6.7. Varianz der Menge an Photokatalysator

Neben Langzeitbestrahlungen und der Untersuchung des Einflusses von Temperaturerhöhungen sowie der Konzentrationen von Substrat-Lösungen auf die Bildungsraten von Wasserstoff wurde auch die Menge des eingesetzten Photokatalysators variiert, um auch hierbei mögliche Auswirkungen zu ermitteln. Neben den üblicherweise verwendeten 50 mg an Photokatalysator wurden auch 30 mg bzw. 70 mg des Photokatalysators für die Photoreformierung von Ethanol herangezogen.

⁴⁰⁷ Venzlaff/Bohrmann-Linde, Photoreformierung, S. 256-257.

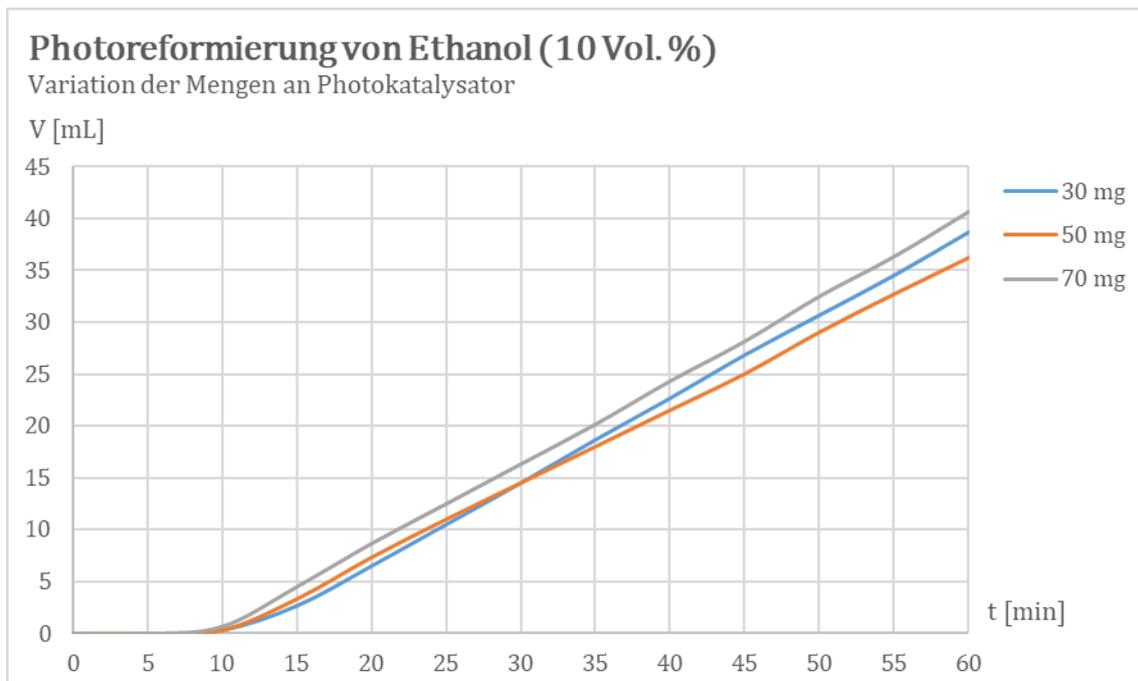


Abb. 38: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) bei unterschiedlichen Mengen des Photokatalysators

Zu erkennen ist, dass die ausgewählten Mengen an zugegebenem Photokatalysator keinen signifikanten Einfluss auf die Bildungsrate an Wasserstoff nehmen (siehe Abb. 38). Die Menge des eingesetzten Photokatalysators scheint bei geringen Abweichungen nicht entscheidend zu sein, solange durch die Suspension genügend Licht absorbiert werden kann. Exakte Mengen an Photokatalysator sind somit nicht zwingend notwendig, was vor allem im Chemieunterricht den Vorteil hat, dass auch Mengenangaben wie „eine Spatelspitze“ (entspricht etwa 50 mg) ausreichend sind, um den Versuch erfolgreich durchzuführen.

5.6.8. Wiederholte Einsatz des Photokatalysators

Die Langzeitstabilität des Photokatalysators wurde ebenfalls geprüft, indem er nach einer Regeneration erneut für das Experiment herangezogen wurde. Ziel war es, herauszufinden, ob der Photokatalysator auch ein weiteres Mal für die Photoreformierung genutzt werden kann und inwieweit Einschränkungen bei der Gewinnung von Wasserstoff zu erkennen sind. Zur Untersuchung wurde zunächst das Experiment wie beschrieben durchgeführt. Die Bestrahlung der Suspension und somit auch des Photokatalysators erfolgte über 60 Minuten. Im Anschluss an die Bestrahlung wurde die Suspension zunächst filtriert. Der Rückstand wurde mit Wasser gewaschen und danach getrocknet. Der Feststoff wurde dann mit einem Brenner ausgeglüht, um mögliche organische Reste auf der Oberfläche des Photokatalysators zu entfernen. Der so zurückgewonnene Photokatalysator wurde erneut zu einer Ethanol-Lösung (10 Vol. %) hinzugegeben, im Ultraschallbad behandelt und wieder für 60 Minuten bestrahlt. Die Ergebnisse sind in *Abbildung 39* aufgeführt. Zu erkennen ist, dass bei beiden Bestrahlungszyklen die Ausbeuten an Gas vergleichbar sind. Bei der zweiten Bestrahlung ist die Gasentwicklung über 60 Minuten etwas geringer.

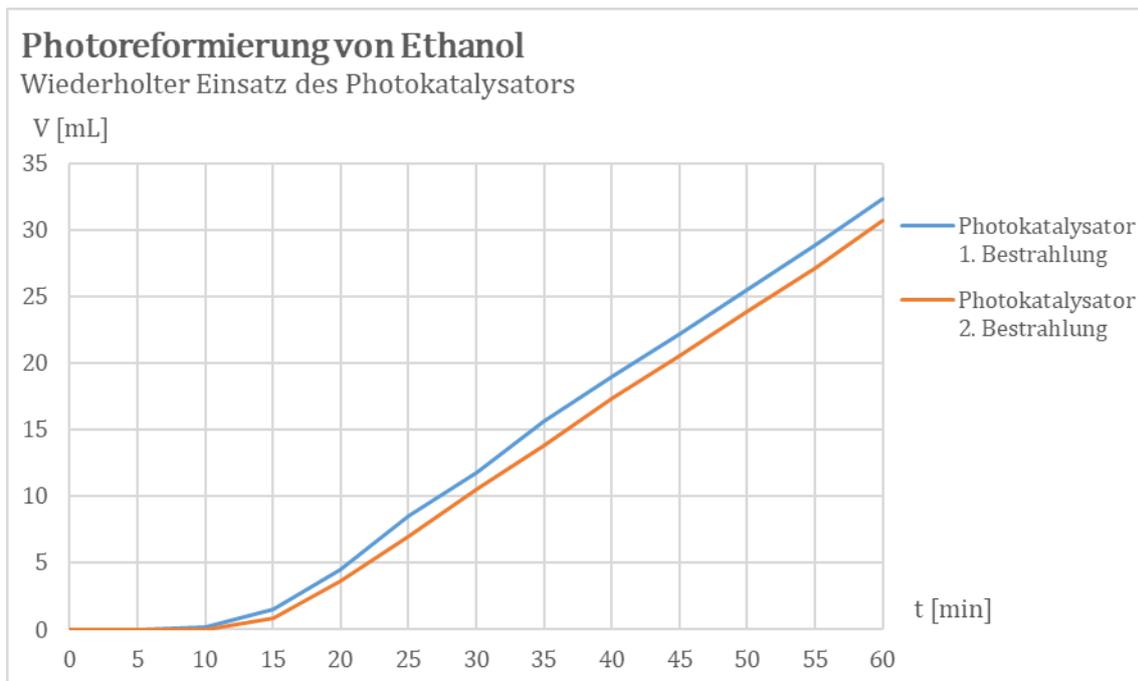


Abb. 39: Vergleich der Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) unter Nutzung von einem nicht bestrahlten und einem bereits bei der Photoreformierung eingesetzten Photokatalysators

5.6.9. Versuchserprobungen mit weiteren Alkoholen und Zuckeralkoholen

Im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit konnten zudem weitere Ergebnisse zur Photoreformierung im kleinen Aufbau generiert werden.⁴⁰⁸ Das Experiment wurde wie in *Kapitel 5.6.2.* beschrieben durchgeführt. Ergänzend wurden die erhaltenen Gasproben nach der Photoreformierung der jeweiligen Substrate gaschromatographisch untersucht.⁴⁰⁹ Verglichen wurden so gleichkonzentrierte Lösung von Methanol, Ethanol und Propanol sowie von Ethylenglycol, Glycerin, Erythrit, Xylit und Sorbit. Die Messwerte zeigen insgesamt die grundlegende Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der Photoreformierung von Alkoholen. Nachvollzogen wurden einerseits die Photoreformierung einwertiger und andererseits mehrwertiger Alkohole.

⁴⁰⁸ Wisser, Photoreformierung zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, S. 10-16.

⁴⁰⁹ Ebd., S. 15-16.

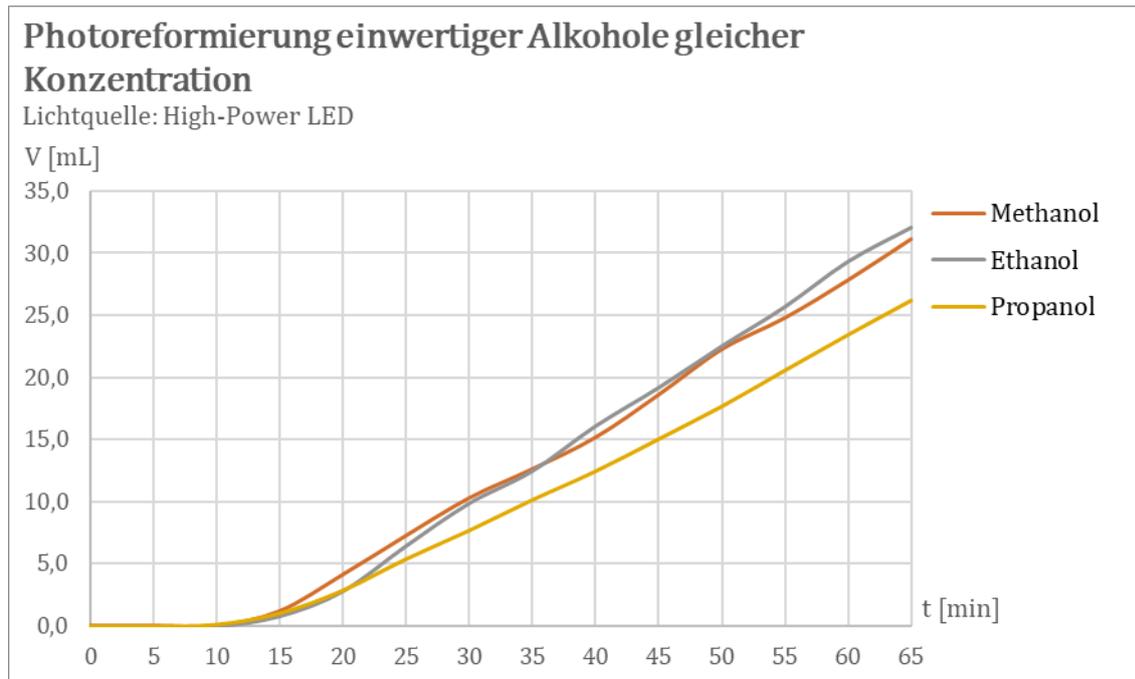


Abb. 40: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Methanol, Ethanol und Propanol mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$.

Der Vergleich zwischen den Bildungsraten von Wasserstoff bei einwertigen Alkoholen (Methanol, Ethanol und Propanol) zeigen, dass Propanol weniger Wasserstoff in gleicher Zeit liefert als Methanol und Ethanol (siehe Abb. 40). Die beiden letztgenannten zeigten in dieser Erprobung nahezu identische Bildungsraten.⁴¹⁰ An dieser Stelle zeigen die Messungen, dass sich eher Tendenzen hinsichtlich der einwertigen Alkohole erkennen lassen, welche bei gleicher Konzentration die höchsten Wasserstoffausbeuten liefern. Unter Berücksichtigung weiterer Messreihen (siehe Abb. 42, Kap. 5.6.10.), können die bereits in Kapitel 3 aufgeführten Forschungsergebnisse zur Photoreformierung von Alkoholen gestützt werden, dass mit zunehmender Größe der Moleküle eine Reduzierung bei der Ausbeute an Wasserstoff zu beobachten ist. Deutlicher als bei der Bestrahlung mit einer High-Power LED zeigt sich dieser Zusammenhang bei der Photoreformierung einwertiger Alkohole mit einer anderen Lichtquelle in Form einer UV-Taschenlampe. Die gaschromatographischen Untersuchungen der Gasproben zeigten in diesem Fall, dass bei allen drei Alkoholen der Anteil bei Wasserstoff über 80 % lag (Methanol 86,5 %, Ethanol 81,4 %, Propanol 98,9 %).

Anders als bei einwertigen Alkoholen ist bei mehrwertigen Alkoholen, die Eignung der Substrate abhängig von der Anzahl der innerhalb der Moleküle vorliegenden Hydroxy-Gruppen (siehe Kap. 3.3.3.). Bei gleichkonzentrierten Lösungen geht im Allgemeinen eine höhere Wasserstoffausbeute mit zunehmender Kettenlänge der Moleküle und steigender Anzahl an Hydroxy-Gruppen einher. Die in Abbildung 41 dargestellten Bildungsraten für Wasserstoff bei der Photoreformierung mehrwertiger Alkohole zeigen jedoch, dass sich für diese Gruppe keine Tendenz erkennen lässt. Auffällig ist, dass Glycerin die höchste

⁴¹⁰ Bei der Untersuchung der genannten Alkohole in einer weiteren Erprobung wurde eine andere Lichtquelle verwendet. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5.6.14. dargestellt. Bei Verwendung dieser Lichtquelle zeigte sich, dass Methanol gegenüber Ethanol die höheren Bildungsraten an Wasserstoff aufweist. Propanol besaß auch hierbei die niedrigste Bildungsrate.

Wasserstoffausbeute liefert. Dass Glycerin eine deutlich höhere Bildungsrate an Wasserstoff als Ethylenglycol besitzt, kann mit der Bindung an den Photokatalysator begründet werden. Glycerin-Moleküle binden laut vorgeschlagenem Reaktionsmechanismus beim direkten Loch-Transfer (*siehe Abb. 12*) über die endständigen Hydroxy-Gruppen an die Photokatalysator-Teilchen. Die gemachten Beobachtungen werden durch die Literatur gestützt (*siehe Kap. 3.3.3.*). Ethylenglycol-Moleküle besitzen hingegen zwei vicinale Hydroxyl-Gruppen, wodurch eine Bindung an die Photokatalysator-Teilchen erschwert werden könnte. Dass jedoch Erythrit, Xylit und Sorbit geringere Wasserstoffausbeuten liefern, lässt sich hierüber nicht erklären. Auch Tendenzen lassen sich bei weiteren Messreihen nicht erkennen (*siehe Anhang*). Die gaschromatographischen Untersuchungen der Gasproben zeigten, dass der Anteil bei Wasserstoff im Überwiegenden sehr hoch war (Ethylenglycol 86,9 %, Glycerin 89,2 %, Erythrit 71,3 %, Xylit 91,3 %, Sorbit 75,2 %).

Beim Vergleich einwertiger und mehrwertiger Alkohole miteinander wird erkennbar, dass einwertige Alkohole bei der Photoreformierung deutlich höhere Ausbeuten an Wasserstoff liefern als mehrwertige Alkohole. Somit konnte experimentell auch der Unterschied zwischen beiden Alkohol-Klassen gezeigt werden (*siehe Abb. 42*). Sie bestätigen die in der Literatur angegebenen Trends bei der Wasserstoffentwicklung unterschiedlicher Substrate (*siehe Kap. 3.3.3.*).

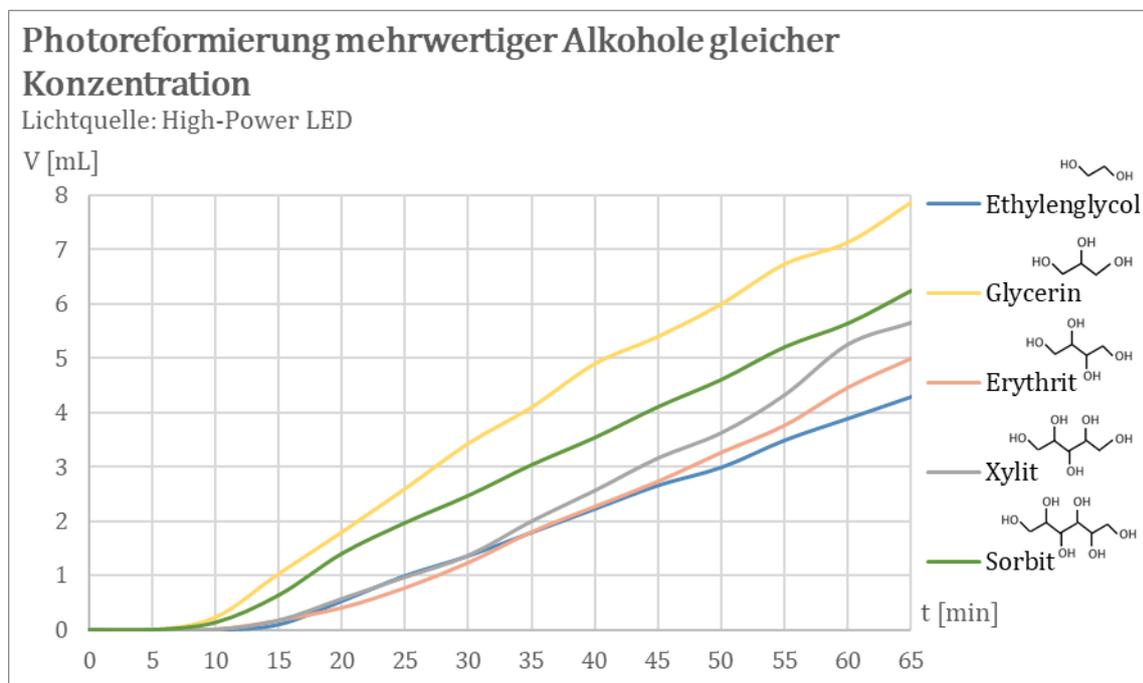


Abb. 41: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethylenglykol, Glycerin, Erythrit, Xylit und Sorbit mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$

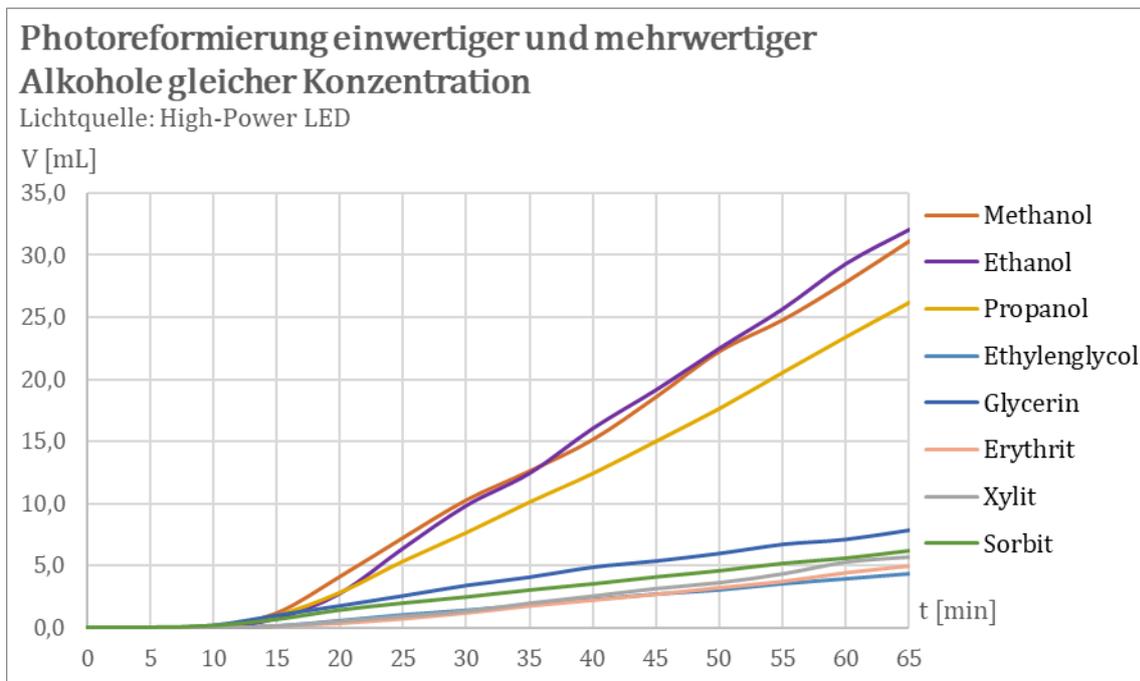


Abb. 42: Gasentwicklung bei der Photoreformierung verschiedener einwertiger und mehrwertiger Alkohole mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$

5.6.10. Versuchserprobungen mit Zuckern

Neben ein- und mehrwertigen Alkoholen konnten auch verschiedene Zucker für die Photoreformierung getestet werden. Hierbei stand der Vergleich der Bildungsraten von Wasserstoff bei zwei unterschiedlichen Aufbauten im Fokus. Wie auch beim ersten Versuchsaufbau wurden im kleineren Aufbau neben Glucose auch Fructose, Lactose und Saccharose⁴¹¹ untersucht. Dadurch konnten zwei Monosacharide und zwei Disaccharide für die Photoreformierung getestet werden, die bei der photokatalytischen Umsetzung von Biomasse als potenzielle Ausgangsstoffe angesehen werden, da sie zum Teil als Lebensmittelabfälle anfallen und zur Wasserstoffgewinnung sinnvoll weiterverwendet werden können.

Zunächst erprobt wurde in dem kleineren Aufbau die Photoreformierung von Glucose. Dazu wurde eine Lösung mit 100 g Glucose pro Liter gewählt. Diese Lösung entspricht einer Konzentration von 0,56 mol/L. Die Konzentration weicht dabei von den erprobten Alkoholen ab, da bei gleicher Konzentration wie die alkoholischen Lösungen ein deutlich höherer Masseanteil an Glucose gelöst werden müsste, ohne dass höhere Gasausbeuten dadurch zu erwarten wären. Die durchschnittliche Gasentwicklung beim Einsatz von Glucose ist in *Abbildung 43* dargestellt. Obwohl die Konzentrationen der eingesetzten Glucose-Lösung nicht identisch sind zu der in *Kapitel 5.6.3.* genutzten Ethanol-Lösung, zeigt sich doch ein deutlicher Unterschied bei den Bildungsraten des Gases bei beiden Substraten, der nicht nur auf Konzentrationsunterschiede zurückzuführen ist. Der deutliche langsamere Prozess der Photoreformierung von Glucose im Vergleich zu Alkoholen lässt sich nachvollziehen.

⁴¹¹ Fructose, Lactose und Saccharose wurden im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit zum Thema Photoreformierung untersucht: Lerlei, Sarah: *Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung. Umsetzung verschiedener Zucker und zuckerhaltiger Lebensmittel*, Masterarbeit, Wuppertal 2020, S. 29-54.

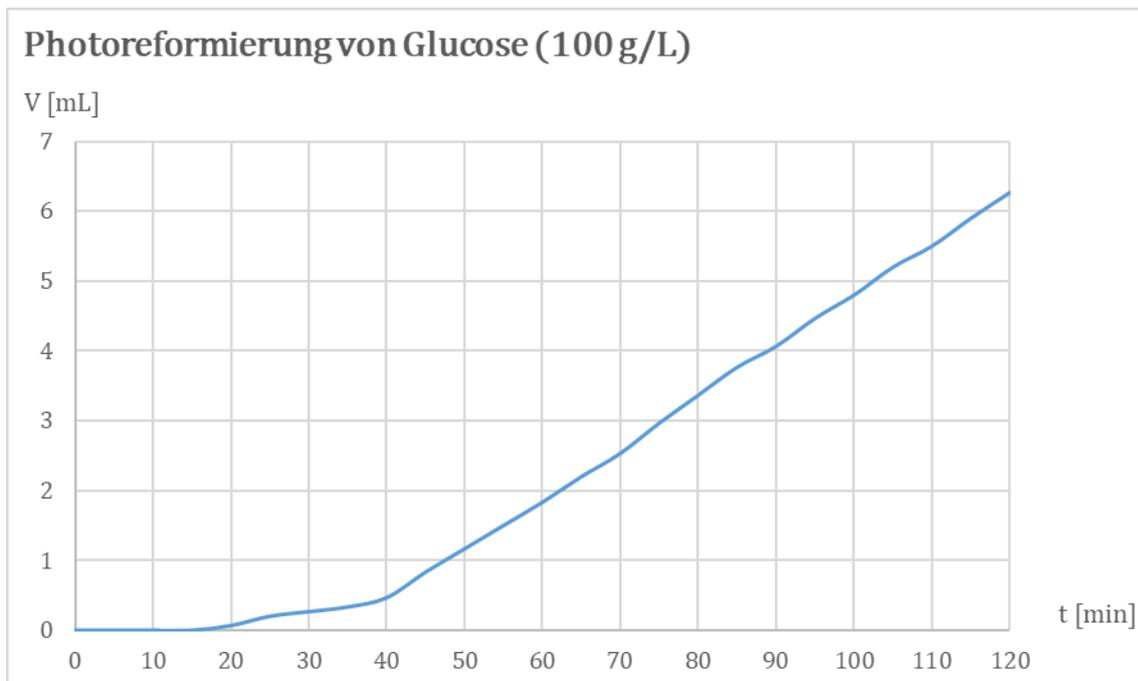


Abb. 43: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L)

Ebenfalls ist bei der Photoreformierung von Glucose zu erkennen, dass auch hier zu Beginn die Bildungsrate an Gas deutlich geringer sind als im weiteren Verlauf der Bestrahlung. Der Anteil an Wasserstoff an der Gasprobe nach 120 Minuten beträgt 83 %. Die Knallgasprobe durchgeführt wie in der Vorschrift beschrieben verläuft positiv mit einem deutlichen Knall. Auch Glucose kann somit zur Photoreformierung in diesem Versuchsaufbau grundsätzlich herangezogen werden. Nachvollziehbar ist ebenfalls die Temperaturabhängigkeit der Reaktion (siehe Abb. 44).

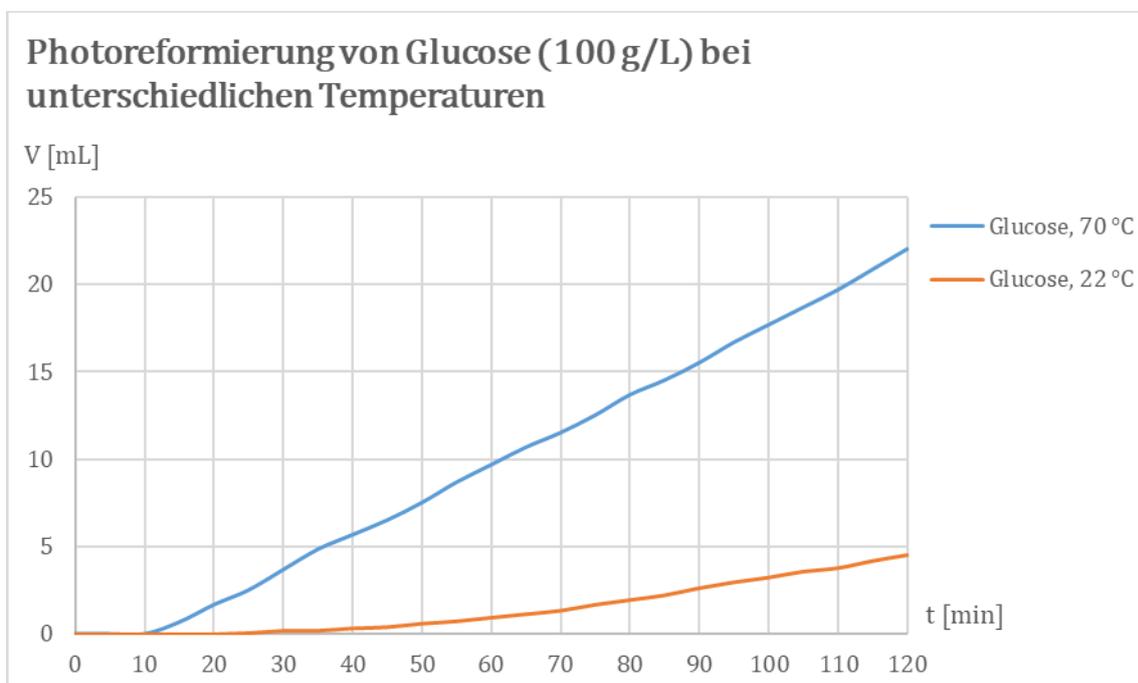


Abb. 44: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L) bei unterschiedlichen Temperaturen

Die Gasausbeute lässt sich deutlich steigern, wenn die Temperatur auf 70 °C erhöht wird. In diesem Fall lassen sich fast fünfmal höhere Mengen an Gas entwickeln. Die die Anteile an Wasserstoff an dem Volumen der Gasprobe unterscheiden sich bei diesen Temperaturen fast nicht, sie liegen zwischen 89,1 % (70 °C) und 90,1 % (22 °C) (siehe digitaler Anhang).

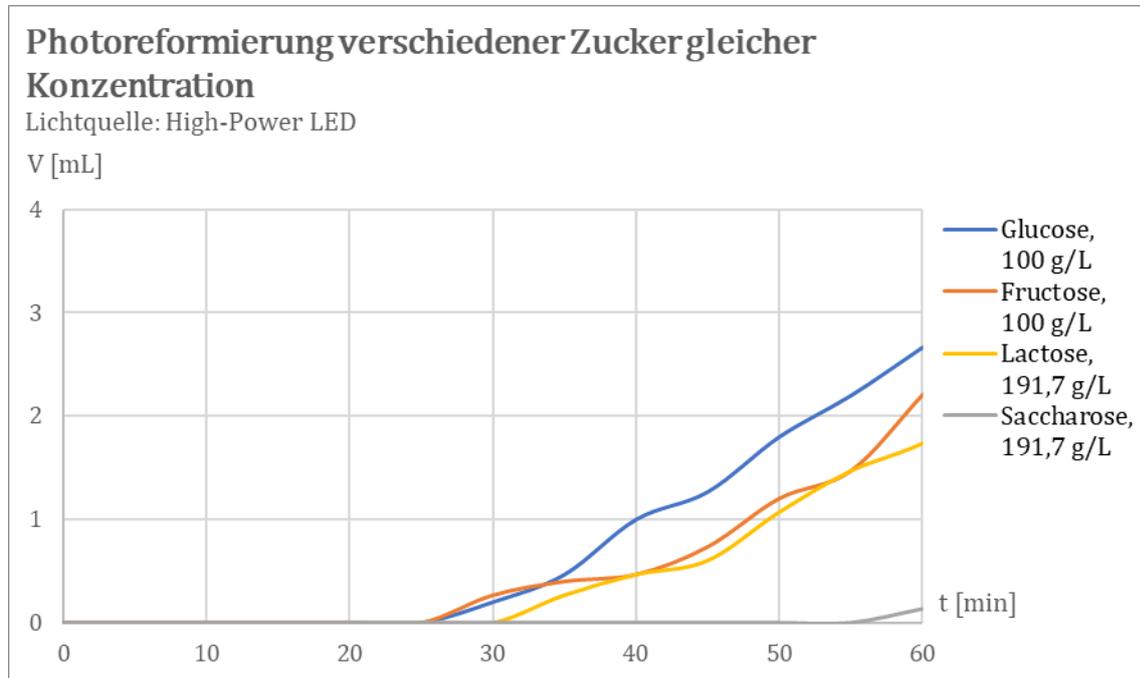


Abb. 45: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L), Fructose (100 g/L), Saccharose (191,7 g/L) und Lactose (191,7 g/L)

Bei der Photoreformierung von Fructose, Lactose und Saccharose⁴¹² lässt sich in diesem Experiment ebenfalls eine Gasentwicklung beobachten. *Abbildung 45* zeigt die Werte beim Einsatz dieser Zucker. Zusätzlich sind auch Messergebnisse zur Photoreformierung von Glucose dargestellt, die ebenfalls im Rahmen der Erprobung ermittelt werden konnten.⁴¹³ Grundlage waren jeweils Lösungen mit gleicher Konzentration ($c = 0,56 \text{ mol/L}$). Deutlich erkennbar sind die relativ ähnlichen Bildungsraten von Gas bei Glucose, Fructose und Lactose. Erheblich geringer sind dazu im Vergleich die Bildungsraten von Gas bei Saccharose. Ein möglicher Grund, warum Saccharose schlechtere Ausbeuten an Wasserstoff aufweist liegt darin, dass es sich um ein Disaccharid handelt. Wegen der räumlichen Struktur der Disaccharid-Moleküle erfolgt bei diesen beim photokatalytischen Abbau zunächst die Aufspaltung in Monosaccharide. Dass jedoch Lactose als Disaccharid ähnliche und nur minimal geringere Bildungsraten aufweist wie die Monosaccharide Glucose und Fructose, kann nicht eindeutig geklärt werden. Darauf hinzuweisen ist zudem, dass die Menge an aufgefangenem Gas in allen Fällen sehr gering ist. Bei Lactose konnte nach 90 Minuten knapp 3,5 mL, bei Saccharose nach 110 Minuten knapp 2 mL aufgefangen werden. Die unterschiedlichen Bildungsraten an Gas bei den einzelnen Zuckern wirkt sich jedoch auch hierbei nicht auf die Wasserstoffanteile in den Gasproben aus. Die Anteile an Wasserstoffgas

⁴¹² Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 38-39.

⁴¹³ Ebd., S. 38.

lagen durchschnittlich zwischen 70 und 90 %, wobei höhere Anteile bei den Monosacchariden (Glucose 88,0 %, Fructose 89,2 %) vorlagen als bei den Disacchariden (Saccharose 72,1 %, Lactose 70,5 %).

5.6.11. Versuchserprobungen mit Stärke

Wie bereits in *Kapitel 3.3.5.* dargestellt sind neben Zuckern auch Polysaccharide wie Stärke ein potentieller Weg, Biomasse zur Photoreformierung heranzuziehen. Die Photoreformierung dieses Substrats sollte auch in dem kleineren Versuchsaufbau nachvollzogen werden und auf eine Eignung als Substrat überprüft werden. Die Ergebnisse zur Untersuchung des Polysaccharids Stärke zeigen, dass auch diese im zuvor beschriebenen Aufbau erfolgreich zu Wasserstoff umgesetzt werden kann. Allerdings ist die Photoreformierung von Stärke mit größeren Schwierigkeiten verbunden als die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Substrate.

Erste Erprobungen mit Stärke zeigten nach sechsständiger Bestrahlungszeit, dass lediglich kleinere Gasblasen am Reagenzglasrand unterhalb des aufgesetzten Stopfens zu sehen waren. Im Rahmen weiterer Erprobungen⁴¹⁴ wurde ebenfalls eine Stärke-Lösung (100 g/L) gewählt, die einer Vorbehandlung unterzogen wurde. Diese Vorbehandlung sollte dazu dienen, das Polysaccharid durch Hydrolyse oder enzymatischen Abbau in Glucose zu überführen, mit der die Photoreformierung wie bereits gezeigt gelingt. Dazu wurde in einem ersten Versuch lösliche Stärke mit einer Salzsäure-Lösung ($c = 1 \text{ mol/L}$) versetzt und erhitzt, um den Lösungsprozess zu beschleunigen. Die so vorbehandelte Stärke-Lösung (100 g/L) wurde anschließend zur Photoreformierung herangezogen. Auch nach 120 Minuten konnte keine Gasentwicklung beobachtet werden.⁴¹⁵ In einem weiteren Versuch wurde die Stärke-Lösung eine enzymatische Vorbehandlung unterzogen. Daher wurde anstelle von reiner Amylase Speichel herangezogen, in dem anteilig Amylase vorkommt. Allerdings zeigte sich auch hierbei nach der Bestrahlung der Suspension nach 120 Minuten keine Gasentwicklung.⁴¹⁶ Damit scheinen die durchgeführten Vorbehandlungen nicht ausreichend zu sein, um die Stärke genügend stark abzubauen. Die Konzentrationen an Glucose sind so gering, dass die Photoreformierung nicht in diesem Maße stattfinden kann, wie bei der Photoreformierung des Reinstoffs Glucose in einer Lösung. Als weitere Option, die zur Erhöhung von Gasausbeuten bei der Photoreformierung führt, wurde die Steigerung der Temperatur vorgeschlagen, die in einem weiteren Versuch erprobt wurde.⁴¹⁷

⁴¹⁴ Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 40.

⁴¹⁵ Ebd.

⁴¹⁶ Ebd.

⁴¹⁷ Ebd.

Erst bei erhöhten Temperaturen konnte eine Gasentwicklung erzielt werden, die eine weitere Untersuchung der Gasproben ermöglichte. Wie bereits bei Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur auf die Photoreformierung wurde der erweiterte Aufbau mit einem Wasserbad genutzt. *Abbildung 46* stellt die Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Stärke (100 g/L) bei 70 °C dar. Bei diesen Temperaturen konnte nach 60 Minuten eine Gasmenge von durchschnittlich etwa 4 mL aufgefangen werden. Nach einer Abkühlungszeit von 15 Minuten reduzierte sich das Gasvolumen leicht. Die Untersuchung dieser Gasprobe ergab, dass der Anteil an Wasserstoff in den Proben mit 98 % sehr hoch lag (*siehe digitalerAnhang*).⁴¹⁸ Die Photoreformierung von Stärke ist zeitintensiver als die Nutzung anderer Substrate wie Monosaccharide oder Alkohole. Damit konnten sowohl die in der Literatur beschriebenen Trends (*siehe Kap. 3.3.5.*) bestätigt werden als auch, dass die Photoreformierung von Stärke in dem konzipierten Versuchsaufbau grundsätzlich durchführbar ist.

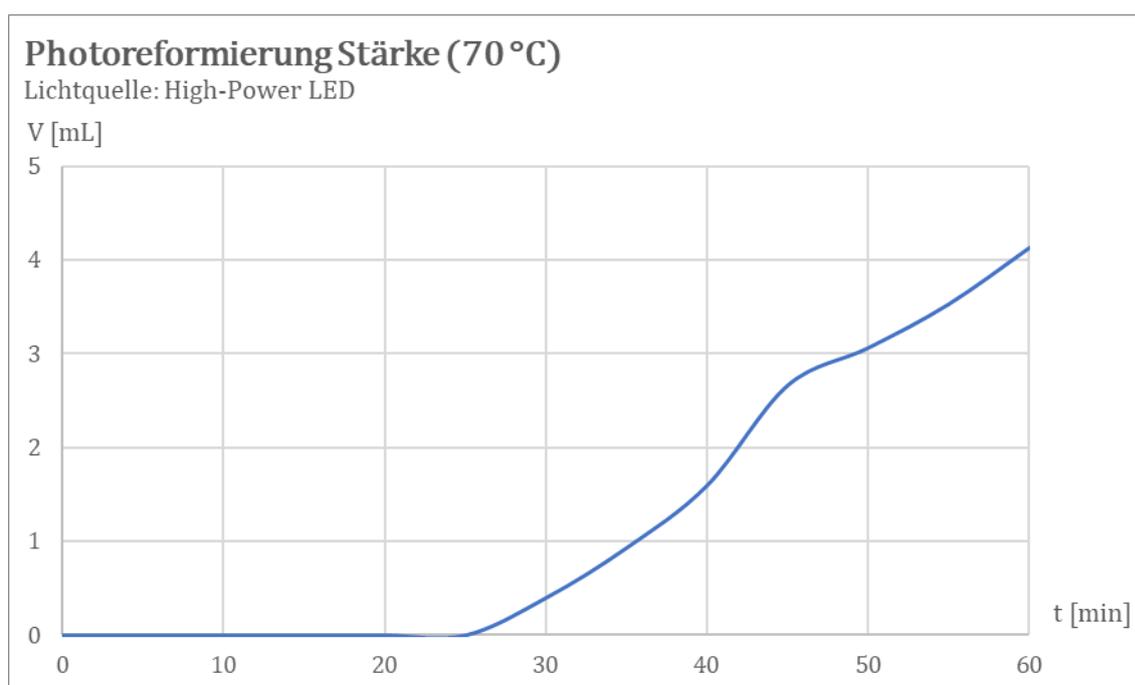


Abb. 46: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Stärke (100 g/L) bei 70 °C

5.6.12. Versuchserprobungen mit Cellulose

In der Absicht, neben wasserlöslichen Substanzen wie Alkoholen und Zuckern auch wasserunlösliche Stoffe wie Cellulose, die in der Forschung als zukunftsweisendes Substrat für die Photoreformierung von Biomasse herangezogen werden, zu nutzen, wurde auch Cellulose als Substrat im beschriebenen Versuchsetting getestet.

In einem Vorversuch wurde zuerst mikrokristalline Cellulose in Wasser suspendiert und mit dem Photokatalysator versetzt. Bei der anschließenden Bestrahlung konnte erwartungsgemäß keine Gasentwicklung beobachtet werden, da zur photokatalytischen Umsetzung organischer Substanzen diese in Wasser gelöst vorliegen müssen. Die Photoreformierung von Cellulose ist ohne Vorbehandlung nicht möglich.

⁴¹⁸ Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 43-44.

Zum Aufschluss der Cellulose wurden zwei Ansätze erprobt. Bei der ersten Variante wurde zur Vorbehandlung konzentrierte Schwefelsäure eingesetzt, bei der zweiten Variante sollte der Aufschluss enzymatisch erfolgen. Für den enzymatischen Abbau der Cellulose wurde ein im Gartenzubehör-Handel erhältliches Cellulase-Extrakt⁴¹⁹ gewählt. In beiden Versuchsansätzen wurden zuerst 2 g mikrokristalline Cellulose in 50 mL Wasser suspendiert. Anschließend wurden 5 mL Schwefelsäure bzw. 50 mL des flüssigen Cellulase-Extrakts hinzugegeben und für einen Tag unter Rühren stehen gelassen. Danach wurden jeweils 50 mg des Photokatalysators hinzugegeben und für drei Minuten in ein Ultraschallbad gesetzt. Die Bestrahlung der Suspensionen erfolgte über acht Stunden. Beim Einsatz der konzentrierten Schwefelsäure wurden 2 g mikrokristalline Cellulose mit 5 mL der Säure übergossen. Nach 30 Minuten wurden 100 mL Wasser hinzugegeben. Die entstandene Suspension wurde mit 50 mg des Photokatalysators versetzt.

Nach acht Stunden Bestrahlung waren beim Ansatz mit der Schwefelsäure wenige, etwa 1 mm große Gasblasen im oberen Bereich des Reagenzglases zu sehen. Der Spritzenstempel war an gleicher Stelle verblieben. Gas war nicht aufgefangen worden. Beim Ansatz mit dem Cellulase-Extrakt konnten nach acht Stunden knapp 0,5 mL eines Gases aufgefangen werden. Zudem waren auch hier einige Gasblasen am Rand des Reagenzglases im oberen Drittel zu beobachten. Die aufgefangene Menge an Gas war jedoch so gering, dass keine gaschromatographischen Untersuchungen erfolgen konnten.

Dass es sich bei den geringen Mengen aufgefangenen Gases bei der zweiten Variante um Wasserstoff handelt, lässt sich nur spekulieren. Da allerdings auch bei manchen Versuchsansätzen anderer Substrate, die ebenfalls keine Gasentwicklung erkennen ließen, nicht einmal Glasbläschen am Rand des Reagenzglases zu sehen waren, lässt allenfalls erahnen, dass die Gasentwicklung bei der Photoreformierung der mit Cellulase-Extrakt versetzten Cellulose auf Prozesse der Photoreformierung zurückzuführen sein können. Es ist auch nicht auszuschließen, dass mögliche Begleitstoffe des Cellulase-Extrakts selbst während der Photoreformierung umgesetzt wurden, wodurch eine leichte Gasentwicklung ebenfalls erklärt werden könnte.

Insgesamt zeigt sich, dass die Photoreformierung von Cellulose eine Herausforderung an die Photoreformierung stellt, was sowohl in der Literatur als auch in der experimentellen Erprobung sehr deutlich wird. Mögliche Aufschlussverfahren in der hier vorgestellten Vorgehensweise scheinen nicht in dem Umfang Stoffe wie Zucker zu bilden, die wesentlich leichter photokatalytisch umgesetzt werden können. Die Möglichkeiten des Einsatzes von Substraten wie Cellulose, die als Biomasse einen vielversprechenden Ansatz bieten, „grünen“ Wasserstoff liefern zu können, sind auch in Bezug auf einen potentiellen Einsatz im Rahmen des naturwissenschaftlichen Unterrichts fraglich. Sowohl die langen Zeiträume der Bestrahlung als auch der geringe Erfolg bei der Ausbeute an Wasserstoff sowie der Einsatz konzentrierter Schwefelsäure sind Faktoren, die berücksichtigt werden müssen.

⁴¹⁹ Hierbei handelt es sich um HESI Power Zyme, ein flüssiges Cellulase-Extrakt aus dem Trichodermapilz, der laut Hersteller die Cellulose abgestorbener Pflanzenteile zu Zuckern abbaut. Das Cellulase-Extrakt dient als reiner Bodenhilfsstoff und besitzt daher nahezu keine weiteren Nährstoffkomponenten. Letzter Punkt ist dahingehend entscheidend, dass anzunehmen war, dass nur wenige weitere Stoffe enthalten sind, die sich eventuell hemmend auf die Photoreformierung auswirken würden.

5.6.13. Versuchserprobungen mit anderen Naturstoffen und Lebensmitteln

Um auch die Nutzung von Biomasse - im weitesten Sinn - für die Photoreformierung experimentell nachzuvollziehen, wurden zudem verschiedene Produkte aus dem Lebensmittelbereich als Grundlage für Substratlösungen erprobt. Anhand ausgewählter Produkte sollte die Photoreformierung mit ihnen durchgeführt werden, um herauszufinden, inwieweit Stoffgemische wie sie in Lebensmitteln häufig zu finden sind, auch für die Photoreformierung herangezogen werden können. Untersucht wurden neben alkoholischen Getränken wie Rot- und Weißwein, weitere Spirituosen und verschiedene zuckerhaltige Produkte wie Honig, Traubensaft oder pflanzliche Sirups. Die zuckerhaltigen Lebensmittel wurden im Rahmen einer betreuten Abschlussarbeit⁴²⁰ in der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal erprobt. Die hierbei erhaltenen Ergebnisse sind auch in diesem Kapitel dargestellt. Wie in *Kapitel 3.3.3.* dargestellt, können bereits Stoffgemische aus zwei unterschiedlichen Alkoholen, die als Reinstoffe miteinander gemischt wurden, einen starken Einfluss auf die Ausbeute an Wasserstoffgas nehmen. Da es sich bei Produkten aus dem Lebensmittelbereich fast immer um Stoffgemische handelt, die eine Vielzahl an Komponenten in sich tragen, war bei der Erprobung mit geringeren Ausbeuten an Wasserstoff zu rechnen.

Zunächst wurden Rot- bzw. Weißwein als Substrat-Lösungen genutzt. Die Weine wurden mit dem Photokatalysator (50 mg) versetzt und nach drei Minuten im Ultraschallbad mit einer High-Power-LED unter Rühren bestrahlt. Bei Rotwein setzten sich nach wenigen Minuten der Bestrahlung die suspendierten Partikel im unteren Drittel ab. In den oberen zwei Dritteln war eine klare, rote Lösung zu sehen. Im Verlauf der 60-minütigen Bestrahlung war keine Gasentwicklung zu beobachten. Der im Anschluss abfiltrierte Photokatalysator besaß eine grau-dunkelrote Farbe. Beim Weißwein konnten ähnliche Beobachtungen wie beim Rotwein gemacht werden. Auch hier setzten sich die suspendierten Partikel nach etwa einer Viertelstunde im unteren Teil des Reagenzglases ab. Eine Gasentwicklung war auch hier nicht zu erkennen. Der Photokatalysator besaß nach dem Abfiltrieren und Trocknen eine tiefgraue Farbe. Dass die beiden Weine nicht für die Photoreformierung geeignet waren, lässt sich aufgrund der gemachten Beobachtungen auf weitere Inhaltsstoffe im Wein zurückführen. Da sowohl der Rot- (11 Vol. % Ethanol) als auch der Weißwein (10 Vol. % Ethanol) allein auf ihren Alkoholgehalt in wässriger Lösung bezogen für die Photoreformierung geeignet gewesen wären, sind die Gründe, warum keine Gasentwicklung zu beobachten war, in den weiteren Bestandteilen zu suchen. Dass beide Weintypen nicht für die Photoreformierung geeignet sind, ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Inhaltsstoffe wie Tartrate und im Falle des Rotweins auch Farbstoffe mit dem Photokatalysator wechselwirken bzw. an ihn binden. Dadurch wird die aktive Oberfläche am Photokatalysator für die Oxidationsprozesse reduziert. Erkennbar ist dies durch die Verfärbung und das Absetzen des Photokatalysators im unteren Bereich des Reagenzglases. Auch bei anderen Trinkalkoholen, die für das Experiment herangezogen wurden, zeigten sich ähnliche Ergebnisse. Sowohl farbloser Rum,⁴²¹ als auch farbloser Brandwein, die sowohl

⁴²⁰ Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 32-54.

⁴²¹ Wisser, Photoreformierung zur Erzeugung von grünem Wasserstoff, S. 13.

nicht verdünnt als auch mit Wasser auf etwa 10 Vol. % Alkoholanteil verdünnt wurden, brachten keine erkennbare Gasentwicklung.

Als zuckerhaltige Lebensmittel, die in dem Experiment genutzt wurden, waren als Flüssigkeit Traubensaft sowie als Feststoffe bzw. viskose Lösungen Dextro-Energy, Agavendicksaft, Blütenhonig, Reissirup, Ahornsirup und Zuckerrübensirup gewählt worden.⁴²² Die Feststoffe oder stark viskosen Lösungen wurden in Wasser gelöst. Nach Zugabe des Photokatalysators (50 mg) wurde die Suspension für drei Minuten in ein Ultraschallbad gegeben und anschließend unter magnetischem Rühren mit einer High-Power LED bestrahlt.

Die während der Bestrahlung gemessenen Gasvolumina sind in *Abbildung 47* dargestellt. Bei Traubensaft, Ahornsirup und Zuckerrübensirup als Substrate konnte keine Gasentwicklung beobachtet werden. Bei Lösungen mit Dextro-Energy und Agavendicksaft zeigte sich eine schnellere Gasentwicklung als bei Lösungen mit Blütenhonig und Reissirup. Bei der Untersuchung der Gasproben mittels Gaschromatographen ließen sich die größten Anteile an Wasserstoffgas bei Dextro-Energy (72,4 %) und Agavendicksaft (85,8 %) feststellen. Geringer waren die Anteile bei Blütenhonig (64,2 %) und Reissirup (66,2 %).⁴²³ Die Unterschiede bei den Anteilen an Wasserstoffgas entstehen vermutlich dadurch, dass die gebildeten Gasproben vom Volumen her geringer sind als bspw. bei den Gasproben bei der Photoreformierung von Alkoholen. Auffällig ist zudem, dass bei der Photoreformierung von Blütenhonig und Reissirup bei geringen Volumina die Anteile an Wasserstoff geringer sind. Bedingt durch die kleineren Volumina sind hier auch Fehler durch mögliche Totvolumen größer, die überwiegend in den Übergängen zwischen den aufgesetzten Stopfen mit dem Kolben der 1 mL-Spritze und der darüber positionierten Spritze.

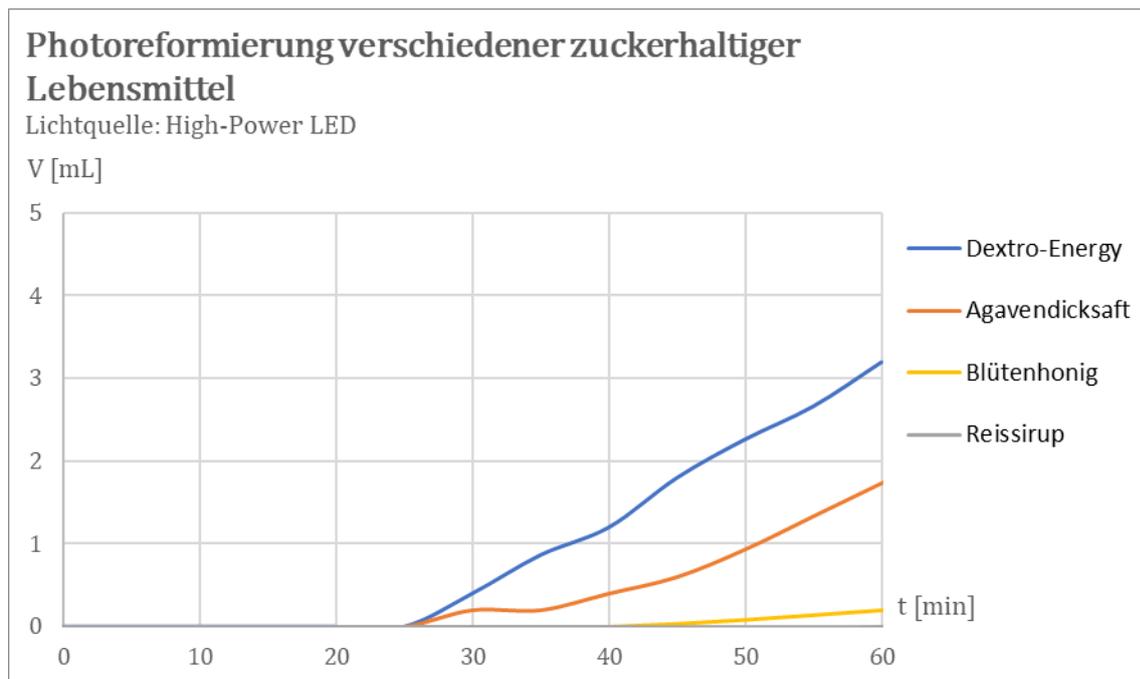


Abb. 47: Gasentwicklung bei der Photoreformierung unterschiedlicher zuckerhaltiger Lebensmittel

⁴²² Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 32.

⁴²³ Die Ergebnisse bei der Verwendung der Darkbeam Pro-Max 40 sind im Anhang dargestellt. Sie sind teilweise geringer oder gleichwertig mit den hier beschriebenen Messwerten.

Die gaschromatografischen Untersuchungen zeigen, dass bei allen Substrat-Lösungen, bei denen eine Gasentwicklung zu beobachten war, auch Wasserstoff entstanden ist. Dass die Anteile zum Teil deutlich geringer sind als bei vergleichbaren Messungen von Gasproben, die bei der Photoreformierung von Alkoholen erhalten wurden, lässt sich vermutlich damit begründen, dass die Mengen an Gas bei Einsatz der Lebensmittel erheblich geringer sind.

Die unterschiedlichen Bildungsrate von Gas bei den einzelnen Lebensmitteln können auf die unterschiedlichen Zusammensetzungen zurückgeführt werden. Anders als bei Reinstoffen weisen die genannten Lebensmittel nicht nur ein Gemisch aus verschiedenen Mono- oder Disacchariden, sondern auch eine Vielzahl weiterer Begleitstoffe auf. Wie bereits in *Kapitel 5.6.10.* experimentell gezeigt werden konnte, sind die Gasausbeuten bei der Photoreformierung davon abhängig, welche Zucker vorliegen. Die höchsten Gasausbeuten nach 60 Minuten sind bei dem Einsatz von Dextro-Energy als Substrat zu erkennen. Das Produkt enthält laut Herstellerangaben zu 73 % Glucose, die damit den mit Abstand größten Anteil bildet. Weitere 9 % sind Maltodextrin,⁴²⁴ welches aus Glucose-Einheiten besteht, die als Di-, Oligo- oder Polysaccharide verknüpft sind. Somit kann überwiegend Glucose zur photokatalytischen Umsetzung herangezogen werden. Dadurch sind bei gleichen Konzentrationen der Substrat-Lösungen die Bildungsrate an Gas bei Dextro-Energy und dem Reinstoff Glucose annähernd vergleichbar (*siehe Kap. 5.6.10.*). Bei Agavendicksaft ist der Anteil an Zucker mit 75 g/100 g angegeben.⁴²⁵ Bei diesem Zucker handelt es sich um Fructose. Damit ist auch der Hauptbestandteil dieser Zuckerlösungen ein Monosaccharid, das photokatalytisch umgesetzt werden kann. Er lieferte nach 90-minütiger Bestrahlung etwas mehr als 4 mL Gas. Bei Blütenhonig handelt es sich um ein Zuckergemisch aus Fructose und Glucose (75 g/100 g,) bei Reissirup um ein Gemisch aus Glucose und Maltose (53 g/100 g).⁴²⁶ Es ist nicht auszuschließen, dass sich ähnlich wie bei Alkoholen Stoffgemische aus unterschiedlichen Zuckern die Photoreformierung einschränken, sodass im Allgemeinen bei den genutzten Lebensmitteln niedrigere Ausbeuten an Gas und somit auch Wasserstoff vorliegen (Blütenhonig nach 200 Minuten: 3,3 mL; Reissirup nach 200 Minuten: 2,1 mL).

Dass sowohl Traubensaft als Substrat-Lösung und Lösungen mit Ahornsirup und Zuckerrübensirup nicht für die Photoreformierung geeignet sind, kann verschiedene Gründe haben. Bei Traubensaft sind ähnliche Probleme anzunehmen, wie bei der Verwendung von Rotwein als Substrat-Lösung. Farbstoffe wie Anthocyane können auch hierbei an den Photokatalysator binden und dadurch die Photoreformierung deutlich einschränken oder unterbinden. Ahornsirup und Zuckerrübensirup sind wiederum hochviskose Flüssigkeiten mit einer starken Eigenfärbung. Auch die angesetzten Lösungen besaßen eine deutliche braune Färbung. Dadurch kann die Absorption von Licht deutlich behindert werden. Dadurch können die notwendigen Prozesse am Photokatalysator nicht eingeleitet werden und damit kein Wasserstoff gebildet werden.

⁴²⁴ Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 35-36.

⁴²⁵ Ebd.

⁴²⁶ Ebd.

5.6.14. Variation der Lichtquellen

Bei allen in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Versuchen zur Photoreformierung wurden mit der High-Power LED die gleiche Lichtquelle herangezogen. Beabsichtigt wurde jedoch auch, weitere Lichtquellen zu erschließen, die im Rahmen dieses Versuchs zum Einsatz kommen können. Gesucht war eine Lichtquelle, mit der die Photoreformierung von Substraten wie Ethanol und Glucose in einem vergleichbaren zeitlichen Rahmen durchführbar ist und die gleichzeitig kostengünstiger in der Anschaffung ist als die High-Power LED. Damit sollten auch die Rückmeldungen der Lehrkräfte während der praktischen Erprobungen Berücksichtigung finden, die die hohen Kosten für eine Umsetzung im Chemieunterricht als hinderlich ansahen (*siehe Kap. 6.8.2.*). Da zwar die im großen Versuchsaufbau verwendete und mit ca. 40 € in der Anschaffung deutlich preisgünstigere Ultravitalux-Lampe auch für die Photoreformierung genutzt werden kann, jedoch in der Handhabung zahlreiche Schwierigkeiten auftreten, wurden weitere Alternativen gesucht.

Eines der entscheidendsten Merkmale von einsetzbaren Lichtquellen bei der Photoreformierung ist das Spektrum der emittierten Strahlung. Der Emissionsbereich sollte mindestens im nahen UV-Bereich liegen, um so dem Absorptionsmaximum des eingesetzten Photokatalysators auf Basis von Titandioxid (365 nm) zu entsprechen. Sowohl die Ultravitalux-Lampe als auch die High-Power LED besitzen in diesem Spektralbereich einen Emissionspeak bei 366 nm bzw. bei 369 nm.⁴²⁷ Da andere LED-Taschenlampen wie die SiDiOU: SDO-UV365⁴²⁸ und die WESLITE: WS_LT_SK68_365,⁴²⁹ die ebenfalls in diesem Bereich ihr Emissionsmaximum besitzen, wurden diese für die Photoreformierung ebenfalls getestet, da alle Varianten kleinformatig und günstig in ihrer Anschaffung sind. Allerdings konnte bei beiden keine Gasentwicklung beobachtet werden. Auch die Nutzung von mehreren Taschenlampen des gleichen Typs (insgesamt vier parallel eingesetzt) lieferten innerhalb von einer Stunde kein Gas. Längere Bestrahlungen von vier Stunden zeigten das gleiche Ergebnis. Da es sich bei den zwei Lichtquellen um Taschenlampen mit geringen Leistungen handelt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Mindest-Leistung gegeben sein muss, damit die Photoreformierung erfolgreich durchgeführt werden kann.

Als Variante einer leistungsstarken Lichtquelle in Form einer Akku-betriebenen Taschenlampe, die für die Photoreformierung herangezogen werden konnte, erwies sich die Darkbeam Pro-Max B 40.⁴³⁰ Mit ihr konnte während der Bestrahlung verschiedener Substrat-Lösungen ebenfalls Wasserstoff entwickelt werden. Die Taschenlampe bietet den Vorteil, dass sie wie auch die eingesetzten High-Power LED einen kleinen Lichtkegel besitzt, der gezielt auf die zu bestrahlende Suspension im Reagenzglas ausgerichtet werden kann, ohne dass allzu viel Strahlung die direkte Umgebung beleuchtet.

⁴²⁷ Die konkreten Emissionsspektren sind im Anhang hinterlegt.

⁴²⁸ Hierbei handelt es sich um eine Taschenlampe des Herstellers SiDiOU mit einer angegebenen Wellenlänge von 365 nm als Emissionsmaximum. Experimentell wurde das Emissionsmaximum bei 370 nm nachgewiesen (Zeller, Didaktische Erschließung von Titandioxid für den Chemieunterricht, S. 94).

⁴²⁹ Hierbei handelt es sich um eine Taschenlampe des Herstellers WESLITE mit einer angegebenen Wellenlänge von 365 nm als Emissionsmaximum. Experimentell wurde das Emissionsmaximum bei 374 nm nachgewiesen.

⁴³⁰ Der Emissionspeak der Darkbeam B40 Pro Max liegt bei 370 nm. Das Emissionsspektrum der Taschenlampe ist ebenfalls im Anhang hinterlegt.

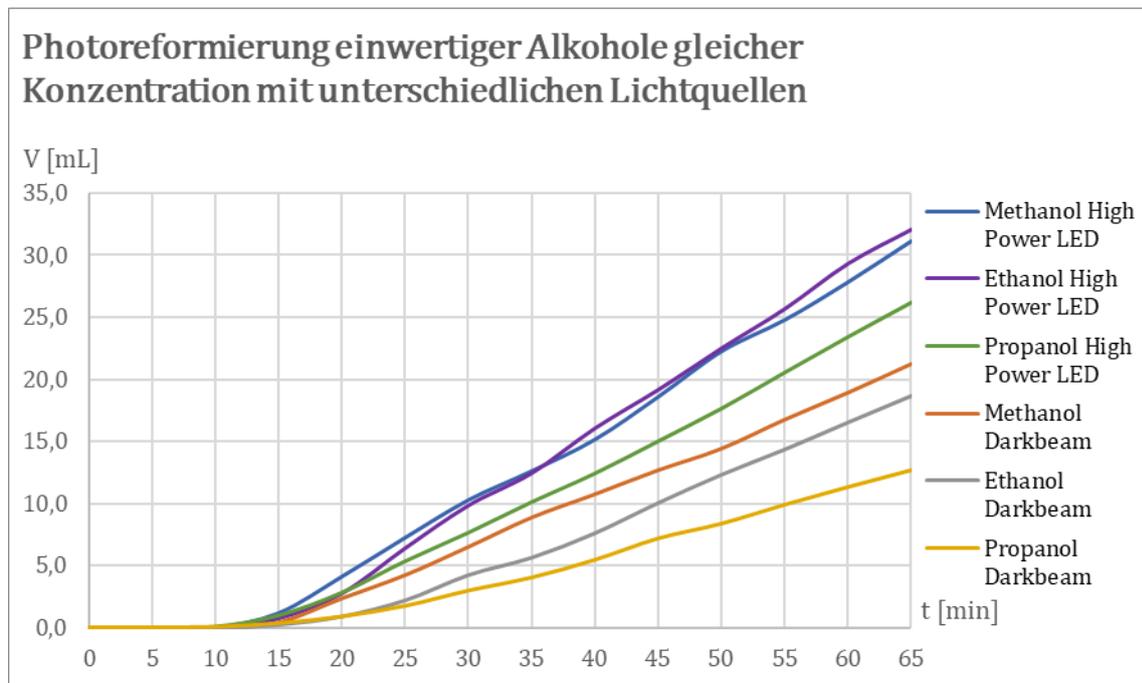


Abb. 48: Gasentwicklung bei der Photoreformierung einwertiger Alkohole mit der Konzentration $c = 1,71$ mol/L bei der Nutzung unterschiedlicher Lichtquellen

Während der Bestrahlung gleichkonzentrierter Alkohol-Lösungen in einem Zeitraum von 65 Minuten zeigt sich im Vergleich der Wasserstoffausbeuten, dass mit der High-Power LED höhere Ausbeuten zu erzielen sind als mit der Darkbeam (siehe Abb. 48). Ähnliche Trends, jedoch in abgeschwächter Form ließen sich auch bei der Photoreformierung von Zuckern⁴³¹ (siehe Abb. 49), zuckerhaltigen Lebensmitteln⁴³² (siehe digitaler Anhang) und Stärke⁴³³ (siehe digitaler Anhang) beobachten. Allerdings sind auch die Gasmengen, die während der Photoreformierung entstehen, bei beiden Lichtquellen geringer als bei der Photoreformierung von Alkoholen. Dadurch bedingen sich stärkere Schwankungen, die durch das Ablesen der Gasmengen in der aufgesetzten Spritze entstehen.

Zwar sind die Wasserstoffausbeuten bei der Nutzung der Darkbeam geringer als bei der Verwendung einer stärkeren Lichtquelle, jedoch ist die erhaltene Menge an Wasserstoffgas bei Substraten wie Ethanol oder Glucose in einem zeitlichen Rahmen, der auch für Schule und das dortige Stundenraster realisierbar erscheint. Nachteilig ist jedoch, dass insgesamt nur sehr geringe Gasmengen gebildet werden. Zudem zeigt sich, dass der Anteil an Wasserstoff in der Gasprobe bei allen Lichtquellen mit wenigen Ausnahmen vergleichbar hoch über 80 % ist (siehe digitaler Anhang). Es kann also davon ausgegangen werden, dass bei jeder Lichtquelle, die eine Gasentwicklung während der Bestrahlung bewirkt, ein ähnlich hoher Anteil an Wasserstoff in der Gasprobe vorliegt.

⁴³¹ Lerlei, Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung, S. 38-39.

⁴³² Ebd., S. 41-42.

⁴³³ Ebd., S. 40.

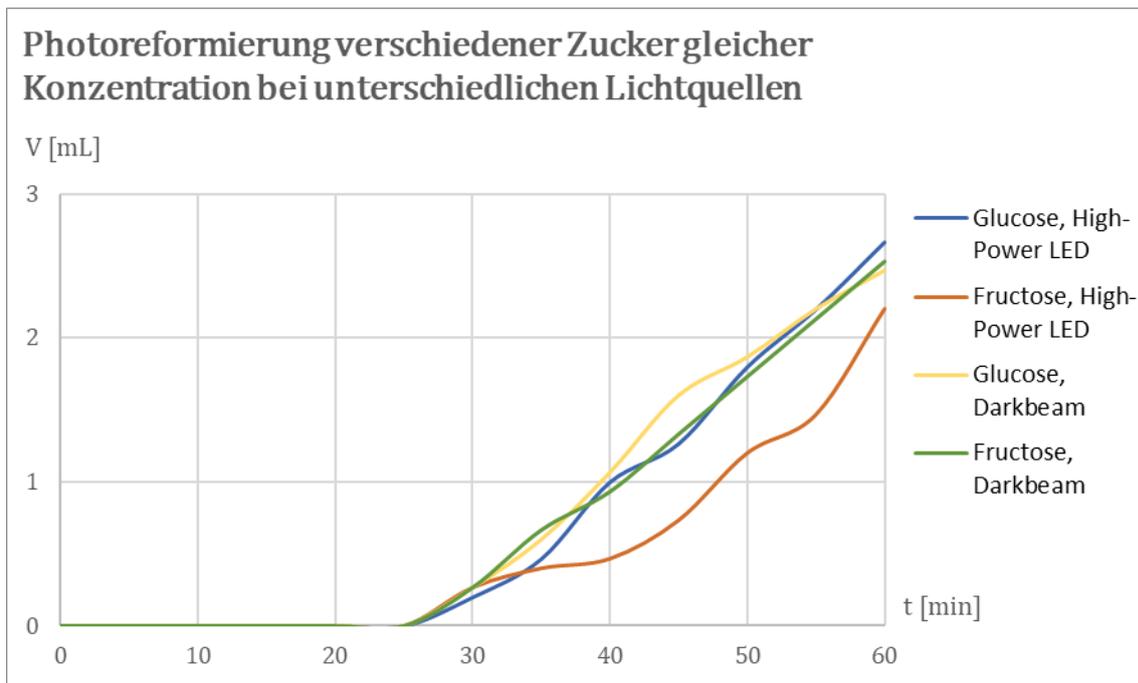


Abb. 49: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose und Fructose ($c = 0,56 \text{ mol/L}$) bei der Nutzung unterschiedlicher Lichtquellen

5.6.15. Unterschiede bei der Nutzung von Quarz- und Borosilicatglas

Experimentell ermittelt wurde neben der Wirkung verschiedener Lichtquellen auch der Einfluss der Glasart der genutzten Reagenzgläser auf die Wasserstoffausbeute bei der Photoreformierung. Gegenüber klassischen Laborgläsern aus Borosilicatglas besitzen Quarzgläser eine hohe Durchlässigkeit für elektromagnetische Strahlung im UV-Bereich.⁴³⁴ Untersucht wurde zunächst mit dem beschriebenen Aufbau die Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) über einen Bestrahlungszeitraum von 60 Minuten. Die Gasentwicklung ist in *Abbildung 50* dargestellt. Neben Ethanol wurde auch Glucose (100 g/L) in diesem Aufbau mit den zwei unterschiedlichen Glasarten getestet. Nach 270 Minuten der Bestrahlung entstanden durchschnittlich 6,2 mL Gas bei der Verwendung von Borosilicatglas, bei Quarzglas entstanden durchschnittlich 12,5 mL Gas.

⁴³⁴ Wöhrle, Dieter; Tausch, Michael W.; Stohrer, Wolf-Dieter: *Photochemie. Konzepte, Methoden, Experimente*, Weinheim (u.a.): Wiley-VCH 1998, S. 315.

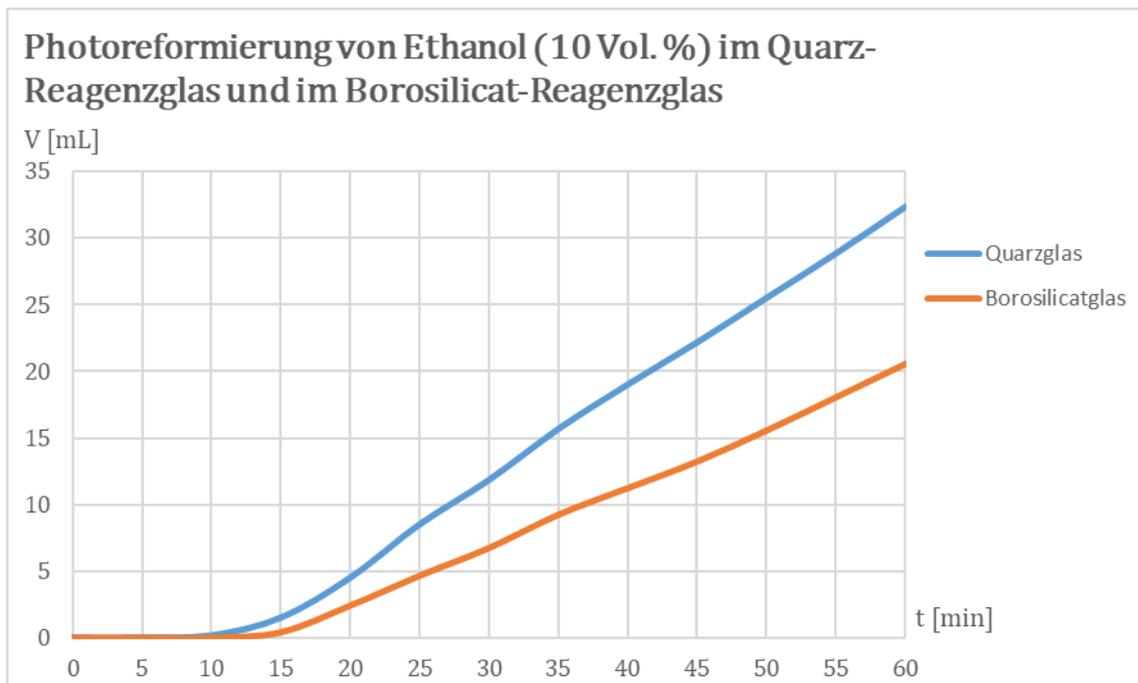


Abb. 50: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) in unterschiedlichen Reagenzgläsern

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass die Gasentwicklung bei der Variante, in der Quarzreagenzgläser eingesetzt wurden, um etwa 36-50 % höher ist als bei den verwendeten Borosilicat-Reagenzgläsern. Damit bietet der Einsatz von Quarzgläsern im gewählten Aufbau die Möglichkeit, die Wasserstoffausbeuten zu steigern. Durch die unterschiedlichen Eigenschaften, Licht im UV-Bereich durchzulassen, lassen sich auch die Unterschiede bei den Gasausbeuten erklären, die im Vergleich bei den Versuchen zur Temperaturabhängigkeit (Kap. 5.6.6.) und bei der Photoreformierung von Ethanol (Kap. 5.6.3.) entstanden sind. Da bei den Versuchen zur Temperaturabhängigkeit ein Wasserbad in einem Becherglas genutzt wurde, stellte dieses Becherglas (Borosilicatglas) eine größere Hürde für das Licht dar. Teile der Strahlung wurde absorbiert, sodass Unterschiede bei der Entwicklung von Wasserstoff entstehen, obwohl die Versuche bei Raumtemperatur (22-23 °C) durchgeführt wurden.

5.7. Zwischenfazit der experimentellen Erprobungen

Die experimentellen Untersuchungen konnten grundsätzlich zeigen, dass mit dem hier konzipierten Experiment eine Vielzahl wasserlöslicher Substanzen unter anderem photokatalytisch zu Wasserstoff umgesetzt werden können. Der Aufbau mit dem Reagenzglas erwies sich dabei als vorteilhaft dahingehend, dass die erhaltenen Gasproben einen in den meisten Fällen sehr hohen Anteil an Wasserstoffgas aufwiesen, der es ermöglichen würde, diesen in weiteren Experimenten oder Folgeexperimenten einzusetzen. Gezeigt werden konnte zudem, dass verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel die Temperatur auf die Photoreformierung Einfluss nehmen, aber auch, dass manche Faktoren wie die Konzentration der Substrat-Lösungen oder die Menge des eingesetzten Photokatalysators nur wenig Einfluss auf die Bildungsraten des Gases haben. Besonders

deutlich zeigt sich der Effekt beim Faktor Temperatur. Größere Ausbeuten an Gas können bei höheren Temperaturen erzielt werden.

Erprobt wurde mit dem kleineren Aufbau ebenfalls die photokatalytische Umsetzung von Wasser in Form der Water-Splittings. Das Water-Splitting wie konnte jedoch mit keinem der beschriebenen Versuchsaufbauten nachvollzogen werden. Es ist anzunehmen, dass trotz der erhöhten Temperaturen, bei denen beide Experimente durchgeführt wurden, die Thermodynamik der Reaktionen immer noch stark eingeschränkt sind, sodass kein Wasserstoffgas gebildet werden kann.

Im Hinblick auf die Eignung der zwei Versuchssettings zur Photoreformierung für den Chemieunterricht bzw. den Einsatz in Schülerlaboren zeigen sich sehr deutlich die Vorteile, des zweiten, kleineren Versuchsaufbaus. Anders als bei den bereits vorgestellten Schwierigkeiten, die sich durch den in *Kapitel 5.4.* gezeigten Aufbau ergaben, konnte mit der Weiterentwicklung des Experiments ein Aufbau und eine Durchführung geschaffen werden, mit der verschiedene Anforderung an ein Schulexperiment bewältigt werden konnten.

Die Weiterentwicklung im Reagenzglas stellt einen Versuchsaufbau dar, der durch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse in seiner Versuchsdurchführung auch für den Schulunterricht als erfolgreich angesehen werden kann. Die benötigten Materialien und Chemikalien sind mit Ausnahme des Photokatalysators schulgängig. Auch wenn Quarzreagenzgläser nicht vorhanden sein sollten, ist eine Durchführung mit Borosilicat-Reagenzgläsern ohne weiteres möglich. Andere Anforderungen an das Experiment, wie deutlich sichtbare Effekte, eine erfolgreiche Durchführung, ein geringes Gefahrenpotential sowie der zeitliche Umfang hängen stark von den eingesetzten Substraten ab. Das Substrat, das als am geeignetsten für schulische Zwecke erscheint, ist hierbei Ethanol. Mit ihm kann bereits nach einer halben Stunde der Bestrahlung im Schnitt deutlich über 10 mL Gas gewonnen werden. Der zeitliche Umfang ist somit an Schulstunden orientiert. Das Gefahrenpotential ist sehr gering trotz des in sehr geringen Mengen entstehenden Ethanal während der Photoreformierung. Aber auch der Einsatz anderer Substrate ist in größeren Zeiträumen auch im schulischen Kontext möglich. Verschiedene Stoffe können hierbei herangezogen werden, wodurch auch Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit haben, Experimente bzw. Substrate arbeitsteilig zu erproben und forschend-entwickelnd zu arbeiten. Einzig die Anforderungen an das Experiment, dass es angemessen für die intendierte Altersstufe ist und an das Vorwissen der Lernenden anknüpft, konnte durch die experimentelle Erprobung nicht ermittelt werden. Hier ist es Aufgabe, das Experiment auch in der Praxis zu erproben und die Einschätzungen von Fachpersonal in Form von Lehrkräften einzuholen. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls geschehen und wird in den folgenden Kapiteln in der Betrachtung der didaktischen Perspektive auf das Experiment und auch das Thema Photoreformierung näher dargestellt.

6. Didaktische Überlegungen

6.1. Einleitung

Die Einbindung der Thematik der Photoreformierung in den Schulkontext erfolgte mit der Absicht, nicht nur einen aktuellen Forschungsaspekt anzusprechen, sondern auch den Anforderungen an modernen Chemieunterricht unter besonderer Berücksichtigung aktueller Problemstellungen zu genügen. Die größte Herausforderung, der sich die Menschheit im 21. Jahrhundert stellen muss, ist die des rapiden Wandels von Natur und Umwelt, hervorgerufen durch klimatische Veränderungen weltweit. Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zwingt zu einem Überdenken althergebrachter Denk- und Vorgehensweisen. Allen voran im Energiesektor wird eine Umstrukturierung nötig sein, von den klassischen Energieträgern des 19. und 20. Jahrhunderts wie Kohle und Öl wegzukommen und neue Wege zu erschließen, um auch den stetig steigenden Energiebedarf der Welt zu decken.

Die Schwierigkeit dabei ist, dass es nicht den einen Lösungsweg oder eine einzige Methode geben wird, die vielfältig miteinander verbundenen Probleme zu bewältigen. So sehr der Mensch in der heutigen Welt mit anderen Menschen verknüpft ist, so stark sind auch die vom Menschen gemachten oder beeinflussten Bereiche Ökologie, Ökonomie, Gesellschaft, Politik und Kultur verbunden, sodass ein einfacher Lösungsweg zur Bewältigung verschiedener Probleme ausgeschlossen scheint. Dennoch können Maßnahmen ergriffen werden, die unter Abwägung verschiedener Faktoren und unter der Berücksichtigung, dass bei dem Versuch, den bestmöglichen Weg zur Lösung der Probleme zu finden, Konflikte und Widersprüche bestehen bleiben und auch ausgehalten werden müssen.

In den folgenden Kapiteln soll neben der didaktischen Perspektive auf das Thema Photoreformierung auch ein differenzierter Blick auf die Rahmenbedingungen der Umsetzung von Themen im Chemieunterricht dargestellt werden, die eine nachhaltige Entwicklung und die angesprochenen Problemstellungen der heutigen Zeit aufgreifen. Dabei wird die besondere Bedeutung der BNE in den Fokus gesetzt, indem ihre Entwicklung, ihr Einbezug in aktuelle politische Absichten auf internationaler Ebene (bspw. Agenda 2030⁴³⁵, BNE 2030⁴³⁶, GreenComp⁴³⁷) und nationaler Ebene (Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung, Leitlinie BNE NRW⁴³⁸) dargestellt und ihre Bedeutung für den Chemieunterricht untersucht werden. Schwerpunktmäßig wird hierbei auf die

⁴³⁵ UN, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development; online unter: <https://sdgs.un.org/2030agenda>, (12.03.2024).

⁴³⁶ Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur (UNESCO): *Bildung für nachhaltige Entwicklung. Eine Roadmap. BNE 2030*, Bonn 2021; online unter https://www.unesco.de/sites/default/files/2022-02/DUK_BNE_ESD_Roadmap_DE_barrierefrei_web-final_barrierefrei.pdf, (12.03.2024).

⁴³⁷ Bianchi, Guia; Pisiotis, Ulrike; Cabrera Giraldez, Marcelino: *GreenComp. Der Europäische Kompetenzrahmen für Nachhaltigkeit*, Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen Europäische Union 2022; online unter: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC128040/JRC128040_009.pdf (18.01.2024).

⁴³⁸ MSB NRW, Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung; online unter: https://www.schulministerium.nrw/sites/default/files/documents/Leitlinie_BNE.pdf, (12.03.2024).

Vorgaben des Bundeslandes NRW eingegangen. Vorgestellt werden Verlaufspläne für den Chemieunterricht der Sekundarstufen I & II, die Themen des Kerncurriculums Chemie aufgreifen und mit BNE verbinden. Daran anknüpfend werden die Möglichkeiten aufgezeigt, wie das Thema Photoreformierung an bestehende Lehrpläne angebunden werden kann und welche didaktischen Optionen sich daraus ergeben. Darauf folgend werden die Material-Entwicklung und die Erprobungen des Experiments sowie der begleitenden Materialien in verschiedenen Settings (Lehrkräftefortbildungen, Erprobungen mit Schülerinnen und Schülern sowie Studierenden) vorgestellt, bevor dann ein kurzes Fazit zur Einbindung der Photoreformierung in den Chemieunterricht gezogen wird.

6.2. Bildung für Nachhaltige Entwicklung

Die Definition des Begriffs BNE - Bildung für nachhaltige Entwicklung erscheint trotz der inzwischen mehr als 30-jährigen Geschichte als nicht so eindeutig, wie bildungspolitische Diskurse, Fachartikel oder Fachbücher durch die Häufigkeit des Gebrauchs suggerieren könnten. Dies liegt vor allem daran, dass weder der Begriff Bildung noch der Begriff Nachhaltigkeit eindeutig definierbar ist und sowohl in der Fachwissenschaft als auch in der Alltagssprache mit unterschiedlichen Konzepten einhergeht.⁴³⁹ Allerdings zeigt sich bei der geschichtlichen Betrachtung zur Entwicklung von BNE genauer, was hierunter zu verstehen ist und welche Bedeutung sich hinter dem Begriff verbirgt.

Als Ausgangspunkt einer internationalen Auseinandersetzung mit nachhaltiger Entwicklung sowohl auf politischer als auch auf pädagogischer Ebene lässt sich der 1987 von der UN Weltkommission für Umwelt und Entwicklung veröffentlichte *Brundtland-Bericht* identifizieren, in dem die beiden Hauptelemente Umweltbildung und entwicklungspolitische Bildung erstmals gebündelt wurden.⁴⁴⁰ Beide Aspekte besitzen ebenfalls ihre eigene geschichtliche Entwicklung, die im Falle der Umweltbildung ihren Ursprung in Bürgerbewegungen der frühen 1970er Jahre hat. Diese Protestbewegungen richteten sich zunächst gegen die durch die weltweit stark gewachsene Industrie verursachten Umweltverschmutzungen von Gewässern, Luft, der steigenden Abholzung von Wäldern und der mit diesen Problemen einhergehenden Gesundheitsbelastung beim Menschen.⁴⁴¹ Eine breitere gesellschaftliche Auseinandersetzung mit Umweltproblemen wurde in diesem Zusammenhang mit dem durch den Club of Rome veröffentlichten Bericht zu den Grenzen des planetaren Wachstums erreicht. 1977 folgte mit der Tiflis-Konferenz eine von der UNESCO ausgerufene Weltkonferenz, die die Aufnahme von Umwelterziehung und Umweltbildung in außerschulische und schulische Kontexte anstoßen sollte.^{442, 443} Allerdings zeigte dieser Vorstoß trotz eines steigenden Umweltbewusstseins durch entsprechend ausgerichteten

⁴³⁹ de Haan, Gerhard: *Die Kernthemen der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung*, in: Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik 25 (1), 2002, S. 13.

⁴⁴⁰ Maack, Lisa: *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. Akteurinnen und Akteure zwischen Immanenz und Reflexivität*. Dissertation, Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt 2018, S. 26.

⁴⁴¹ Maack, Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, S. 27.

⁴⁴² Ebd.

⁴⁴³ Lob, Reinhold E.: *20 Jahre Umweltbildung in Deutschland. Eine Bilanz*, Köln: Aulis 1997, S. 1.

Unterricht nur wenig Einfluss auf das aktive Handeln der Lernenden.^{444, 445} Erst mit dem Brundtland-Bericht, der auch international eine größere Wirkung entfaltete, wurde allmählich ein Wechsel von einer rein auf die Ökologie ausgerichtete Umweltbildung hin zum Einbezug nachhaltiger Entwicklung auch in Bereichen Ökonomie und Soziales vollzogen.⁴⁴⁶ In ihm wurde nachhaltige Entwicklung als solche definiert, bei der die Bedürfnisse aktueller Generationen nicht die Bedürfnisse zukünftiger Generationen oder die von Menschen in anderen Regionen der Welt beeinträchtigen dürfen.^{447, 448}

Die entwicklungspolitische Bildung nahm somit maßgeblich auf die Herausbildung von BNE Einfluss. Die Entwicklungspolitik selbst erlangte nach Ende des Zweiten Weltkriegs immer stärkere Bedeutung. Sie sollte die Verbesserung der Lebensbedingungen aller Menschen vorantreiben, indem Themen wie die Bekämpfung von Armut und Hunger, der Schutz indigener Völker, Frieden und Demokratisierung ins Zentrum rückten. Auf pädagogischer Ebene sollte dies in eine weltbürgerliche Erziehung münden.⁴⁴⁹ Bedingt durch eine sich immer rascher und komplexer entwickelnde Welt und der stärkeren Internationalisierung der Wirtschaft erfolgte eine Ablösung der weltbürgerliche Erziehung durch den Lernbereich Globale Entwicklung. Globales Lernen richtete sich in einer seit den 1970er Jahren immer stärker globalisierten Welt an aktuellen Themenfeldern aus und berücksichtigte auch die Lebensstile in verschiedenen Kulturkreisen, den Umgang mit Fremdem und Vertrautem oder den Perspektivwechsel auf bestimmte Themen.⁴⁵⁰

Besonders vor dem erheblichen gesellschaftspolitischen, ökonomischen und ökologischen Wandel seit den 1970ern wurde eine engere Zusammenführung der Bereiche *Umweltbildung* und *Globales Lernen* nötig. Dies gipfelte schließlich in dem 1992 auf der UN-Konferenz „Umwelt und Entwicklung“ (Rio-Konferenz) entwickelten Bildungskonzept BNE, das erstmals die Aspekte Ökologie, Ökonomie und Soziales verband und somit eine Antwort auf globale Probleme und gesamtgesellschaftliche Herausforderungen geben sollte.⁴⁵¹ Aus dieser Konferenz gingen u.a. die Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung⁴⁵² und die *Agenda 21*⁴⁵³ hervor. In letzterer wird im Kapitel „Förderung der Bildung, der Bewusstseinsbildung und der Aus- und Fortbildung“ Bildung als zentraler Bestandteil identifiziert und als „[...] eine unerlässliche Voraussetzung für die Förderung der nachhaltigen Entwicklung und die bessere Befähigung der Menschen, sich mit Umwelt- und Entwicklungsfragen

⁴⁴⁴ Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 27.

⁴⁴⁵ Lehmann, Jürgen: *Befunde empirischer Forschung zu Umweltbildung und Umweltbewußtsein*, Opladen: Leske + Budrich 1999, S. 145-149.

⁴⁴⁶ Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 27.

⁴⁴⁷ Ebd., S. 38.

⁴⁴⁸ Brundtland, Gro Harlem (Hrsg.); Agnelli, Susanna (Verfasserin); Hauff, Volker (Hrsg.): *Unsere gemeinsame Zukunft: der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*, Greven: Eggenkamp 1987, S. 41-49.

⁴⁴⁹ Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 35.

⁴⁵⁰ Ebd.

⁴⁵¹ Ebd., S. 37.

⁴⁵² United Nations (UN): *Report of the United Nations conference on environment and development* (Rio declaration on environment and development), Rio de Janeiro 1992; online unter: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_CON F.151_26_Vol.I_Declaration.pdf, (10.04.2024).

⁴⁵³ United Nations (UN): *AGENDA 21, United Nations Conference on Environment & Development*, Rio de Janeiro 1992; online unter: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>, (10.04.2024).

auseinanderzusetzen.“⁴⁵⁴ beschrieben. Mit der Agenda 21 wurde ein Aktionsprogramm geschaffen, das als Basis zur Umsetzung von BNE weltweit dienen sollte. Darauf aufbauend wurde 2002 durch die UN auf dem Weltgipfel Rio +10 in Johannesburg die *Weltdekade BNE* (2005-2014) ins Leben gerufen, die zum Ziel hatte, BNE international bekannter zu machen und in die Bildungssektoren der Mitgliedsstaaten auf Dauer einzubinden.⁴⁵⁵

Noch während der Laufzeit der Weltdekade BNE wurde über die Notwendigkeit der Fortführung von Maßnahmen zur Implementierung von BNE in der breiten Öffentlichkeit sowohl auf nationaler wie auch internationaler Ebene diskutiert. In Folge wurde durch die UNESCO das Weltaktionsprogramm „Bildung für Nachhaltige Entwicklung“ geschaffen, das 2015 startete und einen Zeitraum bis 2019 umfasste.⁴⁵⁶ Dieses Aktionsprogramm lief parallel zum ersten Drittel der durch die Vereinten Nationen beschlossenen *Agenda 2030*, die ebenfalls 2015 durch eine UN-Resolution verabschiedet wurde. Zentraler Bestandteil der *Agenda 2030* sind die 17 *Sustainable Development Goals* (SDGs). Zu diesen zählt auch das Ziel, BNE stärker in den Mitgliedsstaaten zu fördern. Aufbauend auf dem Weltaktionsprogramm BNE wurde von der UNESCO für das jetzige Jahrzehnt (2020-2030), der „Decade of Action“, ein neues Rahmenprogramm verabschiedet. Mit *BNE 2030* sollen die Ziele des Weltaktionsprogramms weitergeführt und intensiviert werden. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung soll hiermit der Schwerpunkt auf den Bereich Bildung gelegt werden, um die globalen Nachhaltigkeitsziele, die mit den 17 SDGs formuliert wurden, zu verwirklichen. Mit diesen Rahmenvorgaben soll in den nächsten Jahren BNE in den dringlichsten Handlungsfeldern in alle Bildungssektoren eingebunden werden.⁴⁵⁷

Die Verstetigung des Einbezugs von Umwelt- und Entwicklungspolitik und schließlich von BNE auf internationaler Ebene durch UN-Resolutionen oder UNESCO Rahmenvorgaben in den letzten Jahrzehnten ist ein Indiz für die Dringlichkeit, Nachhaltige Entwicklung und BNE voranzutreiben. Ein Blick auf die nationale Ebene zeigt für Deutschland, dass seit den 1970er Jahren Umwelt- und Entwicklungspolitik immer stärker in den Bildungssektor Einzug hielten. Zur Umsetzung der internationalen Vorgaben der Agenda 21 wurden in Deutschland Arbeitsgruppen und Expertengremien geschaffen, mit deren Hilfe die Vorgaben im Rahmen der Weltdekade BNE umgesetzt wurden. Die oberste Koordinationsstelle bildete das Deutsche Nationalkomitee, das steuernde und beratende Aufgaben übernahm und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie die Deutsche UNESCO-Kommission unterstützt wurde.⁴⁵⁸ Sowohl durch die Kultusministerkonferenz (KMK) als auch durch die Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) wurden bereits Ende der 1990er Jahre erste Grundsteine für verschiedene Aktivitäten in den folgenden Jahren und Jahrzehnten gelegt. Hierzu zählt unter anderem der von der BLK 1998 vorgestellte Orientierungsrahmen *Bildung für nachhaltige Entwicklung*.⁴⁵⁹ 2001 wurde

⁴⁵⁴ UN, Agenda 21 (Deutsche Übersetzung), Kapitel 36.3; <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/ag21dok/kap36.htm>, (10.04.2024).

⁴⁵⁵ Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 39-41.

⁴⁵⁶ Ebd., S. 55.

⁴⁵⁷ UNESCO, *BNE 2030*, Vorwort.

⁴⁵⁸ Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 42

⁴⁵⁹ Nationalkomitee der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ im Auftrag von Deutsche UNESCO-Kommission e. V.: *UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ 2005-2014. Nationaler Aktionsplan für Deutschland*, Bonn 2011, S. 10-11.

schließlich durch die Bundesregierung ein Staatssekretärausschuss für Nachhaltige Entwicklung und der Rat für Nachhaltige Entwicklung gebildet.⁴⁶⁰

Zum 2004 getroffenen Beschluss des deutschen Bundestages zur Teilnahme an der Weltdekade BNE wurde 2005 ein Nationaler Aktionsplan entworfen. Ausgangspunkt für diesen war die „Hamburger Erklärung“⁴⁶¹, die 2003 durch das Deutsche UNESCO-Komitee veröffentlicht wurde. Auf dieser Grundlage wurden im *Nationalen Aktionsplan* Hauptziele formuliert und ein bis 2011 stetig weiterentwickelter Maßnahmenkatalog vorgestellt, der den handelnden Personen auf Bundes-, Landes- und kommunaler Ebene als Orientierungsrahmen dienen sollte.⁴⁶² Zu den Zielen zählten die „Weiterentwicklung und Bündelung der Aktivitäten sowie Transfer guter Praxis in die Breite“⁴⁶³, die „Vernetzung der Akteure der Bildung für Nachhaltige Entwicklung“⁴⁶⁴, die „Verbesserung der öffentlichen Wahrnehmung von Bildung für Nachhaltige Entwicklung“⁴⁶⁵ sowie die „Verstärkung internationaler Kooperationen“⁴⁶⁶. Hier zeigten sich bereits strategische Überlegungen, BNE in möglichst alle Bildungsbereiche dauerhaft zu verankern und stärker in das öffentliche Bewusstsein sowie gesellschaftspolitische Diskurse einzubringen.⁴⁶⁷ Auch verschiedene Dimensionen, die mit BNE einhergehen, wurden bereits in diesem Aktionsplan deutlich, in dem ebenfalls globale wie regionale Kooperationen über Kulturgrenzen hinweg eingefordert werden.⁴⁶⁸

Ein Schritt zum stärkeren Einbezug von BNE in die deutsche Bildungslandschaft wurde durch das 2004 von der Kultusministerkonferenz (KMK) und des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit (BMZ) beschlossene Projekt zur Ausarbeitung eines Orientierungsrahmens angestoßen. Dieses Projekt war zugleich Teil des Nationalen Aktionsplans der UNESCO und lief bis 2007. Unter der Kooperation von staatlichen Partnern im Bereich Entwicklung, den universitären Fachdidaktiken und Fachleuten aus Erziehungswissenschaften, einzelnen Fachdisziplinen, Schulen und von Nichtregierungsorganisationen wurde schließlich 2007 der *Orientierungsrahmen Globale Entwicklung* veröffentlicht.⁴⁶⁹ Er wurde in zweiter Auflage 2015 unter dem Titel „*Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*“ von der KMK mit Bezug auf die Sek. I an allen Schulformen verabschiedet.⁴⁷⁰

⁴⁶⁰ Nationalkomitee der UN-Dekade, Nationaler Aktionsplan für Deutschland, S. 11.

⁴⁶¹ Deutsche UNESCO-Kommission: *Nachhaltigkeit lernen: Hamburger Erklärung der Deutschen UNESCO-Kommission zur Dekade der Vereinten Nationen „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (2005–2014)*, Hamburg 2003; online unter: <https://www.unesco.de/sites/default/files/2018-04/Nachhaltigkeit%20lernen.pdf>, (13.03.2024).

⁴⁶² Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 43.

⁴⁶³ Nationalkomitee der UN-Dekade, Nationaler Aktionsplan für Deutschland, S.12-13.

⁴⁶⁴ Ebd., S. 13-14.

⁴⁶⁵ Ebd., S. 14-15.

⁴⁶⁶ Ebd., S. 15-16.

⁴⁶⁷ Maack, *Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 43.

⁴⁶⁸ Nationalkomitee der UN-Dekade, Nationaler Aktionsplan für Deutschland, S. 15-16.

⁴⁶⁹ Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ); Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (KMK): *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, Bonn & Berlin 2007; online unter: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2007/2007_06_00_Orientierungsrahmen_Globale_Entwicklung.pdf, (13.03.2024).

⁴⁷⁰ Engagement Global, *Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung* (2015).

Während der UN-Dekade BNE (2005–2014) wurden auf Basis dieser nationalen Vorgaben verschiedene Projekte initiiert und umgesetzt. Das Nationalkomitee setzte dabei vor allem auf die Auszeichnung und Würdigung von Projekten zu BNE zur gezielten Sichtbarmachung von Beispielen guter Praxis. Bundesweit wurden Schulen mit Nachhaltigkeitsprofilen oder nachhaltig agierende Schülerfirmen, aber auch Hochschulen mit Engagement im Bereich BNE gewürdigt.⁴⁷¹ Neben diesen Projekten standen auch von Länderseite eingeleitete Maßnahmen, BNE systematisch in Bildungsstrukturen einzubinden, im Vordergrund der UN-Dekade. Zu diesen Maßnahmen zählte auch die in NRW eingerichtete Kampagne „Schule der Zukunft - Bildung für Nachhaltigkeit“, die auf schulische Bildung fokussiert.⁴⁷²

6.2.1. Agenda 2030/BNE 2030



Abb. 51: Die 17 Ziele Nachhaltiger Entwicklung⁴⁷³

⁴⁷¹ Deutsche UNESCO-Kommission: *UN-Dekade mit Wirkung - 10 Jahre „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ in Deutschland*, Bonn 2015, S. 43; online unter: <https://www.bne-portal.de/bne/shareddocs/downloads/files/duk-un-dekade-mit-wirkung.pdf>, (13.03.2024).

⁴⁷² Deutsche UNESCO-Kommission, UN-Dekade mit Wirkung, S. 47.

⁴⁷³ Abbildung von: Deutsche UNESCO-Kommission: *Agenda Bildung 2030. Bildung und die Sustainable Development Goals* (CC-BY-SA 3.0), UN; <https://www.unesco.de/bildung/agenda-bildung-2030/bildung-und-die-sdgs> (15.03.2024).

Mit der Agenda 2030 (*Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung*) wurde von der Generalversammlung der Vereinten Nationen ein Aktionsplan verabschiedet, der Ziele und Zielvorgaben formuliert, die für den Menschen, den Planeten, den Wohlstand, den Frieden und die globale Partnerschaft von entscheidender Bedeutung sind und auf die Herausforderungen bei der Umsetzung dieser Ziele fokussieren sollen. Dabei soll besonders die Transformation hin zur Nachhaltigkeit in allen genannten Bereichen gelingen mit der Absicht, sowohl die wirtschaftliche, soziale und ökologische Dimension zu berücksichtigen und gleichberechtigt in Prozesse einer nachhaltigen Entwicklung einzubeziehen.⁴⁷⁴

Insgesamt wurden 17 Ziele (SDGs) (*siehe Abb. 51*) mit 169 Unterzielen formuliert. Das SDG 4 steht dabei ganz im Zeichen einer inklusiven, gleichberechtigten und hochwertigen Bildung, die bis zum Jahr 2030 umgesetzt werden soll. Alle Mitgliedstaaten der UN verpflichten sich, im Sinne eines lebenslangen Lernens auch explizit BNE im Sinne einer Weltbürgerschaft zu fördern, welche im Unterpunkt 4.7 besonders hervorgehoben wird.⁴⁷⁵ Dabei kann das SDG 4 sowohl als Ziel zur Umsetzung von BNE betrachtet werden als auch als Ziel, alle SDGs in eine BNE zu integrieren. Hierbei zeigt sich die besondere Bedeutung die BNE im Rahmen der Agenda 2030 zugeordnet wird.

Eine weitere Präzisierung der Rahmenvorgaben der Agenda 2030 wurde in der aktuell laufenden Dekade (2020-2030) mit BNE 2030 durch die UNESCO vorgenommen. Konkret wird in einer Roadmap ein Umsetzungsrahmen präsentiert, der Transformationsprozesse befördern soll, indem zur Umsetzung in den Mitgliedsstaaten „[...] spezifische Arbeits- und Interventionsbereiche vorgeschlagen werden, [...]“⁴⁷⁶. Hierbei wurden fünf priorisierte Handlungsfelder definiert, um den größten Herausforderungen in der Welt aktiv entgegenzutreten. Hierzu zählen 1. Die Etablierung einer politischen Unterstützung für BNE in der Bildungspolitik, 2. die ganzheitliche Transformation von Lern- und Lehrumgebungen, 3. die Förderung der Kompetenzentwicklung von Lehrenden, 4. die Stärkung und Mobilisierung der Jugend, an diesem Transformationsprozess teilzuhaben und 5. BNE auf lokaler Ebene in Gemeinden und Kommunen zu unterstützen.⁴⁷⁷

⁴⁷⁴ UN, Agenda 2030, S. 1-2.

⁴⁷⁵ Ebd., S. 18.

⁴⁷⁶ UNESCO, BNE 2030, Vorwort.

⁴⁷⁷ Ebd., S. 26-34.

6.2.2. Green Comp.

2022 ist durch die Europäische Kommission der europäischen Kompetenzrahmen zu Nachhaltigkeit (*GreenComp*) veröffentlicht worden. Er soll helfen, den von der EU 2019 beschlossenen *European Green Deal* umzusetzen, indem er BNE EU-weit als zentralen Baustein zur Umgestaltung in den Fokus rückt. Damit geht die Absicht einher, BNE in Bildungs- und Ausbildungsbereiche stärker zu integrieren und sowohl den Lernenden als auch den Lehrenden als Kompetenzrahmen zu dienen.⁴⁷⁸ Hiermit verbunden ist das Ziel, ein Rahmenprogramm zu geben, in dem die 12 wichtigsten Kernkompetenzen definiert werden. Es soll unabhängig vom Alter oder Bildungshintergrund der Lernenden in formale, informale und nicht-formale Bildung eingebunden werden können. Die Kompetenzen zu Nachhaltigkeit dienen als Bezugspunkt für bereits bestehende internationale, nationale, regionale und lokale Vorgaben wie auch zur Entwicklung neuer Pläne zur Implementierung von BNE. Zur Visualisierung der Abhängigkeiten der Kernkompetenzen untereinander wurde zudem ein Model geschaffen.⁴⁷⁹ (siehe Abb. 52) Die Kernkompetenzen fokussieren auf die Bereiche Wissen, Fertigkeiten und Einstellungen und geben für jede der 12 Kompetenzen Beispiele für diese drei Aspekte an. Die 12 Kompetenzen sind ihrerseits unter vier Kompetenzbereichen eingeordnet. Diese sind 1. Die Werte der Nachhaltigkeit verankern, 2. Die Komplexität in der Nachhaltigkeit erfassen, 3. Nachhaltige Zukunftsszenarien entwickeln und 4. Im Sinne nachhaltige Maßnahmen handeln.⁴⁸⁰

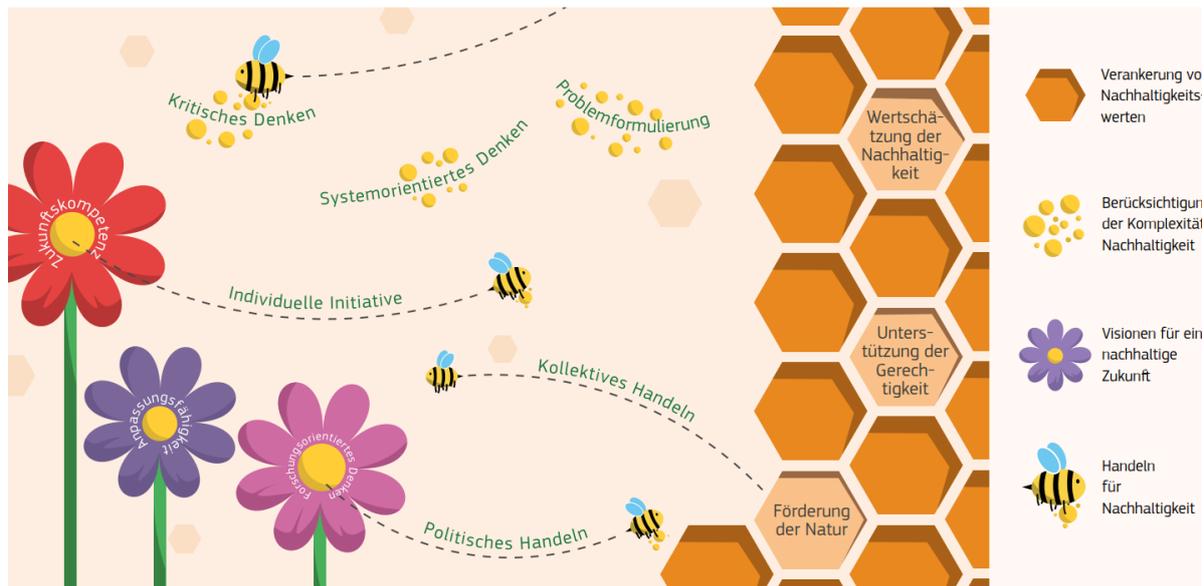


Abb. 52: Visualisierung der Kernkompetenzen und Kompetenzbereiche im GreenComp⁴⁸¹

⁴⁷⁸ Bianchi et al., GreenComp, S. 1.

⁴⁷⁹ Ebd., S. 7.

⁴⁸⁰ Ebd., S. 14-15.

⁴⁸¹ Abbildung von: Bianchi, Guia; Pisiotis, Ulrike; Cabrera Giraldez, Marcelino: *GreenComp. Der Europäische Kompetenzrahmen für Nachhaltigkeit*, Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen Europäische Union 2022, S. 16.

6.3. Nationale Vorgaben

6.3.1. Lernbereich globale Entwicklung

Mit dem erarbeiteten Orientierungsrahmen durch die KMK und das BMZ wurde 2007 ein Beitrag geschaffen, der die Umsetzung der UN-Dekade BNE (2005–2014) fördern sollte. Der 2015 von der KMK letztmalig aktualisierte Orientierungsrahmen gibt dabei grundlegende Empfehlungen zur Erarbeitung von Lehrplänen auf Landesebene, schulischer Curricula und zeigt Beispiele für Unterrichtsmaterialien auf.⁴⁸² In der ersten Fassung des Orientierungsrahmens wurden Bildungsziele sowie Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler dargestellt, die sie erwerben sollten. Geeignete fachliche Inhalte zur Auseinandersetzung in exemplarisch ausgewählten Fächern wurden ebenso wie Leistungsanforderungen vorgestellt und an konkreten Aufgabenbeispielen präsentiert.⁴⁸³ Dabei wurden explizit die zentralen Entwicklungsdimensionen Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft/Soziales um eine politische Dimension erweitert und hierbei als weiterer zentraler Bestandteil für BNE und den Bereich Globale Entwicklung genannt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass nationale politische Systeme seit den internationalen Beschlüssen der UN immer stärker in beiden Bereichen mitwirkten und Vorgaben umsetzten.⁴⁸⁴ Die zweite Auflage des Orientierungsrahmens greift die genannten Aspekte auf und erweitert bzw. präzisiert sie.

6.3.2. Landesvorgaben für NRW

6.3.2.1. Anfänge seit 2004

Mit Beginn der UN-Dekade BNE und der Veröffentlichung des Orientierungsrahmens Globale Entwicklung wurden auf Länderebene verschiedene Projekte und Maßnahmen angefangen und umgesetzt. Zunächst wurde mit „Transfer-21 Nordrhein-Westfalen: Agenda 21 in Schule und Jugendarbeit“ ein Bund-Länder-Projekt entwickelt, das 2004 startete und bis 2008 lief.⁴⁸⁵ Das Hauptprojektziel lag in der dauerhaften Einbindung von Inhalten sowie Methoden einer BNE in die Organisationsstrukturen des Aus- und Fortbildungsbereichs. Den Kern bildeten Netzwerke zwischen Schulen, aber auch außerschulischen und freien Trägern in der Jugendarbeit. Ausgerichtet waren die Umsetzung des Projekts auf der Ebene des Grundschul- und Sekundarbereichs I & II sowie des Elementarbereichs. Beabsichtigt war, dass länderübergreifend ein Austausch über die Erkenntnisse zur Umsetzung erfolgt.⁴⁸⁶

⁴⁸² BMZ/KMK, Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung, 2007, S. 17.

⁴⁸³ Ebd., S. 18

⁴⁸⁴ Ebd., S. 16-20.

⁴⁸⁵ Deutschen Bildungsserver: *Transfer-21 Nordrhein-Westfalen: Agenda 21 in Schule und Jugendarbeit*, https://www.bildungsserver.de/innovationsportal/innovationsprojekt.html?innovationsprojekte_id=57, (21.10.2023).

⁴⁸⁶ Ebd.

2008 wurde in NRW in Kooperation mit dem Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr, der BNE-Agentur NRW und der Natur- und Umweltschutz-Akademie NRW⁴⁸⁷ die Kampagne „Schule der Zukunft“ ins Leben gerufen.⁴⁸⁸ Auch über das Projektende im Jahr 2015 hinaus können Schulen sowie außerschulische Lernorte offiziell Teil dieses Landesprogramms werden und an diesem teilnehmen. Das Programm intendiert die Verankerung und Verstetigung von BNE in den Schulalltag und soll Schulen und außerschulische Träger unterstützen, an den jeweiligen Institutionen BNE in den Alltag einzubinden und sich in kleineren Projekten mit aktuellen Zukunftsfragen aus ökologischen, ökonomischen oder gesellschaftlichen Perspektiven auseinanderzusetzen.⁴⁸⁹ Damit einher gehen Angebote an Schulen bei der Unterstützung zur Einbindung von BNE in die Unterrichts- und Schulentwicklung sowie die Sichtbarmachung von gelungenen Projekten an den inzwischen mehr als 1500 teilnehmenden Schulen in NRW.⁴⁹⁰ Aufbauend auf der UN-Dekade BNE wurde so ein Programm geschaffen, dass über diesen Zeitraum hinaus als ein Multiplikator von BNE im schulischen Kontext und als ein Bindeglied für die darauffolgenden Projekte angesehen werden kann.

6.3.2.2. Leitlinie BNE NRW

Aufbauend auf den ersten Schritten, BNE in NRW stärker in Schule und das Bildungssystem einzubinden, wurde schließlich 2019 die „*Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung*“ durch das Schulministerium herausgegeben. In ihr wird auf Grundlage der internationalen und nationalen Vorgaben ein Rahmen zur kompetenzorientierten Umsetzung von BNE gegeben, der für das Bundesland NRW Ziele, Leitgedanken und Merkmale von BNE aufzeigt und Möglichkeiten für affine Schulfächer darstellt, BNE einzubinden. Des Weiteren werden Chancen für die Schulentwicklung durch BNE erläutert.⁴⁹¹

Für NRW wird BNE als Schwerpunkt identifiziert, der nicht nur für den Umweltschutz, die soziale Gerechtigkeit und den ökonomischen Erfolg entscheidend ist, sondern auch für eine kulturell vielfältige Gesellschaft. Alle Lernenden sollen nach Abschluss der schulischen Laufbahn Kenntnisse, Kompetenzen und Qualifikationen mitbringen, nachhaltige Entwicklung mitzugestalten. Damit geht die Befähigung einher, auf Basis fachlicher Kompetenzen, ihre Urteil- und Handlungsfähigkeiten bei wichtigen Zukunftsfragen auszubauen.⁴⁹² Die Leitlinie BNE NRW charakterisiert BNE-Lernprozesse als solche, die relevante Fragen oder Themen aus gesellschaftspolitischen und fachwissenschaftlichen Diskursen aufgreifen, diese in mehreren Dimensionen ansprechen und multiperspektivisch betrachten. Neben dem Aufbau fächerübergreifenden, vernetzten Wissens sollen die

⁴⁸⁷ Natur- und Umweltschutz-Akademie NRW (NUA): *Das Landesprogramm „Schule der Zukunft“*, <https://www.sdz.nrw.de/landesprogramm/ziele>, (22.10.2023).

⁴⁸⁸ Deutschen Bildungsserver: *Schule der Zukunft – Bildung für Nachhaltigkeit*, https://www.bildungsserver.de/innovationsportal/innovationsprojekt.html?innovationsprojekte_id=1163, (21.10.2023).

⁴⁸⁹ Ebd.

⁴⁹⁰ Natur- und Umweltschutz-Akademie NRW (NUA): *„Schule der Zukunft“*, <https://www.sdz.nrw.de/landesprogramm/ziele> (22.10.2023).

⁴⁹¹ MSB NRW, *Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 7.

⁴⁹² Ebd., S. 8-11.

Lernenden auch im Umgang mit Widersprüchen und Konflikten geschult werden. Dabei werden eigenverantwortliche und partizipative Lernprozesse in den Vordergrund gestellt, die Handlungs- und Gestaltungsoptionen aufzeigen und intelligente Lösungen für Probleme ermöglichen, immer unter der Berücksichtigung, dass es nicht nur den einen Weg, sondern verschiedene Zukunftsszenarien geben kann.⁴⁹³

Eine Besonderheit, die die Leitlinie BNE besitzt, ist die Aufstellung fünf verschiedener Dimensionen, die bei der Betrachtung eines Themas oder einer Fragestellung berücksichtigt werden sollen. Damit geht die Leitlinie BNE über den „klassischen Dreiklang“ der Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales/Gesellschaft hinaus und erweitert bzw. differenziert die letztgenannte um eine politische und eine kulturelle Dimension.⁴⁹⁴ Die einzelnen Dimensionen sollen jedoch nicht alleinstehend verstanden werden, sondern als vernetztes System untereinander abhängiger Bereiche. Dargestellt wird dies durch das Fünf-Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung, das die Wechselwirkungen aller Dimensionen visualisiert (siehe Abb. 53).⁴⁹⁵

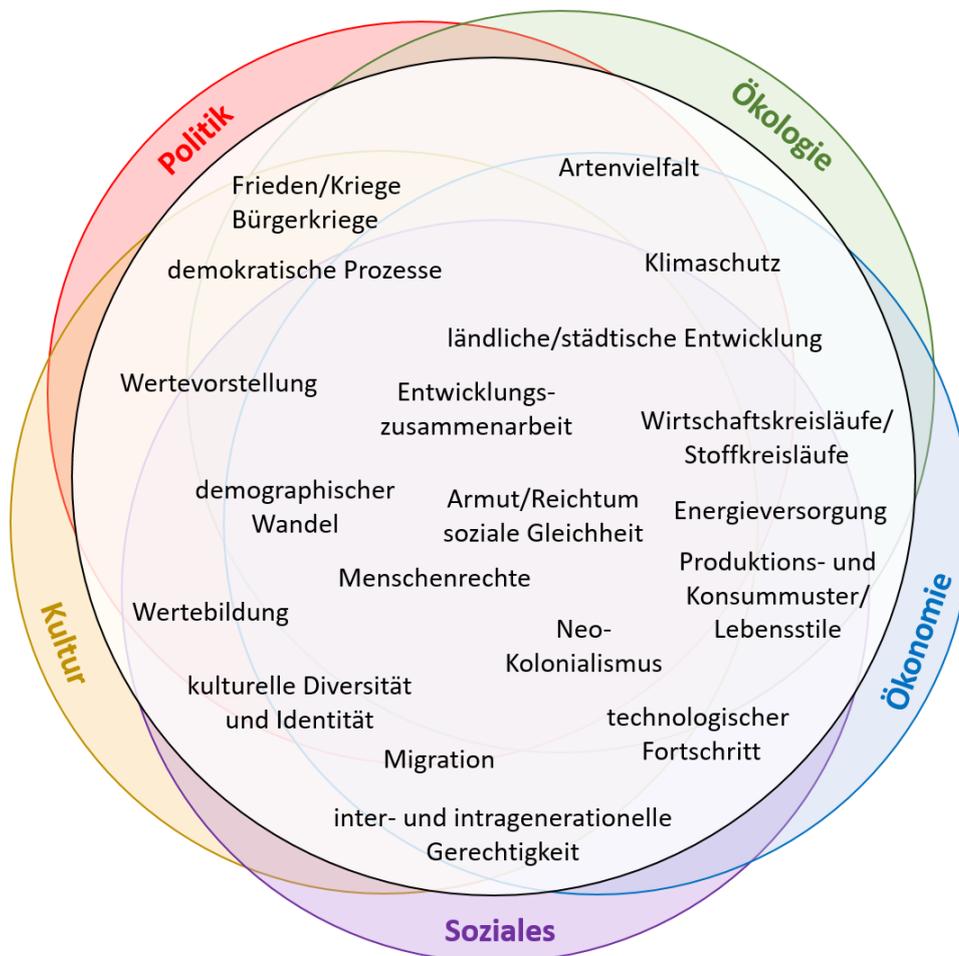


Abb. 53: Fünf-Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung. Eigene Darstellung basierend auf Leitlinie BNE NRW⁴⁹⁶

⁴⁹³ MSB NRW, Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung, S. 15-24.

⁴⁹⁴ Ebd., S. 17-18.

⁴⁹⁵ Ebd.

⁴⁹⁶ Ebd., S. 18.

Innerhalb der Leitlinie BNE NRW wird auch der Auftrag an Lehrpersonen gerichtet, Zielvorgaben für die einzelnen Unterrichtsfächer und konkrete Lernangebote zu entwickeln. Konkrete Vorschläge für die verschiedenen Fächer sind allerdings nicht näher formuliert. Für das Fach Chemie werden Vorschläge für geeignete Themen gemacht, zu denen Fragestellungen mit Blick auf Nachhaltige Entwicklung bearbeitet werden können. Explizit werden hier Klimawandel und Treibhauseffekt benannt.⁴⁹⁷ Auf die Themen bezogen wird hierbei von einem „Selbstverständnis“ gesprochen, mit dem BNE-bezogene Inhalte in den Chemieunterricht eingebunden werden können, die bei Themen der Ressourcen- und Rohstoffnutzung bereits an die Vorgaben der KMK-Bildungsstandards anbinden.⁴⁹⁸ Eine konkrete Anbindung an die Fachcurricula ist jedoch nicht gegeben. Damit differenziert die Leitlinie BNE NRW zwar verschiedene Unterrichtsfächer, bleibt aber in der Themenwahl für BNE-Lernprozesse noch zurückhaltend und ohne konkrete Anbindung an die existierenden Lehrpläne. Auch für das Fach Chemie sind die Vorgaben noch etwas vage formuliert. Hervorgehoben wird aber die besondere Bedeutung außerschulischer MINT-Lernorte und Schülerlabore, die einen Beitrag dazu leisten können, dass Lernende in einer authentischen Umgebung „[...] Wissenschaft und Technik „hautnah“ begreifen.“⁴⁹⁹ Allerdings ist leider auch hier nicht näher definiert, welche Art von Schülerlaboren oder Schülerlabor-Settings besonders geeignet wären, BNE-Lernprozesse in Schule und das Fach Chemie einzubringen.

6.3.3. Blick auf andere Bundesländer

In anderen Bundesländern sind zum jetzigen Stand ebenfalls Papiere zur Orientierung für Lehrkräfte geschaffen worden. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Form und Intention zum Teil deutlich. Im Vergleich zu den Vorgaben und Erläuterungen in der Leitlinie BNE NRW, die einige ausgewählte, BNE-affinen Themenvorschläge für bestimmte Unterrichtsfächer vorstellt, sind andere Rahmenpapiere weniger stark auf den Bereich Schule fokussiert, sondern allgemein auf Lernorte und die Umsetzung von BNE in der formalen wie auch non-formalen Bildung. Hierzu zählt unter anderem die durch das Land Schleswig-Holstein veröffentlichte „Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung“⁵⁰⁰, in der Handlungsfelder und Maßnahmen zur Umsetzung von BNE vorgestellt werden. Für den Bildungsbereich Schule werden dazu Maßnahmen, Handlungsfelder und Ziele definiert. Auffällig ist, dass sie nicht für einzelne Fächer konkretisiert werden. Allerdings wird auf das Potential von BNE im naturwissenschaftlichen Unterricht hingewiesen. Bei der Konkretisierung von BNE innerhalb der Fächer wird auf die jeweiligen Lehrpläne verwiesen.⁵⁰¹ Insgesamt wirkt die Landesstrategie durch die Vorstellung von Projekten und

⁴⁹⁷ MSB NRW, Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung, S. 35-36.

⁴⁹⁸ Ebd., S. 35.

⁴⁹⁹ Ebd.

⁵⁰⁰ Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung des Landes Schleswig-Holstein: *Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung*, Kiel 2021; online unter: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/B/bne/Downloads/bneStrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, (13.03.2024).

⁵⁰¹ Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung (SH): *Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung*, S. 14.

Netzwerken zur Förderung von BNE an Schulen⁵⁰² stärker projektorientiert bei der strukturellen Einbindung von BNE in den Bildungsbereich. Ähnlich aufgebaut ist auch die Sächsische Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung (LS BNE).⁵⁰³

Neben diesen wenigen auf den Bildungsbereich explizit ausgerichteten Rahmenpapieren werden Absichten zur Einbindung von BNE in allgemeine Nachhaltigkeitsstrategien verschiedener Länder formuliert, die nicht nur auf den Lernbereich fokussieren (Thüringen,⁵⁰⁴ Sachsen-Anhalt,⁵⁰⁵ Rheinland-Pfalz⁵⁰⁶). Zwar lassen sich für alle Bundesländer geförderte Initiativen und Projekte zur strukturellen Einbindung von BNE in Schule finden, allerdings sind in einem separaten Papier formulierte Landesvorgaben eher selten. Entsprechende Internetseiten der Landesministerien verweisen zumeist auf die nationalen Vorgaben durch den Orientierungsrahmen Globale Entwicklung. Somit nimmt die Leitlinie BNE NRW eine besondere Stellung ein, da sie BNE nicht nur für die schulische Bildung definiert und BNE-Lernprozesse charakterisiert, sondern auch - wenn auch für einzelne Fächer unterschiedlich stark ausgearbeitet - Vorschläge für BNE-bezogene Themen gibt.

6.4. Herausforderungen von BNE bis heute

Die Umsetzung von BNE im schulischen Alltag über alle Fächer hinweg, im Sinne eines interdisziplinären Handlungsfeldes bringt Herausforderungen mit sich. Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Entwicklungsschritte der BNE verdeutlichen die Absicht des Einbezugs von BNE in Schule angesichts stetig wachsender Problemstellungen, mit denen zukünftige Generationen umgehen müssen. Die Verbreitung von Rahmenplänen zeigt auf vielen Ebenen, dass BNE stärker in Bildungsprozesse integriert werden soll.

Bei der Betrachtung, wie die Absichten in Schulgesetzgebung, KMK-Beschlüssen oder Lehrplänen umgesetzt werden, zeigt sich die Notwendigkeit der stärkeren formalen Verankerung in manchen der genannten Bereiche. Kurzberichte des Nationalen Monitorings

⁵⁰² Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt, Natur und Digitalisierung (SH): Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung, S. 14.

⁵⁰³ Sächsisches Staatsministerium für Kultus: *Sächsische Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)*, Dresden 2018; online unter:

<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32399/documents/49680>, (13.03.2024).

⁵⁰⁴ Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz: *Die Thüringer Nachhaltigkeitsstrategie 2018*, Erfurt 2018; online unter:

https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Nachhaltigkeit/Thuer._Nachhaltigkeitsstrategie_18_09_11_TNS.pdf, (13.03.2024).

⁵⁰⁵ Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt:

Nachhaltigkeitsstrategie des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg 2018; online unter: https://mwu.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MWU/Umwelt/Nachhaltigkeit/00_Startseite_Nachhaltigkeit/190722_Nachhaltigkeitsstrategie.pdf, (13.03.2024).

⁵⁰⁶ Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz:

Nachhaltigkeitsstrategie Rheinland-Pfalz. Fortschreibung 2019, Mainz 2019; online unter: https://www.rlp.de/fileadmin/02/Themen/Regierungsschwerpunkte/Nachhaltigkeit/PDF/2019_Nachhaltigkeitsstrategie.pdf, (13.03.2024).

zu BNE⁵⁰⁷,⁵⁰⁸,⁵⁰⁹ können Aufschluss darüber geben, inwieweit BNE im deutschen Bildungssystem verankert ist und wie weit verbreitet und qualitativ BNE eingebunden wird.⁵¹⁰ Aus dem letztmalig im Oktober 2022 veröffentlichten Bericht lassen sich Schwierigkeiten bei der Umsetzung von BNE erkennen. In Bezug auf die Schulgesetzgebung konnten bisher nur wenige Veränderungen erkannt werden. Zwar werden hier BNE oder nachhaltige Entwicklung in der Hälfte der Bundesländer benannt, jedoch nur als eine von verschiedenen Querschnittsaufgaben. Neufassungen oder Modifikationen der Gesetzgebung, lediglich in Niedersachsen zu finden.⁵¹¹ Auch in den seit 2019 veröffentlichten Dokumenten der KMK lassen sich nur vereinzelt konkrete Bezüge zu BNE wiederfinden. Ausnahmen bilden Biologie und Chemie, in deren Bildungsstandards BNE-Bezüge aufgeführt wurden. Die KMK Empfehlungen zu BNE beziehen sich noch immer auf jene des Jahres 2007.⁵¹² Die Analyse der Lehrpläne in Deutschland von verschiedenen Schulformen und Fächern wiederum zeigt, dass BNE in den letzten Jahren stärker einbezogen wurde.⁵¹³

„Jedoch bleibt weiterhin neben einzelnen Ländern mit querschnittlicher Verankerung die starke Tendenz einer Konzentration auf einzelne (Träger-)Fächer mit engen thematischen Bezügen bestehen.“⁵¹⁴

Die Problematik des fehlenden Einbezugs von BNE in Vorgaben wird auch in repräsentativen Umfragen⁵¹⁵ unter Lehrkräften widerspiegelt. Die nicht ausreichende Verankerung von BNE in diesen Bereichen wird in einer Studie von Brock und Grund von 2019 bei 80 % der befragten Lehrkräfte als Hürde zur Einbindung von BNE empfunden.⁵¹⁶ Auch im Rahmen dieser Arbeit wurde sowohl bei der Umfrage *„Uni fragt Schule: Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht“* als auch während verschiedener Erprobungsgelegenheiten erkennbar, dass Lehrkräfte die mangelnden Bezüge zu Lehrplänen als hinderlich erachteten, wenn es - auf das Fach Chemie bezogen - um den Einbezug von Themen in den Unterricht ging, die den Schwerpunkt BNE setzen. Neben der mangelnden Einbettung in Lehrpläne wurden von Lehrkräften in der Studie von Brock und Grund als weitere große Hürden nicht ausreichende Angebote an Weiterbildungen

⁵⁰⁷ Brock, Antje: *Verankerung von Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule*, Berlin 2017.

⁵⁰⁸ Holst, Jorrit; Brock, Antje: *Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) in der Schule: Strukturelle Verankerung in Schulgesetzen, Lehrplänen und der Lehrerbildung*, Berlin 2020.

⁵⁰⁹ Brock, Antje; Holst, Jorrit: *Schlüssel zu Nachhaltigkeit und BNE in der Schule: Ausbildung von Lehrenden, Verankerung in der Breite des Fächerkanons und jenseits der Vorworte. Kurzbericht des Nationalen Monitorings zu Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE)*, Berlin 2022.

⁵¹⁰ Brock/Holst, Schlüssel zu Nachhaltigkeit und BNE in der Schule, S. 2.

⁵¹¹ Ebd., S. 5.

⁵¹² Ebd., S. 10.

⁵¹³ Ebd., S. 13.

⁵¹⁴ Ebd.

⁵¹⁵ Brock, Antje; Grund, Julius: *Executive Summary. Bildung für nachhaltige Entwicklung in Lehr-Lernsettings – Quantitative Studie des nationalen Monitorings – Befragung von LehrerInnen*, Berlin 2019.

online unter: https://www.ewi-psy.fu-berlin.de/einrichtungen/weitere/institut-futur/aktuelles/dateien/executive_summary_lehrerinnen.pdf, (Zugriff: 20.01.2024)

⁵¹⁶ Befragt wurden insgesamt 525 Lehrkräfte an allgemeinbildenden und Berufsschulen in ganz Deutschland. Zudem sind alle Fächerformen vertreten. Die Anteile von Lehrkräften der unterschiedlichen Schulformen und das Geschlechterverhältnis können als repräsentativ angesehen werden.

(vgl.: Brock/Grund, Executive Summary. Bildung für nachhaltige Entwicklung)

zum Thema BNE, unzureichendes Wissen und kaum vorhandene Unterrichtsmaterialien benannt.⁵¹⁷ Obwohl der Wunsch der Lehrkräfte nach mehr Unterrichtszeit unter dem Aspekt Nachhaltigkeit sehr groß ist und BNE auch eine hohe Relevanz beigemessen wird, gaben nur 36 % der Lehrkräfte an, BNE im eigenen Unterricht umzusetzen, 28 % verneinten das und weitere 36 % wählten als Antwort, dass sie unsicher wären, weil sie nicht wüssten, was BNE ausmacht.⁵¹⁸ Wie in *Kapitel 6.2.* dargestellt, ist die Definition von BNE nicht immer einheitlich. Dies scheint sich auch in der von den Lehrkräften benannten Unsicherheit widerzuspiegeln.⁵¹⁹ Brock und Grund fassen die Problematik in dem Begriff der „Wunsch-Realismus-Diskrepanz“⁵²⁰ zusammen und empfehlen, Anstrengungen zur strukturellen Umsetzung von BNE auf föderaler Ebene stärker zu intensivieren, um das Interesse der Lehrkräfte zu fördern und Wissensdefizite zu beseitigen.⁵²¹

In Bezug auf die in der Umfrage *„Uni fragt Schule: Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht“* erhaltenen Ergebnisse, zeigt sich zwar, dass bereits drei Viertel der teilnehmenden Lehrkräfte angaben, dass sie BNE in ihren Unterricht umsetzen würden (*siehe Kap. 4.1.3.*), allerdings handelt es sich bei der befragten Gruppe nur um Lehrkräfte naturwissenschaftlicher Fächer. Ähnliche Zusammenhänge zeigen sich auch bei der Studie von Brock und Grund, wo in BNE-affinen Fächern wie Chemie tendenziell mehr Bezüge zu nachhaltiger Entwicklung wiederzufinden sind.⁵²² Angebote für Lehrkräfte in Form von Weiterbildungen oder Materialien mit dem Fokus BNE erscheinen als sinnvolles und gewünschtes Mittel, Themen nachhaltiger Entwicklung in die Schule und in den Chemieunterricht einzubinden, besonders vor dem Hintergrund, dass viele Lehrkräfte während ihrer Ausbildung an den Hochschulen nur selten mit BNE in Berührung kamen.⁵²³ Daher kommt auch der Aus- und Weiterbildung von Lehrkräften eine besondere Rolle bei der Verankerung von BNE zu. Zwar ist auch im Hochschulbereich die systematische Einbeziehung von BNE in Lehramtsstudiengänge noch nicht zu erkennen, jedoch gibt es an verschiedenen Universitäten Netzwerke (Hochschulnetzwerk BNE in der Lehrkräftebildung in NRW⁵²⁴ der Bergischen Universität Wuppertal) zur Förderung von BNE in der Lehrkräftebildung.⁵²⁵

⁵¹⁷ Brock/Grund, *Bildung für nachhaltige Entwicklung in Lehr-Lernsettings*, S. 5.

⁵¹⁸ Ebd., S. 4-5.

⁵¹⁹ Ebd., S. 4.

⁵²⁰ Ebd., S. 7.

⁵²¹ Ebd.

⁵²² Ebd., S. 4.

⁵²³ Ebd., S. 3.

⁵²⁴ Hochschulnetzwerk BNE in der Lehrkräftebildung in NRW: <https://www.geographie.uni-wuppertal.de/de/bne-hochschulnetzwerk/> (15.03.2024).

⁵²⁵ Brock/Holst, *Schlüssel zu Nachhaltigkeit und BNE in der Schule*, S. 18.

6.5. Verlaufspläne BNE im Chemieunterricht

Wie bereits in den vorherigen Unterkapiteln dargestellt, sind die Rahmenvorgaben für das Unterrichtsfach Chemie in Bezug auf BNE und dortige Einbindungsmöglichkeiten sowohl auf Bundes- wie auch auf Landesebene nur wenig konkret gehalten und meistens auf eine kleine Auswahl an Themenvorschlägen beschränkt. Zur Unterstützung von Lehrkräften wurden daher in der Chemiedidaktik der Bergischen Universität Wuppertal Verlaufspläne entwickelt, die die Einbindung fast aller SDGs an die Inhaltsfelder der Kernlehrpläne Chemie NRW für Sek. I⁵²⁶ und II⁵²⁷ an Gymnasien und Gesamtschulen aufzeigen und konkrete Beispiele geben, welche BNE-bezogene Themen exemplarisch mit möglichen Kompetenzen an etablierte Fachinhalte angebunden werden können⁵²⁸ (siehe Abb. 54 & Abb. 55). Damit soll auch ein Beitrag zum Handlungsfeld „Förderung der Kompetenzentwicklung von Lehrenden“, das in BNE 2030 formuliert ist (siehe Kap. 6.2.1.), geleistet werden. Die auf der Homepage der Chemiedidaktik abrufbaren Verlaufspläne sollen als Angebot und Anregung dienen und einen möglichen Einbindungsweg von BNE in das Fach Chemie aufzeigen. Sie sind auch auf Lehrpläne anderer Bundesländer adaptierbar, da viele Inhalte in ähnlicher Weise und nur mit leicht variierenden Bezeichnungen wiederzufinden sind.⁵²⁹ Pläne zu Inhalten des Fachs Naturwissenschaften an Gesamtschulen in der Sek. I wurden ebenfalls erstellt,⁵³⁰ sowie im Rahmen von Abschluss- und Seminararbeiten Pläne für den Sachunterricht im Primarbereich⁵³¹ und für den Chemieunterricht an Berufskollegs im Ausbildungszweig Chemikant*in.⁵³²

In direktem Bezug zu den Charakteristika von BNE Lernprozessen, die u.a. in der Leitlinie BNE NRW beschrieben werden, wurde besonders auf die Aspekte innerhalb der Inhaltsfelder des Kernlehrplans Chemie für Sek. I und II an Gymnasien und Gesamtschulen geblickt, die eine multiperspektivische, interdisziplinäre oder mehrdimensionale Betrachtungsweise ermöglichen. Hierzu zählten vor allem die formulierten Kompetenzerwartungen des Bereichs Bewerten, in denen z.T. explizit Perspektivwechsel gefordert werden, die über die Fachinhalte eines Themengebiets hinaus gehen.

⁵²⁶ Ministerium für Schule und Bildung Nordrhein-Westfalen (MSB NRW): *Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Chemie*, Düsseldorf 2019; online unter: https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/198/g9_ch_klp_%203415_2019_06_23.pdf, (10.09.2023).

⁵²⁷ MSB NRW, Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Chemie.

⁵²⁸ Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *BNE im Chemieunterricht - von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung*, in: CHEMKON 29 (S1), 2022, S.240-241.

⁵²⁹ Kiesling et al., BNE im Chemieunterricht, S. 240.

⁵³⁰ Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Verlaufsplan BNE-geeigneter Themen für den Naturwissenschaftlichen Unterricht Sek. I (Ge)*, Wuppertal 2021; online unter: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/>, (15.03.2024).

⁵³¹ Pitzke, Jana: *Entwicklung eines BNE-bezogenen Leitfadens für Lehrkräfte des Sachunterrichts*. Bachelorarbeit, Wuppertal 2022, S. 58-75.

⁵³² Eixler, Anna: *Verlaufsplan BNE-geeigneter Themen für den Chemieunterricht an Berufskollegs (Chemikant*in, 1. & 2. Lehrjahr)*, Wuppertal 2023; online unter: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/>, (14.03.2024).

Sek. I	Sustainable development goals (SDGs)	Inhaltsfeld Thema Kompetenzen
1. Progressionsstufe	12	Inhaltsfeld 1: Stoffe und Stoffeigenschaften Stofftrennung und Mülltrennung <i>Methoden der Stofftrennung auf die Mülltrennung übertragen und vergleichen</i>
	7	Inhaltsfeld 2: Chemische Reaktion Leuchten ohne Wärme – Chemolumineszenz <i>Einsatz klassischer Leuchtmittel bewerten</i>
	13	Inhaltsfeld 3: Verbrennung Gesetz der Erhaltung der Masse <i>Folgen des Kohlenstoffdioxid-Eintrags in unsere Umwelt untersuchen und erste Handlungsoptionen ableiten</i>
	8, 10, 12	Inhaltsfeld 4: Metalle und Metallgewinnung Recycling von Elektroschrott – Metallrecycling <i>Persönliches Konsumverhalten beschreiben und analysieren, Notwendigkeit eines ressourcenschonenden Umgangs bei Konsumprodukten begründen</i>
	9, 8, 12	Inhaltsfeld 5: Elemente und ihre Ordnung Seltene Erden – Vorkommen, Nutzung und Recycling <i>Gesellschaftliche Folgen des Abbaus analysieren und Bedeutung für eine soziale Gerechtigkeit diskutieren</i>
	2, 15	Inhaltsfeld 6: Salze und Ionen Boden als Ionenaustauscher <i>Methoden nachhaltigen Einsatz von Düngesalzen beschreiben und Folgen für die Qualität von Böden und Anbau von Nutzpflanzen beurteilen</i>
	7, 9, 11	Inhaltsfeld 7: Chemische Reaktionen durch Elektronenübertragung Brennstoffzelle <i>Alternativen zur klassischen Batterie diskutieren und Nutzen und Risiken dieser Technologien bewerten</i>
	16	Inhaltsfeld 8: Molekülverbindungen Die Ammoniaksynthese – der Griff in die Luft <i>Mithilfe historischer Sachverhalte Verantwortung der Wissenschaft für die Gesellschaft erörtern</i>
	6, 15	Inhaltsfeld 9: Saure und alkalische Lösungen Saurer Regen <i>Eintrag von Säuren in die Umwelt erläutern und Handlungsoptionen zum Schutz von Gewässern und Natur beschreiben</i>
	9, 12, 14	Inhaltsfeld 10: Organische Chemie Kunststoffmüll in Weltmeeren <i>Eintrag von Mikroplastik in die Umwelt erörtern und Recyclingfähigkeit unterschiedlicher Kunststoffe beurteilen</i>
2. Progressionsstufe		

AK Bohrmann-Linde, Wuppertal 2022

Abb. 54: Verlaufsplan für den Chemieunterricht in der Sek. I an Gymnasien⁵³³

⁵³³ Abbildung entnommen von: Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Verlaufsplan BNE-gereigneter Themen für den Chemieunterricht Sek. I (Gym/Ge)*, Wuppertal 2022; online unter: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/> (15.03.2024).

Sek. II	Sustainable development goals (SDGs)	Inhaltsfeld Thema Kompetenzen
EF		Inhaltsfeld 1: Organische Stoffklassen Aromastoffe in Lebensmitteln <i>Wirtschaftlichen und gesundheitlichen Nutzen von Lebensmittelzusatzstoffen für den eigenen Konsum bewerten</i> Eintrag von Lösemitteln in die Umwelt <i>Verwendung von Lösemitteln in Farben und Lacken beurteilen und Gefahren sowie Entsorgungsmöglichkeiten diskutieren</i> Inhaltsfeld 2: Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt <i>Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid und Nutzung von Kohlenstoffdioxid als Rohstoff beschreiben.</i> Katalyse in technischen Verfahren <i>Nutzen und Grenzen der Beeinflussung des chemischen Gleichgewichts bei der Ammoniaksynthese und historische Bedeutung dieses Synthesewegs für die Ernährung erläutern</i>
		Inhaltsfeld 3: Säuren, Basen und analytische Verfahren Säuren und Basen in Alltagsprodukten <i>Wirksamkeit verschiedener Reinigungsmittel vergleichen und ihre Anwendungsgebiete beurteilen</i> Wasserqualität <i>Parameter für eine gute Wasserqualität in der Umwelt bestimmen und experimentell überprüfen</i> Inhaltsfeld 4: Elektrochemische Prozesse und Energetik Alternative Energiequellen – Wasserstoff und Elektromobilität <i>Zu politischen Impulsen zur Energiewende Stellung nehmen und den Einsatz von Wasserstoff und Strom für den Mobilitätssektor beurteilen</i> Metallkorrosion <i>Korrosionsschutzmaßnahmen unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten beschreiben und Handlungsoptionen aufzeigen</i> Inhaltsfeld 5: Reaktionswege in der organischen Chemie Fette in Nahrungsmitteln <i>Qualität von Fetten für eine ausgewogene Ernährung beurteilen und deren Bedeutung für Menschen in Industrie- und Entwicklungsländern erörtern</i> Power to chemicals – Methanol <i>Bedeutung von Grundchemikalien wie Methanol für die chemische Industrie erklären und alternative Synthesewege bewerten</i> Inhaltsfeld 6: Moderne Werkstoffe Kunststoff-Recycling <i>Ökonomische, ökologische und sozial Aspekte abwägen und zu Recyclingverfahren (werkstoffliches, rohstoffliches und thermisches Recycling) Stellung beziehen</i> Biologisch abbaubare Kunststoffe <i>Herstellung, Verwendung und Entsorgung von „Bio“-Kunststoffen aus unterschiedlichen Perspektiven bewerten</i>
Q1/Q2		

AK Bohrmann-Linde, Wuppertal 2022

Abb. 55: Verlaufsplan für den Chemieunterricht in der Sek. II an Gymnasien⁵³⁴

⁵³⁴ Abbildung entnommen von: Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Verlaufsplan BNE-gerechter Themen für den Chemieunterricht Sek. II*, Wuppertal 2022; online unter: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/> (15.03.2024).

An dieser Stelle sei kurz ein Beispiel vorgestellt, wie die Verlaufspläne (*siehe Abb. 55*) entwickelt wurden. Innerhalb des Inhaltsfeldes Organische Chemie wird vorgegeben, dass die Lernenden „am Beispiel eines chemischen Produkts Kriterien hinsichtlich Verwendung, Ökonomie, Recyclingfähigkeit und Umweltverträglichkeit abwägen und im Hinblick auf die Verwendung einen eigenen sachlich fundierten Standpunkt beziehen“.⁵³⁵ Somit sollen nicht nur mit der Ökologie und Ökonomie zwei unterschiedliche Dimensionen bei der Bewertung berücksichtigt werden, sondern auch Kriterien abgewogen werden, in welcher Art chemische Produkte eingesetzt werden können und sollen. Für eine solche Abwägung ist es jedoch unerlässlich, dass aus verschiedenen Perspektiven, bspw. unter der Berücksichtigung verschiedener Umweltaspekte eine Beurteilung von Produkten durch die Lernenden erfolgt. Als mögliches Thema bietet sich daher für den Chemieunterricht das Thema Kunststoffe als eine Gruppe chemischer Produkte an, die den Alltag von Lernenden prägt und daher als Gegenstand für eine solche Auseinandersetzung geeignet erscheint. Als beispielhafte Kompetenzerwartung kann hierbei für die Lernenden angefügt werden, dass sie den Eintrag von (Mikro)plastik in die Umwelt erörtern und anschließend die Recyclingfähigkeit unterschiedlicher Kunststoffarten beurteilen.⁵³⁶ So kann einerseits die Problematik des stark zunehmenden Eintrags von Kunststoffen in die Umwelt angesprochen und andererseits auf die Möglichkeiten des Umweltschutzes durch geeignete Recyclingmaßnahmen eingegangen werden. Letzteres eröffnet so auch die Option, die Recyclingfähigkeit bspw. von Verpackungsmaterial zu erörtern und mögliche Handlungsoptionen zu formulieren, wie dem Eintrag von (Mikro)plastik entgegengewirkt werden kann. Zur visuellen Unterstützung wurden zudem die Icons der SDGs der Agenda 2030 den Inhalten und im Verlaufsplan benannten Themen zugeordnet. Die Zuordnung der SDGs ermöglicht die Erweiterung der benannten Themen und Kompetenzen mit Bezug zu den Zielen, die die UN 2015 formulierte. Diese Ziele mit ihren Unterzielen sind es letztendlich, deren Erreichung im Fokus der internationalen wie auch nationalen Bemühungen stehen, die Welt nachhaltig in Bereichen Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft umzugestalten. Daher sollen sie auch als Ankerpunkte für den Einbezug von BNE-Lernprozessen an bestehende Fachinhalte gesehen werden. Nach diesem Vorgehen während der Sichtung der Lehrpläne wurden auch andere Themen für die einzelnen Inhaltsfelder in der Sek. I und Sek. II ausgewählt, sodass BNE an alle obligatorischen Inhalte des Curriculums angebunden werden kann. Somit ermöglichen die Pläne Lehrkräften einen Überblick, wie BNE nicht als Aufgabenbereich zusätzlich zu den bestehenden Fachinhalten, sondern in bereits etablierte Unterrichtsthemen eingebunden werden kann. Berücksichtigt wurden nicht nur, aber auch aktuelle Themen, die in Wissenschaft, Forschung und Gesellschaft diskutiert werden, wie alternative Energiequellen, Power-to-chemicals oder die Reduzierung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen mittels CCS oder CDR (Carbon Dioxide Removal). Des Weiteren konnten über alle Inhaltsfelder hinweg fast alle SDGs (mit Ausnahme des SDG 17 - Partnerschaften für die Ziele) in die Verlaufspläne für das Fach Chemie integriert werden.

⁵³⁵ MSB NRW, Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Chemie., S. 36.

⁵³⁶ Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Verlaufsplan BNE-geeigneter Themen für den Chemieunterricht Sek. II*, Wuppertal 2022; online unter: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/> (15.03.2024).

6.6. Wasserstoff und Photoreformierung im schulischen Kontext: Ankerpunkte

In fachdidaktischen Zeitschriften lässt sich bereits seit vielen Jahren das Thema Wasserstoff finden, das aus der Perspektive einer nachhaltigen Entwicklung aufgegriffen wurde. Auch wenn die Begrifflichkeit „grüner“ Wasserstoff erst heutzutage gebräuchlich ist, wurden Hintergründe und Projekte vorgestellt, die „grünen“ Wasserstoff in den Blick nehmen. Bereits 1993 wurde in der didaktischen Zeitschrift „PLUS LUCIS“, dem Mitteilungsblatt des Vereins zur Förderung des physikalischen und chemischen Unterrichts und des Fachausschusses der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, im Rahmen einer vorgestellten Projektwoche die Solar-Wasserstoffanlage in Neunburg vorm Wald vorgestellt.⁵³⁷ Dabei wird auch explizit die Wasserstoffherzeugung mittels Elektrolyse vor dem Hintergrund der Umweltproblematik und Kohlenstoffdioxid-Emissionen benannt und das Projekt vorgestellt.⁵³⁸ Damit wird aus der didaktischen Perspektive sowohl BNE als auch Wasserstoff in das Zentrum einer Lernumgebung gerückt.

Im Folgenden wird ein Schwerpunkt auf die Untersuchung der Kernlehrpläne NRW für Chemie an Gymnasien und Gesamtschulen gelegt, die den Ausgangspunkt der Versuchs- wie auch der Materialentwicklung bilden, um die Photoreformierung in die bestehenden Lehrpläne für das Fach Chemie an Gymnasien und Gesamtschulen einordnen zu können. Daneben wird aber auch exemplarisch auf andere Vorgaben verschiedener Bundesländer für das Fach Chemie geblickt, um zu zeigen, dass Thema und Materialien für andere Bundesländer adaptierbar sind und dort auch gewinnbringend eingesetzt werden können.

6.6.1. Lehrpläne NRW

In den Kernlehrplänen Chemie für die Sekundarstufen I. und II. (Gymnasium/Gesamtschule) in NRW wird der Begriff Wasserstoff in den Inhaltsfeldern der Sek. I einmal benannt und der Sek. II gar nicht. Die Nennung in der Sekundarstufe I erfolgt im Zusammenhang mit der Analyse von Wasser und der Nachweisreaktion von Wasserstoff. Wesentlich häufiger ist allerdings der Begriff „Brennstoffzelle“ wiederzufinden, wodurch ein direkter Bezug zum Thema Wasserstoff ermöglicht wird. Sowohl in der Sek. I als auch in der Sek. II ist das Thema Brennstoffzellen an die Inhaltsfelder zur Elektrochemie angeknüpft.

Innerhalb der Sek. I lassen sich Bezüge zur Herstellung von Wasserstoff mittels Photoreformierung im Inhaltsfeld „Chemische Reaktionen durch Elektronenübertragung“⁵³⁹ finden. Als inhaltlicher Schwerpunkt wird hierbei auch „Elektrolyse“ aufgeführt, allerdings liegt bei den Kompetenzerwartungen der Fokus auf der Beschreibung von elektrochemischen Energiequellen.⁵⁴⁰ Insgesamt betrachtet kann das Thema Photoreformierung nur sehr begrenzt an die Inhalte der Sek. I angebunden werden, da sich Bezüge nur zu Inhalten des KLPs finden lassen, die einen tiefergehenden Blick auf die Wasserstoffherstellung

⁵³⁷ Korczak, Peter: *Die Solar-Wasserstoffanlage in Neunburg vorm Wald*, in: PLUS LUCIS (3), 1993, S. 14.

⁵³⁸ Korczak, *Die Solar-Wasserstoffanlage in Neunburg vorm Wald*, S. 14.

⁵³⁹ MSB NRW, Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Chemie, S. 31-32.

⁵⁴⁰ Ebd., S. 31.

ermöglichen. Die Thematisierung der unterschiedlichen Produktionswege von Wasserstoff kann zwar angebahnt werden, jedoch ist die umfassende Bewertung von Wasserstoff als Energieträger hinsichtlich der Kohlenstoffdioxidbilanz und der Wirtschaftlichkeit sowie die Einbindung von Photoreformierung als weiteren Weg, „grünen“ Wasserstoff herzustellen über dem Niveau der Sek. I.

In der Sek. II sind im Grundkurs als inhaltliche Schwerpunkte für das Inhaltsfeld Elektrochemie sowohl die elektrochemische Gewinnung von Stoffen als auch mobile Energiequellen benannt. Damit einhergehend sind die Wasserelektrolyse und Brennstoffzellen als mögliche Kontexte für den Unterricht aufgeführt.⁵⁴¹ Die Herstellung und Nutzung von Wasserstoff für den Mobilitäts- und Energiesektor sind somit eindeutig hervorgehoben und spielen für den Chemieunterricht in der Oberstufe eine besondere Rolle. Innerhalb der Kompetenzbereiche sind neben dem Umgang mit Fachwissen unter dem Aspekt der Funktionsabläufe bei Elektrolyse und Brennstoffzellen⁵⁴² vor allem in den Bereichen Kommunikation und Bewertung Kompetenzen formuliert, die eine Einbindung des Themas Photoreformierung aus unterschiedlichen Perspektiven ermöglichen. Die Lernenden sollen einerseits „[...] fachlich korrekt und folgerichtig über Vorzüge und Nachteile unterschiedlicher mobiler Energiequellen [argumentieren] und dazu gezielt Informationen aus[wählen].“⁵⁴³ und andererseits „die elektrolytische Gewinnung eines Stoffes aus ökonomischer und ökologischer Perspektive [erläutern und beurteilen]“⁵⁴⁴ sowie „[...] innovative und herkömmliche elektrochemische Energiequellen (u. a. Wasserstoff-Brennstoffzelle) [vergleichen und bewerten]“.⁵⁴⁵ Auch für den Leistungskurs sind diese Kompetenzen identisch formuliert.⁵⁴⁶ Bei den Kompetenzerwartungen sollen explizit Elektrolyseprozessen aus zwei verschiedenen Dimensionen betrachtet werden, wodurch indirekt BNE angesprochen wird. Aber auch im Kompetenzbereich Kommunikation lassen sich Bezüge zu BNE herstellen, da bei der argumentativen Betrachtung von Energiequellen bezüglich ihrer Vor- und Nachteile verschiedene Perspektiven eingenommen werden müssen.

Im Rahmen dieser z. T. nur indirekt angesprochenen Bezüge zu BNE eröffnen sich Möglichkeiten auf Basis der durch das Bundesland NRW in der Leitlinie BNE geschaffenen Anforderungen an BNE-Lernprozesse sowie die obligatorische Einbindung von BNE in den Fächerkanon, dass bei der Bewertung unterschiedlicher Energiequellen aus einer multiperspektivischen und mehrdimensionalen Betrachtung innovative Forschungsthemen einbezogen werden können. Daher lassen sich hier an die Inhalte des KLPs Chemie für die Sek. II auch die Farben des Wasserstoffs anbinden, die die unterschiedlichen Produktionswege dieses Energieträgers farblich kodiert darstellen. Innerhalb dessen können die Besonderheiten der verschiedenen Produktionswege betrachtet und schließlich die Photoreformierung als eine weitere mögliche Alternative vorgestellt werden, wie „grüner“ Wasserstoff produziert werden kann. Dadurch kann auf ökologische und ökonomische Aspekte der Produktion von „grünem“ Wasserstoff eingegangen werden.

⁵⁴¹ MSB NRW, Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Chemie, S. 33.

⁵⁴² Ebd., S. 33-34.

⁵⁴³ Ebd., S. 34.

⁵⁴⁴ Ebd., S. 35.

⁵⁴⁵ Ebd.

⁵⁴⁶ Ebd., S. 50-52.

6.6.2. Bezüge in Lehrplänen anderer Bundesländer

Beim Blick auf Lehrpläne und Rahmenvorgaben in anderen Bundesländern lassen sich z.T. sehr spezifische Bezüge zum Thema Photoreformierung herstellen. Im *Lehrplanplus* für Gymnasien in Bayern sind für die Jahrgangsstufe 13 sowohl für das grundlegende Anforderungsniveau mit „Chemie und Nachhaltigkeit“⁵⁴⁷ als auch für das erhöhte Anforderungsniveau mit „Energie und Nachhaltigkeit“⁵⁴⁸ Themen formuliert, die im Rahmen des Schwerpunktes Nachhaltigkeit das Thema Photokatalyse aufgreifen. Konkret lautet es, dass die Lernenden „die elektrochemische und photokatalytische Spaltung der Wassermoleküle, sowie die Möglichkeiten zur physikalischen und chemischen Wasserstoffspeicherung in technischen Verfahren [vergleichen] und diese im Hinblick auf die Realisierung einer „künstlichen Photosynthese“ [beurteilen].“⁵⁴⁹ Zu diesem Punkt wird zudem noch eine Bewertungskompetenz hinzugezogen, dass die Lernenden „[...] den Bedarf an Grundstoffen und Katalysatoren und das Potenzial zur Energiespeicherung aus ökonomischer und ökologischer Sicht [bewerten]“⁵⁵⁰. Als inhaltliche Schwerpunkte werden neben der elektrochemischen auch die photokatalytische Spaltung von Wasser und elektrochemische und photokatalytische Prozesse konkret benannt.⁵⁵¹

In Rheinland-Pfalz wird im Inhaltsbereich „Elektronenübertragungsreaktionen (Redox- und Elektrochemie“ Sonnenlicht als zukünftiger Energieträger mit dem Aspekt Energieumwandlung angeführt.⁵⁵² Dabei wird zudem der Bezug zur Photosynthese und dem Energietransfer innerhalb technischer Prozesse zu nutzbaren Energieträgern unter dem Aspekt einer nachhaltigen Energieversorgung herausgestellt.⁵⁵³ Die Herstellung von Wasserstoff, künstliche Photosynthese, synthetische Kraftstoffe sowie Grundchemikalien werden als Vertiefungsmöglichkeit im Chemieunterricht angeführt, mit der ökologische Aspekte eingebunden werden sollen.⁵⁵⁴ Außerdem wird Wasserstoff als alternativer Energieträger im Inhaltsbereich „Umweltchemie“ im Zusammenhang mit Klimawandel und der Reduzierung der Treibhausgasemissionen thematisiert.⁵⁵⁵ Dieser Inhaltsbereich ist zudem sehr eng mit BNE verknüpft, indem verschiedene Perspektiven der Umweltchemie von den Lernenden berücksichtigt werden sollen und aus ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Blickwinkeln auf die Inhalte geschaut werden soll.⁵⁵⁶ Damit lassen sich

⁵⁴⁷ Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (ISB): *Fachlehrpläne. Gymnasium: Chemie 13 (grundlegendes Anforderungsniveau)*, <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/13/chemie/grundlegend>, (13.01.2024).

⁵⁴⁸ Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (ISB): *Fachlehrpläne. Gymnasium: Chemie 13 (erhöhtes Anforderungsniveau)*, <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/12/chemie/erhoeht>, (13.01.2024).

⁵⁴⁹ ISB, Chemie 13 (grundlegendes Anforderungsniveau), <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/13/chemie/grundlegend>, (13.01.2024).

⁵⁵⁰ Ebd.

⁵⁵¹ Ebd.

⁵⁵² Ministerium für Bildung: *Lehrplan Chemie. Grund- und Leistungsfach in der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe)*, Mainz 2022, S. 41; online unter: https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/Lehrplaene/Chemie_SekII.pdf, (13.01.2024).

⁵⁵³ Ministerium für Bildung, Lehrplan Chemie, S. 41.

⁵⁵⁴ Ebd., S. 42-43.

⁵⁵⁵ Ebd., S. 72.

⁵⁵⁶ Ebd.

auch im Lehrplan für Chemie in Rheinland-Pflanz eindeutige Bezüge herstellen, mit denen Photoreformierung und Wasserstoffproduktion eingebunden werden können.

Neben diesen expliziten Nennungen photokatalytischer Prozesse lassen sich jedoch auch in allen andern Bundesländern Bezüge zu Inhalten der Lehrpläne bzw. Curricula im Fach Chemie der gymnasialen Oberstufe finden. Das Thema Wasserstoff ist als zentraler Aspekt bei der Erarbeitung von Brennstoffzellen anzusehen. Je nach Landesvorgaben werden Brennstoffzellen im Zusammenhang mit dem Thema Elektrolyse verbunden. Eine kurze Übersicht ist in *Abbildung 56* gegeben, in welchen Bundesländern direkte oder indirekte Bezüge zu finden sind.

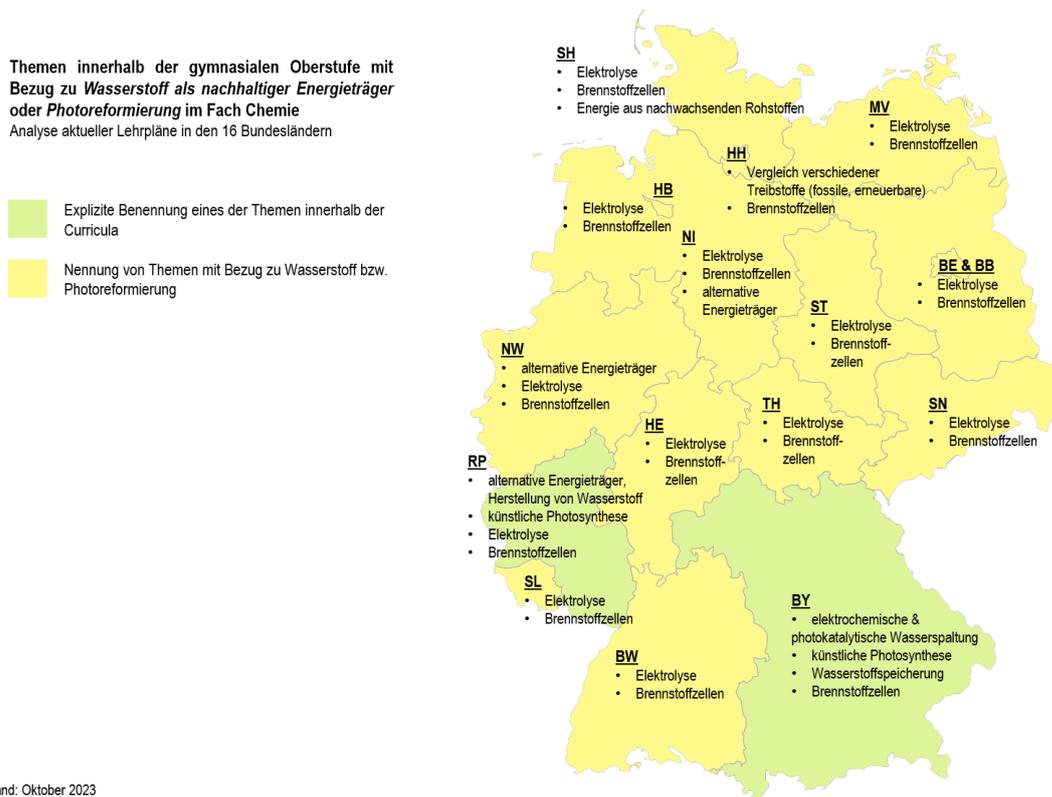


Abb. 56: Lehrplanbezüge zu Wasserstoff und Photoreformierung in den Bundesländern (eigene Darstellung)

Als Beispiel soll an dieser Stelle exemplarisch auf das Kerncurriculum für das Fach Chemie der Sek. II in Niedersachsen geblickt werden. Im erweiterten Anforderungsbereich, Fachinhalt „Elektronenübertragungsreaktionen“ werden Sach-, Kommunikations- und Bewertungskompetenzen benannt, in denen die Lernenden Batterien, Akkumulatoren und Brennstoffzellen miteinander vergleichen und diese aus ökologischer und ökonomischer Perspektive als Energiespeicher beurteilen.⁵⁵⁷ Zusätzlich sollen die Lernenden in allen Anforderungsbereichen des gleichen Fachinhalts den Einsatz von Elektrolysen in Alltag und Technik beurteilen.⁵⁵⁸ Anbindungsmöglichkeiten eröffnen sich zudem im Fachinhalt

⁵⁵⁷ Niedersächsisches Kultusministerium: *Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Berufliche Gymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg. Chemie*, Hannover 2022, S. 27; online unter: <https://cuvo.nibis.de/cuvo.php?p=download&upload=362>, (13.01.2024).

⁵⁵⁸ Niedersächsisches Kultusministerium, Kerncurriculum für das Gymnasium. Chemie, S. 26.

„Energetische und kinetische Aspekte chemischer Reaktionen“. Im Bereich der Bewertungskompetenz sollen die Lernenden „[...] ökologische und ökonomische Aspekte herkömmlicher und alternativer Energieträger [beurteilen].“⁵⁵⁹ Als weitere Kompetenzerwartung der Einführungsphase ist im Fachinhalt „Reaktionen von Alkanen“ aufgeführt, dass die Lernenden den Kohlenstoffdioxidausstoß bei Kraftfahrzeugen beurteilen sollen.⁵⁶⁰ Hierbei handelt es sich um einen Aspekt, bei dem aus der Mobilitätsperspektive auf verschiedene Antriebsformen geblickt werden kann, um sie darauf folgend zu beurteilen. Damit lassen sich hier an verschiedenen Stellen Inhalte finden, die über das Thema Brennstoffzellen Bezüge zur Produktion von Wasserstoff und den Farben des Wasserstoffs ermöglichen und als Anker für das Thema Photoreformierung dienen können.

In ähnlicher Weise sind auch Bezüge in den Lehrplänen Bayerns zu finden. Neben der Benennung photokatalytischer Prozesse wird in der 12. Jahrgangsstufe sowohl im erhöhten als auch im grundlegenden Anforderungsniveau im Lernbereich „Redoxgleichgewichte - Energetik und technische Anwendung“ auf alternative Antriebsformen geblickt und vergleichend auf die Energieumwandlung bei Verbrennungskraftwerken und Brennstoffzellen eingegangen.⁵⁶¹ Die Lernenden sollen ebenfalls die Effizienz von Elektroautos aus energetischer Perspektive bewerten.⁵⁶² Besonders hervorgehoben wird die Berücksichtigung unterschiedlicher Dimensionen (ökologisch, ökonomisch, sozial) bei beiden Aspekten.⁵⁶³ Unter dem Gesichtspunkt BNE können dadurch die Produktion von Wasserstoff für Brennstoffzellen, Wirkungsgrade unterschiedlicher Antriebsformen und die soziale Perspektive der Verkehrswende im Chemieunterricht aufgegriffen werden.

Insgesamt lassen sich diese oder ähnliche Wortlaute, in stärkerer oder schwächerer Ausprägung und leicht variierend, ob im Leistungskurs oder Grundkurs verortet, auch in Chemiecurricula anderer Bundesländer in der gymnasialen Oberstufe finden. Im Falle Schleswig-Holsteins lässt sich zudem feststellen, dass zwar die Kontexte um die Themen Brennstoffzellen und Elektrolyse nicht näher konkretisiert werden, jedoch in der Landesstrategie BNE als mögliches Thema für den naturwissenschaftlichen Unterricht die Wasserstoffstrategie des Bundes zur Auseinandersetzung mit der ökologischen und ökonomischen Relevanz des Themas Wasserstoff und alternative Antriebe benannt wird.⁵⁶⁴ Themen wie Photoreformierung und die Herstellung von Wasserstoff können somit als innovative Themen ihre Legitimierung für den Fachunterricht finden und an die obligatorischen Fachinhalte angebunden werden.

⁵⁵⁹ Niedersächsisches Kultusministerium, Kerncurriculum für das Gymnasium. Chemie., S. 17.

⁵⁶⁰ Ebd., S. 13.

⁵⁶¹ ISB, Chemie 13 (grundlegendes Anforderungsniveau),

<https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/13/chemie/grundlegend>, (13.01.2024).

⁵⁶² ISB, Chemie 13 (erhöhtes Anforderungsniveau),

<https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/12/chemie/erhoeht>, (13.01.2024).

⁵⁶³ Ebd.

⁵⁶⁴ Ministerium für Energiewende Schleswig-Holstein, Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung, S. 14.

6.6.3.Schulbücher

Der Einbezug der angesprochenen Themen lässt sich bereits in kürzlich erschienen Lehrwerken für den Chemieunterricht erkennen. Sie orientieren sich an länderspezifischen Curricula und können somit auch als Indikator gesehen werden, welchen Themen eine besondere Bedeutung eingeräumt wird. Neben Problemstellungen wie der Sicherung zukünftiger Energieversorgung werden ebenfalls Technologien wie CCS und CCUS aufgegriffen,⁵⁶⁵ die unter anderem zur Erreichung des Ziels der drastischen Treibhausgasreduzierung in den nächsten Jahrzehnten beitragen sollen. Auch Wasserstoff als zukünftiger Energieträger wird in den neuesten Schulbüchern im Kontext der Brennstoffzellen vielfach berücksichtigt. Exemplarisch werden drei aktuelle Chemielehrbücher für die gymnasiale Oberstufe in NRW betrachtet und nach entsprechenden Themen hin untersucht, damit ein kurzer Überblick darüber gegeben werden kann, inwieweit und in welcher Art und Weise die benannten Themen in Lehrwerke Einzug gehalten haben. Dabei wird auch auf Bezüge zu BNE geblickt und knapp eingeordnet, wie diese umgesetzt werden. Die Betrachtung dient dabei nicht der vollständigen Untersuchung dieser Lehrwerke oder in einer detaillierten Beurteilung, sondern der Verortung der Themen Wasserstoff und Photoreformierung innerhalb aktueller Medien im Chemieunterricht.

In *Elemente Chemie. Oberstufe*⁵⁶⁶ wird Wasserstoff als Energieträger und Reduktionsmittel in den Kapiteln zur Elektrochemie vorgestellt. Auf einer gekennzeichneten Doppelseite mit Inhalten zu nachhaltiger Entwicklung werden die Herstellungswege von Wasserstoff aufgeführt. Dabei wird auch „grüner“ Wasserstoff innerhalb der Informationstexte benannt. Dazu werden drei weitere Pfade (Dampfreformierung, Elektrolyse und Pyrolyse) zur Herstellung angesprochen.⁵⁶⁷ Eine Farbuordnung zu den vier am häufigsten genannten Farben erfolgt nicht. Thematisiert wird zudem der Einsatz „grünen“ Wasserstoffs bei der Stahlproduktion als Möglichkeit zur Emissionsreduktion von Kohlenstoffdioxid.⁵⁶⁸ Innerhalb dieser Betrachtungen liegt der Fokus weniger stark auf der Problematisierung unterschiedlicher Produktionswege von Wasserstoff. Allerdings wird mit dem Einsatz von Wasserstoff in der Stahlproduktion eine Möglichkeit vorgestellt, wie in einem Industriezweig Kohlenstoffdioxidemissionen gesenkt werden können. Damit werden neben einer ökologischen Dimension jedoch nur noch die ökonomische Perspektive bei einer weiteren Auseinandersetzung mit dem Thema in Betracht gezogen.

Verschiedene Brennstoffzelltypen stehen in *Chemie heute. Qualifikationsphase*⁵⁶⁹ im Fokus der Betrachtung zukünftiger Energiewandler. Auch hier wird dieses Thema im Kapitel zur Elektrochemie einbezogen. In den Informationstexten werden vier Typen an Brennstoffzellen vorgestellt. Die Herstellung von Wasserstoff und sein Einsatz für Brennstoffzellen wird in diesem Zusammenhang als Rechercheaufgabe formuliert, wobei die Lernenden die verschiedenen Produktionswege wie Dampfreformierung und elektrolytische Erzeugung

⁵⁶⁵ Gietz, Paul; Nelle, Peter; Penz, Carsten; Schumacher, Elke; de Vries, Wilke: *Elemente Chemie. Oberstufe. Nordrhein-Westfalen*, Stuttgart: Klett 2023.

⁵⁶⁶ Gietz et al., *Elemente Chemie*, S. 260.

⁵⁶⁷ Ebd.

⁵⁶⁸ Ebd., S. 261.

⁵⁶⁹ Menze, Steffen; van Nek, Ralf; Schulte-Coerne, Rolf; Sieve, Bernhard F. (Hrsg.): *Chemie heute S II - Nordrhein-Westfalen. Qualifikationsphase*, Braunschweig: Westermann 2022, S. 126.

miteinander vergleichen und Vor- und Nachteile herausstellen sollen.⁵⁷⁰ Hierauf aufbauend werden in einem als „Projekt“ beschriebenen Exkurs verschiedene Autoantriebe thematisiert. Neben der Betrachtung von Wirkungsgraden bei Elektroautos, Brennstoffzellenfahrzeugen und klassischen Verbrennern werden kurze Informationen zu Vor- und Nachteilen der Antriebsformen gegeben, auf deren Basis die Lernenden schließlich eine Bewertung vornehmen sollen.⁵⁷¹ Damit spielen unterschiedliche Perspektiven auf die zukünftige Entwicklung von Teilen des Verkehrssektors für die Bewertung auch von Brennstoffzellen und dem dafür bereitgestellten Wasserstoff eine entscheidende Rolle. Zwar werden nicht explizit unterschiedliche Dimensionen auf das Thema, jedoch eröffnen die Rechercheaufgaben einen weiten Spielraum bei der Betrachtung des Themas.

In *Chemie. Qualifikationsphase*⁵⁷² werden im Kapitel Elektrochemische Prozesse aufbauend auf den unterschiedlichen Brennstoffzelltypen in einem als Exkurs angelegten Abschnitt die „Farben des Wasserstoffs“ vorgestellt sowie für den Leistungskurs nachhaltige Energieträger und Energiespeicher als Thema vorgeschlagen.⁵⁷³ Bei den „Farben des Wasserstoffs“ wird dabei „Der Wettlauf um den ‚grünen Wasserstoff‘“⁵⁷⁴ in den Fokus gesetzt und die verschiedenen Produktionswege von Wasserstoff dargestellt. Neben den vier am häufigsten benannten Farben des Wasserstoffs, werden für den „grünen“ Wasserstoff auch noch weitere Wege aufgeführt, wie dieser hergestellt werden kann, bspw. photolytisch mittels Mikroorganismen.⁵⁷⁵ Die Lernenden sollen so aus verschiedenen Perspektiven Informationen zu den Produktionswegen recherchieren, um diese anschließend bewerten zu können. Auch ein Vergleich zwischen Brennstoffzellenantrieben und der Elektromobilität wird in den darauffolgenden Doppelseiten angestrebt.⁵⁷⁶ Damit wird die Berücksichtigung verschiedener Dimensionen und Perspektiven angestrebt und vermittelt, dass nicht nur eine Lösung existiert, sondern Vor- und Nachteile verschiedener Lösungswege abgewogen werden müssen und zum Teil Kombinationen verschiedener Ansätze nötig sind.

Insgesamt lässt sich in dieser kleinen, beispielhaften Auswahl an Lehrwerken für NRW erkennen, dass Wasserstoff im Zusammenhang mit Brennstoffzellen und Elektromobilität bei der Betrachtung alternativer Antriebsformen berücksichtigt wird. Dabei werden auch die Herstellungswege von Wasserstoff thematisiert, die letztendlich ausschlaggebend sind für eine Beurteilung des Energieträgers Wasserstoff und den Vergleich zu Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien oder fossilen Energieträgern. Mehr oder weniger stark wird in entsprechenden Kapiteln die Abwägung von Chancen und Risiken bestimmter Lösungswege problematisiert, sodass die Lernenden aus verschiedenen Perspektiven darauf blicken und eine Bewertung vornehmen sollen. Die Darstellung weiterer Wege zur Herstellung von „grünem“ Wasserstoff ist jedoch nur selten Gegenstand tieferer Auseinandersetzung, da nur in einem Lehrwerk andere Möglichkeiten betrachtet werden. Nur bei den Rechercheaufgaben zu Herstellungsweisen können indirekt Alternativen einbezogen werden.

⁵⁷⁰ Menze et al., *Chemie heute* S II, S. 127.

⁵⁷¹ Ebd., S. 128-129.

⁵⁷² Bohrmann-Linde, Claudia; Siehr, Ilona (Hrsg.): *Chemie. Qualifikationsphase. Nordrhein-Westfalen*, Bamberg: Buchner 2023.

⁵⁷³ Bohrmann-Linde/Siehr, *Chemie. Qualifikationsphase*, S. 160-161.

⁵⁷⁴ Ebd.

⁵⁷⁵ Ebd.

⁵⁷⁶ Ebd., S. 162-163.

6.6.4. Zwischenfazit

Insgesamt betrachtet zeigt sich im Hinblick auf Curricula und Unterrichtswerke, aber auch auf die Rahmenbedingungen für BNE, dass das Thema Wasserstoff als zukünftiger Energieträger eine große Relevanz besitzt, als Unterrichtsgegenstand in den Chemieunterricht einbezogen zu werden. Damit verbunden kann auch Photoreformierung als alternativer Weg „grünen“ Wasserstoff herzustellen ebenfalls gewinnbringend in den Unterricht einbezogen werden. Besonders Bewertungskompetenzen zu Aspekten wie Bereitstellung von Wasserstoff, nachhaltige Energieträger und Mobilität, die indirekt wie auch direkt BNE-Lernprozesse adressieren, sollen und können angesprochen werden. Die Photoreformierung scheint dabei verschiedene Themenbereiche vereinen zu können und die Auseinandersetzung und Verknüpfung mit verschiedenen Inhalten der Lehrpläne zu ermöglichen. Neben den fachwissenschaftlichen Aspekten, mit denen die grundlegenden Prozesse während der Photoreformierung erklärt werden können, lassen sich sowohl ökologische als auch ökonomische und gesellschaftliche Gesichtspunkte thematisieren, die aufbauend auf dem Fachwissen eingebunden werden können.

Der „Dreischritt“ von BNE-Lernprozessen Erkennen, Bewerten und Handeln lässt sich auch auf die Thematik der Photoreformierung übertragen. Wie bereits erwähnt, ist im schulischen Kontext der Kompetenzbereich Handeln nicht ohne gewisse Einschränkungen umsetzbar, jedoch können Handlungsoptionen mit den Lernenden diskutiert werden. Für die Photoreformierung als Möglichkeit „grünen“ Wasserstoff herzustellen, ergibt sich die Möglichkeit, dass die Lernenden Vor- und Nachteile dieses und weiterer Produktionswege erkennen und die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im Kontext der Energiewende bewerten, um anschließend Handlungsoptionen zu entwickeln, wie Wasserstoff sinnvoll bspw. in Verkehr und Industrie eingesetzt werden kann.

6.7. Materialentwicklung

Bei der Entwicklung der Materialien für das Experiment zur Photoreformierung sollten verschiedene Aspekte bei der Konzipierung berücksichtigt werden. Neben den curricularen Vorgaben, die einen Ankerpunkt zur Einbindung innovativer Themen in den Chemieunterricht bilden und daher unbedingt beachtet werden sollten, spielten auch die Vorgaben, die an BNE-Lernprozesse in den verschiedensten Rahmenplänen und wissenschaftlichen Publikationen formuliert werden, eine wichtige Rolle für die Implementation des Themas Photoreformierung in das Fach Chemie, die Entwicklung der Experimente und die Erstellung dazugehöriger Materialien. Dabei flossen verschiedene Aspekte in die Entwicklung der Materialien ein, die folgenden kurz dargestellt werden sollen. Am Beginn stand die an die Lehrkräfte gerichtete Umfrage *„Uni fragt Schule: Bezugspunkt BNE und bilingualer naturwissenschaftlicher Unterricht“* (siehe Kap. 4.). Beabsichtigt wurde, dass das entwickelte Material die Bedürfnisse und Wünsche, die von Lehrkräften geäußert wurden, berücksichtigt und mit einbezieht. Durch die Umfrage konnte ein grundsätzliches Interesse an den Themen Wasserstoff und Photoreformierung festgestellt

werden, was eine Legitimationsgrundlage für die weitere Umsetzung beider Themen in Form von Experimenten und begleitenden Materialien gab.

Daneben sollten die Vorgaben, die durch den Kernlehrplan Chemie Sek. II NRW an Inhalte und Kompetenzen gestellt werden, im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden. Da wie bereits dargestellt die Themen Wasserstoff und Brennstoffzellen als Ankerpunkte für das Thema Photoreformierung fungieren, wurde das Material in der Art ausgearbeitet, dass es an das Inhaltsfeld „Elektrochemie“ angebunden wurde. Thematisch wurde deshalb ein Vergleich zwischen der Elektromobilität und Brennstoffzellen-basierten Antrieben gewählt. Der inhaltliche Schwerpunkt wurde beim Material auf Wasserstoff gelegt, um das Experiment zur Photoreformierung einzubetten. Die Bereitstellung von Wasserstoff als Energieträger und der Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor wurden in den Fokus gesetzt. Die Elektromobilität wurde als zu vergleichendes Element hinzugezogen, da im Inhaltsfeld „Elektrochemie“ elektrochemische Prozesse in Batterien und Brennstoffzellen eingehend mit Schülerinnen und Schülern behandelt werden. Daher können die elektrochemischen Prozesse in beiden Fällen als Vorwissen der Schülerinnen und Schüler angesehen werden. Des Weiteren wurde bei der Erstellung der Materialien den im Kernlehrplan Chemie benannten Bewertungskompetenzen von Schülerinnen und Schülern besondere Aufmerksamkeit geschenkt, bei denen eine ökologische wie auch eine ökonomische Perspektive bei der elektrolytischen Gewinnung von Produkten explizit aufgeführt werden.

Als weiteren entscheidenden Punkt sollten Anforderungen beachtet werden, die an BNE-Lernprozesse gestellt und in den verschiedenen Rahmenvorgaben wie dem Orientierungsrahmen Lernbereich globale Entwicklung oder der Leitlinie BNE NRW formuliert werden. Beabsichtigt wurde, dass die Themen aus mehrdimensionaler und multiperspektivischer Sicht betrachtet werden und möglichst alle Kernkompetenzen des Erkennens, Bewertens und Handelns einbezogen werden. Die Themen Wasserstoff und Photoreformierung sollten aus unterschiedlichen Dimensionen heraus betrachtet werden. Bei der Wahl weiterer Dimensionen wurde sich für die soziale und gegen eine politische bzw. kulturelle Dimension entschieden, wie sie in der Leitlinie BNE NRW im Fünf-Dimensionen-Modell dargestellt sind. Der Grund lag in der guten Anbindungsmöglichkeit einer sozialen Perspektive auf die Verkehrswende, da Mobilität in heutigen Gesellschaften eine immer entscheidender werdende Rolle einnimmt. Mobilität ist wiederum von verschiedenen sozialen Aspekten abhängig, wie dem sozioökonomischen Status.⁵⁷⁷ Auch die Sorgen unterschiedlicher Bevölkerungsschichten variieren in Abhängigkeit des sozioökonomischen Status.⁵⁷⁸ Bei den Aufgaben zum begleitenden Material sollten ebenso die für BNE-Lernprozesse entscheidenden Kernkompetenzen Erkennen, Bewerten und Handeln angesprochen werden. So wurden Materialien, die die unterschiedlichen Dimensionen ansprechen sollten, aufeinander aufbauend gestaltet, sodass der Erkenntnisgewinn die Basis für Bewertungen bildet, aus denen mögliche Handlungsoptionen bzw. Vorschläge zum

⁵⁷⁷ Umweltbundesamt (UBA): *Soziale Aspekte der Verkehrswende*, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/soziale-aspekte-der-verkehrswende#undefined>, (Zugriff: 10.01.2024).

⁵⁷⁸ Wolf et al. (Kopernikus-Projekt Ariadne), *Soziales Nachhaltigkeitsbarometer*, S. 48-49.

praktischen Handeln resultieren. Der Aspekt des Handels ist bedingt durch die Form des Materials als Handlungsoption umgesetzt worden.

Insgesamt sollte das entworfene Material sich als ein flexibles Angebot präsentieren, bei dem die Lehrkräfte einzelne Aspekte wählen können, die sie für ihren Unterricht als besonders relevant empfinden. Zudem sollte das Material auch an in anderen Bundesländern aufgeführten Inhalten anknüpfbar sein. Da insgesamt betrachtet das Hauptinteresse an Materialien, Inhalten und Formaten zum Thema Wasserstoff durch verschiedenen Chemie-Lehrkräfte in der Umfrage rückgemeldet wurde, wurde sich für diesen thematischen Schwerpunkt bei der Auswertung des Versuchs zur Photoreformierung entschieden.

In den folgenden Kapiteln sollen die Aufgaben und Materialien, die zum Experiment begleitend entwickelt wurden, kurz vorgestellt werden. Dabei werden im Fall der Aufgaben, die einen BNE-Bezug intendieren, die jeweiligen Perspektiven bzw. Dimensionen aufgeführt, die bei der Entwicklung berücksichtigt wurden. Insgesamt soll der Einblick in die Aufgaben und Materialien auch die Vielzahl weiterer Möglichkeiten andeuten, wie Aufgaben weiterentwickelt oder adaptiert werden können. Die Vorstellung der Ergebnisse der Erprobungen ist in *Kapitel 6.8.* und den dazugehörigen Unterkapiteln dargestellt. Bei diesen Erprobungen lag der Schwerpunkt auf einem iterativen Weg, bei dem vor allem Rückmeldungen und Einschätzung von Lehrkräften aber auch Studierenden und Schülerinnen und Schülern eingeholt wurden, um das Material zu adaptieren und zu verbessern. Das nach den Erprobungen fertiggestellte, begleitende Material ist *im Anhang* hinterlegt.

6.7.1. Material zum Experiment Photoreformierung

Der Prozess der Photoreformierung wurde fachlich in *Kapitel 3* bereits ausführlich dargestellt. Hierbei zeigte sich eine Komplexität von Reaktionsschritten und Reaktionsmechanismen, die zum Teil noch nicht für alle Substrate im Einzelnen aufgeschlüsselt werden konnte. Schon die Photoreformierung von einwertigen Alkoholen setzt fachlich hohe Anforderungen an eine wissenschaftliche Auswertung von Versuchen, die im Labor erprobt werden können. Noch höhere Anforderungen sind schließlich bei der Umsetzung und Auswertung eines Experiments in den schulischen Kontext gegeben, das die Photoreformierung exemplarisch darstellt. Daher müssen Materialien der intendierten Zielgruppe (EF/11. Jahrgangsstufe) angepasst und didaktisch reduziert werden, um eine möglichst reibungslose Durchführung und Auswertung des Experiments zu ermöglichen.

Die praktische Arbeit mit dem Experiment lässt sich in zwei Abschnitte unterteilen, in den der Photoreformierung und den der Knallgasprobe. Bedingt durch den vielschrittigen und komplexeren Aufbau des Versuchs zur Photoreformierung, wurde sich für eine mit Bildern ergänzte Versuchsdurchführung entschieden. Die Bilder wurden um kurze, beschreibende Texte zu den jeweiligen Arbeitsschritten ergänzt (*siehe Abb. 57*). Diese bebilderte Schritt-für-Schritt Versuchsanleitung sollte die Schülerinnen und Schüler beim Experimentieren dahingehend entlasten, dass sie beim Umgang mit vielleicht unbekannter Spritzentechnik, die für den Aufsatz auf dem Reagenzglas genutzt wird, ihren Aufbau mit den Bildern vergleichen können. Das gleiche gilt auch für den Gebrauch des Ultraschallbads, der

Magnetrührplatte und der Positionierung der Lichtquelle zur Bestrahlung. Im Anschluss an den Aufbau des Experiments können die Schülerinnen und Schüler die Bestrahlungszeit nutzen, um Materialien und Aufgaben zum Experiment, das begleitende Material zu den „Farben des Wasserstoffs“ oder zum Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor zu bearbeiten. Die Arbeitsschritte der Durchführung sind unabhängig vom eingesetzten Substrat. Die Bestrahlungszeit kann jedoch deutlich variieren.

Photoreformierung

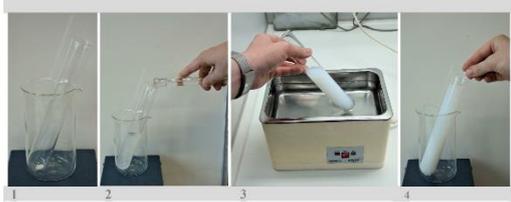
Wasserstoff aus Ethanol

Arbeitsmaterialien
 Waage, Ultraschallbad, großes Reagenzglas (Quarzglas), Becherglas, Magnetrührplatte mit Rührfisch (Kleine Form), durchbohrter Stopfen, 10-mL Spritze, 1-mL Spritze, Kanüle, Zweiweggehahn, Stativmaterial, Highpower-LEDs (365 nm), Gasbeutel mit Septum, Petrischale, Icourzeug

Chemikalien
 Ethanol-Lösung ($c = 1 \text{ mol/L}$)
 TiO_2/Pt -Katalysator
 Seifenlösung

Versuchsdurchführung I – Herstellung von Wasserstoffgas

V.1.1 Führen Sie den Versuch entsprechend der Anleitung Schritt für Schritt durch. Bestrahlen Sie die Suspension für mindestens 30 Minuten.



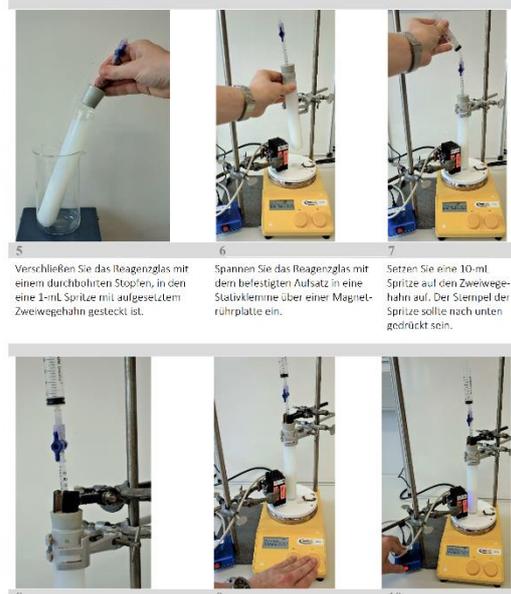
1. Wiegen Sie 50 mg des TiO_2/Pt -Katalysators in einem großen Reagenzglas ab.

2. Geben Sie eine 1-ethanol-Lösung ($c = 1 \text{ mol/L}$) zum Katalysator hinzu und füllen Sie das Reagenzglas bis etwa 2 cm unterhalb des Randes auf.

3. Tauchen Sie das Reagenzglas mit der Suspension für 3 Minuten in ein Ultraschallbad.

4. Geben Sie einen Rührfisch zur Suspension hinzu.

Seite 1 von 10



5. Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem durchbohrten Stopfen, in den eine 1-mL-Spritze mit aufgesetztem Zweiweggehahn gesteckt ist.

6. Spannen Sie das Reagenzglas mit dem befestigten Aufsatz in eine Stativklammer über einer Magnetrührplatte ein.

7. Setzen Sie eine 10-mL-Spritze auf den Zweiweggehahn auf. Der Stempel der Spritze sollte nach unten gedrückt sein.

8. Spannen Sie eine weitere Stativklammer unmittelbar über dem Stopfen ein, sodass dieser fest auf den Reagenzglas sitzt.

9. Schalten Sie die Magnetrührplatte ein (mind. 300 U/min).

10. Schalten Sie anschließend die Highpower-LEDs (365 nm) zur Bestrahlung der Suspension ein (mind. 30 min).

Seite 2 von 10

Abb. 57: Ausschnitt aus dem Material. Bild-für-Bild Experimentieranleitung (siehe Anhang)

Im Anschluss an die Photoreformierung erfolgt die Durchführung der Knallgasprobe mit dem aufgefangenen Gas in der Spritze. Die im Material angegebene Durchführung ist dabei so konzipiert, dass die Schülerinnen und Schüler die Versuchsdurchführung um die korrekte Menge an Sauerstoffgas berechnen sollen, die sie zur Durchführung einer Knallgasprobe im stöchiometrischen Verhältnis 2:1 (Gasprobe:Sauerstoffgas) benötigen. Dabei wird das stöchiometrische Verhältnis, das nicht angegeben ist, als Vorwissen vorausgesetzt. Die Berechnung erfolgt individuell und abhängig von der Menge des entwickelten Gases, wodurch sie ein notwendiger Bestandteil der Durchführung ist. Im Anschluss daran sollen die Schülerinnen und Schüler die Knallgasprobe durchführen, indem sie kleine Gasportionen in eine Seifenlösung einspritzen und anschließend zünden. Dass sich bei der Knallgasprobe für eine Durchführung mit Sauerstoffgas entschieden wurde ist damit zu begründen, dass der Wasserstoff, der während des Experiments gebildet wird, sehr rein ist und so eine effektvolle, positive Knallgasprobe im Mikromaßstab durchgeführt werden kann, bei der die Lernenden im Idealfall auf das Produkt Wasserstoff rückschließen können. Hierbei handelt es sich um einen sehr simplen, schulgängigen und den meisten Schülerinnen und Schülern bekannten

Hinweis auf Wasserstoff, der ihnen bestätigen kann, dass während der Bestrahlung der Suspension tatsächlich Wasserstoff und kein anderes Gas entwickelt wurde.

Da die Knallgasprobe durch das akustisch leicht wahrzunehmende Geräusch jedoch nicht zweifelsfrei als Nachweis für Wasserstoff angesehen werden kann,⁵⁷⁹ wurde die Auswertung zum Versuch um ein Material zur Gaschromatografie erweitert. In einem kurzen Informationstext wird die Gaschromatografie als analytisches Verfahren und ihr grundlegender Ablauf vorgestellt. Aufbauend auf diesem Informationstext wurde eine Aufgabe entwickelt, mit der die Schülerinnen und Schüler zwei vorgegebene Gaschromatogramme auszuwerten. Bei den Chromatogrammen handelt es sich um die beispielhafte Messung einer während der Photoreformierung gewonnenen Gasprobe und einer Probe reinen Wasserstoffgases aus einer Druckgasflasche. Durch die identische Retentionszeit beider Messungen lässt sich eindeutig erkennen, dass es sich bei dem entstandenen Gas um Wasserstoff handeln muss. Zu beiden Abbildungen sind zudem die Flächen unterhalb der Graphen angegeben, mit deren Hilfe die Lernenden den Anteil an Wasserstoff in der Gasprobe berechnen sollen. Dadurch können sie erkennen, dass der Anteil an Wasserstoffgas bei über 90 % liegt, wodurch auch begründet werden kann, warum die Knallgasprobe in dieser durchgeführten Variante positiv verlief.

Zu weiteren fachlichen Auswertung des Experiments schließt sich an das Material zur Gaschromatografie eine weiterführende Aufgabe zu den Reaktionen während der Photoreformierung an. Hierzu wurde ebenfalls ein kurzer Informationstext konzipiert, der die grundlegenden Prozessschritte an einem Photokatalysator auf die wichtigsten Schritte reduziert und mit Abbildungen zu diesen ergänzt wurde. Zusätzlich wurde auch die Rolle eines Co-Katalysators bei der Photoreformierung beschrieben. Die Schülerinnen und Schüler sollen aufbauend auf diesen Informationen eine Abbildung vervollständigen, die die Reaktionen am Photokatalysator darstellt (siehe Abb. 58).

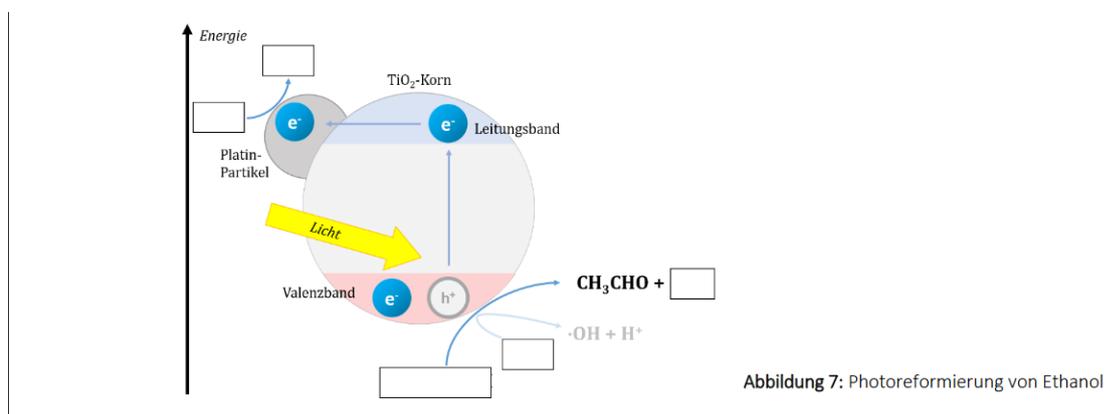


Abbildung 7: Photoreformierung von Ethanol

Abb. 58: Ausschnitt auf dem begleitenden Material zum Versuch „Photoreformierung von Ethanol“

Die fachliche Auswertung des Versuchs wurde auf diese Aufgabe beschränkt, da für das Land NRW im Kernlehrplan Chemie Sek. II Halbleiter bzw. Photokatalyse nicht eingebunden sind. Daher wurden die Prozessschritte, die für die Photoreformierung elementar sind, auf das nötigste reduziert, um den Schülerinnen und Schülern fachliche Hintergründe und die

⁵⁷⁹ Reinmold, Marco; Lühken, Arnim: *Rethinking the Squeaky Pop Test - A Novel Hydrogen Test for Chemistry Classes*, in: *Journal of Chemical Education* 100 (7), 2023, S. 2696-2697.

Funktion des Experiments darzustellen. Aus diesem Grund wurde auch die Aufgabe auf das Formulieren bzw. Vervollständigen von Reaktionsgleichungen ausgerichtet, die die Oxidation und Reduktion am Photokatalysator zeigen. Die Oxidation von Substrat-Molekülen und die Reduktion von Protonen sind die zentralen Reaktionsschritte der Photoreformierung und wurden daher ins Zentrum der Aufgabe gerückt. Nichtsdestoweniger ermöglicht die Gestaltung des Materials mit den Darstellungen der Prozessschritte am Photokatalysator auch eine tiefere Auseinandersetzung mit dem Thema Photokatalyse, was individuell entschieden werden kann.

6.7.1.1. Farben des Wasserstoffs

Neben der fachlichen Auswertung des Experiments stand die intendierte Einbeziehung von BNE in die entwickelten Materialien im Vordergrund. Um eine Anbindung an die Kernlehrpläne des Fachs Chemie für die Sek II. zu gewährleisten, ist ein verbindendes Element nötig, das das Experiment zur Photoreformierung mit dem Thema Wasserstoff unter dem Gesichtspunkt BNE verknüpft. Dieses Bindeglied sollte einen BNE-Bezug aufweisen, aktueller Gegenstand gesellschaftspolitischer Diskussion sein und auch für Schülerinnen und Schüler eine Relevanz besitzen. Die Wahl fiel dabei auf die „Farben des Wasserstoffs“, die bereits in *Kapitel 2* vorgestellt und erläutert wurden, die als Gegenstand mit den Schülerinnen und Schülern besprochen werden sollten. Dadurch wird ermöglicht, dass die Lernenden die in den Medien häufig benannten „Farben des Wasserstoffs“ erschließen, einen Bezug zum Experiment der Photoreformierung herstellen und dies als Grundlage in die Bewertung und Diskussion von Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff im Verkehrssektor einfließen lassen können.

Als Material und Aufgaben, die diesen Anforderungen gerecht werden sollten, wurden Informationstexte entwickelt, die ergänzt um Abbildungen, die vier am häufigsten benannten „Farben des Wasserstoffs“ thematisieren. Benannt werden dabei Charakteristika dieser Herstellungswege wie Ausgangsstoffe, Produkte, anfallende Kohlenstoffdioxid-Emissionen sowie die Häufigkeit der Anwendung in der Industrie. Zur Visualisierung sind neben den Informationstexten auch Abbildungen angefügt, um den Lernenden verschiedene Darbietungsformen der Informationen zu geben. Die Schülerinnen und Schüler sollen zunächst einen tabellarischen Vergleich der vier „Farben des Wasserstoffs“ in den genannten Kategorien vornehmen, um eine übersichtliche Darstellung von Vor- und Nachteilen zu ermöglichen. Hierin lassen sich auch die Betrachtung aus der ökologischen und ökonomischen Dimension anbahnen. Als Bindeglied zum Versuch sollen die Lernenden schließlich eine begründete Einordnung vornehmen, welcher Farbe sie den durch Photoreformierung gewonnenen Wasserstoff zuordnen würden. Ziel dieser Einordnung ist es, dass die Schülerinnen und Schüler erlangtes Wissen zum Versuch mit den verschiedenen Herstellungswegen von Wasserstoff verknüpfen.

6.7.1.2. Ökologische Dimension

Für die Betrachtung der ökologischen Dimension des Einsatzes von Wasserstoff wurde ein Vergleich zweier Antriebsformen gewählt. Im Fokus stehen wie bei dem Material und Aufgaben zu den anderen Dimensionen Vor- und Nachteile beider Varianten in Bezug auf die jeweilig betrachtete Dimension sowie die übergeordnete Frage, inwieweit eine der Varianten bevorzugt werden sollte. Um Perspektiven aus der ökologischen Dimension anzusprechen, werden Fahrzeuge mit Elektroantrieben Brennstoffzellen-basierten Automobilen in Bezug auf ihre Kohlenstoffdioxid-Emissionen gegenübergestellt.

Als Material wurden zwei Diagramme gewählt, die die Treibhausgas-Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen (PKW) und Elektroautos (PKW) bei einer definierten Fahrleistung (150.000 km) und einerseits für den Zeitraum 2020 bis 2030 und andererseits für den Zeitraum 2030 bis 2040 darstellen (*siehe Abb. 4, Kap. 2.2.3.*). Abgebildet werden dabei jeweils die Treibhausgas-Emissionen von Brennstoffzellenfahrzeugen, die mit Wasserstoff aus fossilen Quellen (Erdgas), fossilen und erneuerbaren Quellen (Erdgas und elektrolytisch hergestellt mit Strom aus Windkraftanlagen) und rein aus erneuerbaren Quellen (elektrolytisch hergestellt mit Strom aus Windkraftanlagen) betrieben werden. Zudem sind die Treibhausgas-Emissionen von Elektroautos mit einem 60 kWh starken Motor abgebildet, die mit Strom aus einem Strommix und durch Photovoltaik beladen werden.

Als Aufgabe, die an die Lernenden gestellt wird, sollen die wichtigsten Unterschiede stichpunktartig notiert werden. Mithilfe dieser Diagramme sollen die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass die Treibhausgas-Emissionen von beiden Antriebsformen im hohen Maße von der Bezugsquelle abhängig sind, wie die PKW beladen bzw. betankt werden. Im Jahrzehnt 2020 bis 2030 besitzen Brennstoffzellenfahrzeuge niedrigere Treibhausgas-Emissionen sowohl in Bezug auf die Herstellung und Entsorgung der Fahrzeuge als auch beim Einsatz von 100 % Öko-Strom. Diese Vorteile verringern sich jedoch deutlich in der Prognose für das Jahrzehnt 2030 bis 2040, sodass dann Elektroautos geringere Treibhausgas-Emissionen freisetzen. Für eine abschließende Bewertung beider Antriebsformen durch die Schülerinnen und Schüler sollen diese Informationen ebenfalls berücksichtigt werden.

Da die Erfassung beider Diagramme, ihrer Legende und der Vergleich zwischen den Treibhausgas-Emissionen für Schülerinnen und Schüler als herausfordernder angenommen werden kann und dies auch während erster Erprobungen mit Lehrkräften rückgemeldet wurde (*siehe Kap. 6.8.*), wurden die originalen Diagramme schließlich leicht gekürzt ins Material integriert, indem die leistungsstärkeren Elektromotoren (90 kWh) herausgenommen wurden.

6.7.1.3. Ökonomische Dimension

Zur Berücksichtigung der ökonomischen Dimension wird aufbauend auf der ökologischen Dimension auf die Wirtschaftlichkeit beider Antriebsformen geblickt. Hierzu werden unter anderem die Wirkungsgrade von Brennstoffzellenfahrzeugen (PKW) und Elektroautos (PKW) näher betrachtet, die Anhaltspunkte dazu geben, bei welchem Antrieb die meiste Energie in tatsächliche Bewegung umgesetzt werden kann. Dass zwar Elektroantriebe bei PKW deutliche Vorteile gegenüber Brennstoffzellenfahrzeugen besitzen, bedeutet jedoch nicht, dass Elektroantriebe im gesamten Verkehrssektor, sowohl im Nah- und Fernverkehr

überwiegend Vorteile haben. Hier muss auch auf den Nutzen im Gütertransport geblickt werden, um verschiedene Perspektiven einzubeziehen.

Um solch eine weitere Perspektive in die Materialien einzubinden, wurde neben den Wirkungsgraden verschiedener Antriebsarten im PKW-Bereich auch ein Auszug aus einem Artikel⁵⁸⁰ der Plattform Quarks der WDR-Doku-Redaktion gewählt, in dem die Vor- und Nachteile von wasserstoffbasierten Antrieben und Elektroautos dargestellt werden. Ergänzt wurde der Ausschnitt um einen Video-Link. Bei dem Video⁵⁸¹ handelt es sich auch um eine Produktion von Quarks, die Brennstoffzellenfahrzeuge und Elektroautos gegenüberstellt.

Die Schülerinnen und Schüler sollen aufbauend auf diesen Informationen zu der Aussage Stellung nehmen, dass wasserstoffbasierte Antriebe gegenüber Elektroantrieben in Zukunft grundsätzlich bevorzugt werden sollten. Beabsichtigt wurde, dass die Lernenden die Vorteile der Elektromobilität im Individualverkehr und von Brennstoffzellenfahrzeugen im Güterverkehr erkennen und begründet Stellung nehmen, dass Elektroantriebe nicht in allen Bereichen als bevorzugte Antriebsform angesehen werden können. Damit sollen die Lernenden auch dafür sensibilisiert werden, dass nicht nur ein einzelner Lösungsweg für ein Problem existiert, sondern vielmehr das Zusammenspiel verschiedener Wege die Möglichkeit bietet, aktuellen und zukünftigen Herausforderungen zu begegnen.

6.7.1.4. Soziale Dimension

Chancen und Herausforderungen von Brennstoffzellenfahrzeugen und Elektroautos lassen sich auch aus einer gesellschaftlichen Perspektive heraus betrachten, die bei einer multiperspektivischen und mehrdimensionalen Betrachtung im Sinne von BNE ebenfalls berücksichtigt werden muss. Daher nimmt das Material zur sozialen Dimension aufbauend auf den vorher angesprochenen Dimensionen einen aus gesellschaftlicher Perspektive getroffenen Blickwinkel auf das Thema Wasserstoff und Mobilität ein. Vor allem die Kosten, die mit Mobilität und im Speziellen mit Elektromobilität und Brennstoffzellen-basierten Antrieben verbunden sind, werden hierbei in den Fokus gerückt.

Bei dem angebotenen Material handelt es sich um verschiedene Diagramme und Tabellen. Hierzu zählen zum einen Diagramme zum Autobesitz in Deutschland nach ökonomischem Status der Haushalte im Jahr 2018,⁵⁸² den Sorgen der Bevölkerung, wie stark die Mobilitätskosten den Haushalt belasten⁵⁸³ und ob die zukünftigen Mobilitätskosten für den eigene Haushalt zu bewältigen wären.⁵⁸⁴ Zum anderen sind zwei Tabellen aufgeführt, die die Anschaffungskosten von klassischen Verbrennern (Benzin), Elektroautos und Brennstoff-

⁵⁸⁰ Carmesin, Jannis (Quarks): *Ist Wasserstoff der Alleskönner für die Energiewende?*, 2020, <https://www.quarks.de/technik/energie/was-die-allzweckwaffe-fuer-die-energiewende-leisten-kann/> (Zugriff: 02.06.22).

⁵⁸¹ WDR (Quarks): *Wasserstoffauto gegen Elektromobil*, 2022, <https://www.ardmediathek.de/video/quarks/wasserstoffauto-gegen-elektromobil/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWQzYjVINTI5LTMyMjktNDNINi1hNzQ4LWM0NGZkNjQwZDk4Yw>, (Zugriff: 10.01.2024).

⁵⁸² Umweltbundesamt, Soziale Aspekte der Verkehrswende, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/soziale-aspekte-der-verkehrswende#undefined> (Zugriff: 10.01.2024).

⁵⁸³ Wolf et al. (Kopernikus-Projekt Ariadne), Soziales Nachhaltigkeitsbarometer, S. 48-49

⁵⁸⁴ Ebd.

zellenfahrzeugen (*siehe Kap. 2.2.3.*) und den Energiekostenvergleich unterschiedlicher Kraftstoffe für PKW auflisten.

Die Schülerinnen und Schüler sollen mithilfe der Materialien die Kosten für die Anschaffung und den Unterhalt bei klassischen Verbrennern, Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen vergleichen, um im Anschluss daran Stellung zu beziehen, inwieweit die Energiewende im Individualverkehr für unterschiedliche Bevölkerungsschichten umsetzbar scheint. Besonders die Sorgen der Bevölkerung heutzutage und in Zukunft sollen durch die Diagramme zur Mobilitätskostenbelastung berücksichtigt werden. Die Aufgabe zielt auf den Ausbau von Bewertungskompetenzen ab, die auf Grundlage der Erkenntnisse aus den vorherigen Aufgaben zur ökologischen und ökonomischen Dimension erlangt wurde. Mit der Aufgabenstellung, Vorschläge zu geben, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Sorgen der Menschen zu berücksichtigen, sollen die Lernenden über eine Bewertung hinaus Handlungsoptionen formulieren, wie Wasserstoffantriebe sinnvoll in Zukunft eingesetzt werden können.

6.7.1.5. Exkurs „Grüner Stahl“

Als Zusatzmaterial wurde für das begleitende Material zum Thema Wasserstoff und Photoreformierung zudem der Aspekt des „grünen“ Stahls mit einbezogen. Dieser Aspekt wurde gewählt, da hierdurch ein weiterer Gesichtspunkt in die Frage miteinbezogen werden kann, inwieweit Wasserstoff als zukünftiger Energieträger einen Beitrag zur Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen leisten kann. Aufbauend auf dem bereits vorgestellten Material können Lernende so eine weitere Perspektive auf das Thema Wasserstoff als zukünftigem Energieträger kennenlernen. Neben einem Informationstext⁵⁸⁵ zu „grünem Stahl“ ist zudem ein Link zu einem Video der Plattform Quarks⁵⁸⁶ hinterlegt. Mithilfe der dort gewonnenen Informationen sollen die Schülerinnen und Schüler im Anschluss diskutieren, inwieweit Wasserstoff als Energieträger der Zukunft angesehen. Dabei sollen auch im Sinne einer mehrdimensionalen und multiperspektivischen Betrachtung Bedingungen für einen sinnvollen Einsatz von Wasserstoff erörtert werden, die als Voraussetzung angesehen werden müssen. So können in diesem als Exkurs angelegten Zusatz die Lernenden ihr Vorwissen oder erlangtes Wissen zum Einsatz von Wasserstoff im Verkehrssektor erweitern und vertiefen.

6.7.2. Weitere Materialien

Neben den bereits vorgestellten Materialien zum Versuch zur Photoreformierung sind auch noch weitere Angebote entwickelt worden, die das Thema Photoreformierung in den Blick nehmen. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt.

⁵⁸⁵ Umweltbundesamt (UBA): *Wasserstoff - Schlüssel im künftigen Energiesystem*, 2024, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem#Industrie>, (12.04.24).

⁵⁸⁶ WDR (Quarks): *Grüner Stahl*, 2022, <https://www.ardmediathek.de/video/quarks/gruener-stahl/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWI5YTE5MzkxLWM0MjQ0NGZhNS1hZTM0LWM2OWUINWU3Mzg3YWw>, (12.04.2024).

6.7.2.1. Photoreformierung von Ethanol als Video

Im Rahmen von Workshops und Lehrkräftefortbildungen zur Photoreformierung oder in Gesprächen bei Fachtagungen wurde der Wunsch verschiedener Lehrkräfte geäußert, dass aufgrund der eingesetzten Materialien für das Experiment (bspw. des Photokatalysators) und der hohen Kosten für die genutzte High-Power-LED der Versuch zur Photoreformierung auch als Video zur Verfügung gestellt werden könnte. Auf Basis dieser Rückmeldungen wurde in Zusammenarbeit mit Dr. Nico Meuter ein Versuchsvideo konzipiert, das das Experiment zur Photoreformierung von Ethanol zeigt. Aufbau und Durchführung sind dabei identisch mit dem in *Kapitel 5.6.2.* dargestellten Versuch. Teil des an sich unvertonten Videos ist neben der Darstellung der Materialien und Chemikalien auch die Durchführung einer Knallgasprobe im Anschluss an die Bestrahlung wie sie im Material zur Durchführung hinterlegt ist. Das Video ist frei abrufbar unter:

<https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/digitale-medien/lehr-/lernvideos-zu-versuchen-aus-unserer-fachdidaktischen-forschung/photoredoxreaktionen/photoreformierung/>

6.7.2.2. „BNE unter Einbezug von Titandioxid“

Als zusätzliches und ergänzendes Material zum Experiment Photoreformierung von Ethanol wurde im Rahmen des dreiteiligen Modul-Angebots „*BNE unter Einbezug von Titandioxid*“ eine Modul-Einheit entwickelt, die das Experiment zur Photoreformierung von Ethanol vorstellt und um Materialien erweitert, die schwerpunktmäßig BNE in den Fokus setzen. Sie ist eingebettet in zwei weitere Modul-Einheiten, die von Dr. Diana Zeller in Zusammenarbeit mit Kaltrine Kosumi ausgearbeitet wurden. Alle Arbeitsmaterialien sind sowohl in Deutsch als auch Englisch („Education for Sustainable Development and Experiments involving Titanium Dioxide“) angeboten.⁵⁸⁷ Inhalte und Aufgaben sind in beiden Fällen identisch.

Die Arbeitsmaterialien gliedern sich in einen Versuchsteil, der Aufbau und Durchführung des Experiments beschreibt und einen Teil mit Auswertungsfragen zum Versuch sowie Aufgaben, die den Einsatz von Wasserstoff als zukünftigem Energieträger in den Fokus setzen. Auf letzteren Aspekt wurde auch bei der Erstellung des Materials ein Schwerpunkt gesetzt. Der erste Versuchsteil ist äquivalent zu dem in *Kapitel 6.7.1.* beschriebenen Material aufgebaut. Eine Schritt-für-Schritt-Anleitung mit Bildern führt durch den Aufbau des Experiments, um die Lernenden bei der Durchführung des Experiments zu entlasten. Im Anschluss an den Aufbau erfolgt die Bestrahlung der Suspension. Im zweiten Versuchsteil erfolgt die Durchführung der Knallgasprobe. Hier wurde zur Aktivierung von Vorwissen der Lernenden als Aufgabe die Berechnung der stöchiometrisch korrekten Menge an

⁵⁸⁷ Venzlaff, Julian; Kosumi, Kaltrina; Zeller, Diana; Bohrmann-Linde, Claudia: *Education for Sustainable Development and Experiments involving Titanium Dioxide*, World Journal of Chemical Education, 11 (3), S. 80-86.

Material auf Englisch: https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/files/material/worksheets/bohrmann/material_TiO2_ESD_FI_NAL.pdf, (Zugriff: 10.01.2024).

Material auf Deutsch: https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/files/material/BNE-allgemein/BNE-Reihe_Titandioxid_Deutsch.pdf, (Zugriff: 10.01.2024).

Sauerstoffgas für ein Knallgasgemisch im Verhältnis 2:1 eingebaut. Als Auswertungsaufgabe zu dem Experiment sollen die Lernenden ein exemplarisches Chromatogramm einer Gasprobe und einer Vergleichs-Probe von Wasserstoffgas ausgewertet werden. Dabei handelt es sich um eine ähnliche Aufgabe inklusive eines Infotexts zu Chromatografie wie in *Kapitel 6.7.1.* beschrieben. Als Zusatzaufgabe ist die Erkundung einer Animation zu Prozessschritten am Photokatalysator vorgesehen, mit der das Donator-Akzeptor-Prinzip auf die photokatalytischen Prozesse während der Photoreformierung übertragen werden sollen. Diese Aufgabe ist dazu gedacht, dass Lehrkräften - in Abhängigkeit der jeweiligen Lerngruppen - die Möglichkeit geboten wird, die fachlichen Hintergründe des Experiments in den Unterricht einzubinden. Innerhalb dieser Aufgabe können Lernenden sich während der Erkundung der Animation tiefergehend mit den Prozessen der Photokatalyse auseinandersetzen, die in der kurzen Beschreibung der Rolle des Photokatalysators mündet. Im Anschluss daran erfolgt die Zuordnung von vier verschiedenen Teilchen (H^+ , H_2 , CH_3CH_2OH , CH_3CHO), die beim Prozess der Photoreformierung von Ethanol entscheidend sind, zu den in der Animation dargestellten Akzeptor ($A/A^{\cdot-}$)- bzw. Donator ($D/D^{\cdot+}$)-Teilchen. Die Aufgabenstellung richtet sich daher an unterschiedliche Anforderungsbereiche, die mit ihr adressiert werden können. Insgesamt sind die Aufgaben als optionale Angebote zu sehen, die adaptiert werden können. Eine chronologische Bearbeitung ist nicht erforderlich, da die Aufgaben nicht zwingend aufeinander aufbauen müssen.

Im Anschluss an den Materialteil, der das Experiment in den Blick nimmt, wurde ein zweiter Materialteil entwickelt, in dem die besonders für BNE-Lernprozesse entscheidenden Kernkompetenzen des Erkennens, Bewertens und Handelns im Fokus stehen. Ein Ausschnitt der Aufgaben ist in *Abbildung 59* dargestellt. Die drei Aufgabenbereiche, die die entsprechenden Kernkompetenzen adressieren, sind farblich in allen Materialien des Modul-Angebots „*BNE unter Einbezug von Titandioxid*“ kodiert. Die Kodierung folgt dabei den Farben, die den drei Kernkompetenzen des Lernbereichs Globale Entwicklung⁵⁸⁸ zugeordnet werden, um den Wiedererkennungswert zu erhöhen.

A.2 Vergleichen Sie anhand von M 1 grünen und grauen Wasserstoff in einer Tabelle. Notieren Sie auch die Vor- und Nachteile der Wasserstofferzeugung durch Dampfreformierung.

A.3 Arbeiten Sie in Zweiergruppen. Einer liest den Interviewauszug M 2, der andere den Interviewauszug M 3. Diskutieren Sie über die Aussage, dass der durch Dampfreformierung gewonnene Wasserstoff als Grundlage für eine nachhaltige Energiewende angesehen werden kann.

A.4 Finden Sie in Kleingruppen Argumente für den Einsatz von grünem Wasserstoff. Formulieren Sie Vorschläge, die Sie an politische Vertreter richten würden, unter welchen Bedingungen Wasserstoff als Energieträger der Zukunft eingesetzt werden kann. Berücksichtigen Sie dabei auch unterschiedliche Positionen aus Wirtschaft, Umwelt und Gesellschaft.

Abb. 59: Exemplarischer Ausschnitt aus dem Material des Modul-Angebots „*BNE unter Einbezug von Titandioxid*“ zur Photoreformierung von Ethanol.

⁵⁸⁸ Engagement Global, Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung, S. 95.

Zum Kompetenzbereich *Erkennen* sollen die Lernenden Vor- und Nachteile bei zwei unterschiedlichen Herstellungsweg von Wasserstoff herausarbeiten. Hierbei bildet die Gegenüberstellung verschiedene Aspekte der Herstellung von „grünem“ und „grauem“ Wasserstoff den Kern der Auseinandersetzung. Als Informationstexte und Abbildungen wurden die bereits in *Kapitel 6.7.1.1.* beschriebenen Texte zu „grünem“ und „grauem“ Wasserstoff gewählt. In diesem Material sollte somit die Gegenüberstellung dieser beiden Herstellungswege von Wasserstoff im Vordergrund stehen. Den Lernenden soll dadurch ermöglicht werden, grundlegende Informationen zu Kohlenstoffdioxid-Emissionen und der Häufigkeit der Nutzung zu entnehmen, um vor diesem Hintergrund sowohl Vor- als auch Nachteile der Nutzung von Wasserstoff als zukünftigem Energieträger bezogen auf die Kohlenstoffdioxid-Bilanz zu erkennen.

Aufbauend auf dieser inhaltlichen Auseinandersetzung zur Produktion von Wasserstoff wurden zwei Interviewauszüge gewählt, mit deren Bearbeitung der dazugehörigen Aufgabe der Kompetenzbereich *Bewerten* in den Mittelpunkt gerückt wurde. Bei den zwei Materialien handelt es sich einerseits um einen Auszug aus einem Interview mit einem Vorstandsmitglied der Zukunft Gas e.V., einer Lobbyorganisation der Deutschen Gaswirtschaft und andererseits um einen Interviewauszug mit drei Mitarbeitern der Bundesnetzagentur. In beiden Interviews ist Wasserstoff als zukünftiger Energieträger der Gegenstand der Auseinandersetzung. Ausgangspunkt ist die Sichtweise, dass Wasserstoff als zukünftiger Energieträger viele Potentiale besonders im ökologischen und ökonomischen Bereich besitzt. Deutliche Unterschiede bestehen jedoch in der Ansicht, aus welcher Basis Wasserstoff hergestellt werden soll. Einerseits steht der Produktion von „grauem“ Wasserstoff die Produktion „grünen“ Wasserstoffs gegenüber. Die Argumentations-strukturen sind unterschiedlich. Der Darstellung der Vorteil von „grünem“ Wasserstoff, stehen die Vorteile von Wasserstoff mittels Dampfreformierung herstellt gegenüber. Die Schülerinnen und Schüler sollen mittels des Wissens durch die vorherige Aufgabe so die Möglichkeit erhalten, in eine Diskussion in Zweiergruppen zu gelangen, bei der sie die Aussage bewerten sollen, inwieweit „grauer“ Wasserstoff als Grundlage für eine nachhaltige Energiewende angesehen werden kann. Auch unter der Berücksichtigung der jeweiligen Quellen und der Personen, die an den jeweiligen Interviews teilnehmen, sollen die Schülerinnen und Schüler in der Kompetenz gefördert werden, Aussagen kritisch zu bewerten, um sich so eine eigene Meinung auf Basis von Fakten zu bilden, in der verschiedene Perspektiven auf ein Thema einbezogen werden.

Als letzte Aufgabe dieser Modul-Einheit zur Photoreformierung sollen die Lernenden in Kleingruppen Argumente finden, die für einen Einsatz von „grünem“ Wasserstoff sprechen. Dabei sollen sie wie auch in der Aufgabe zuvor verschiedene Perspektiven in den Blick nehmen, die die ökologische, ökonomischen und soziale Dimension aufgreifen. Damit soll im Sinne einer BNE multiperspektivisch und mehrdimensional auf ein Thema geschaut werden, das in aktuellen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussionen bereits einbezogen ist. Im Sinne des dritten Kompetenzbereiches *Handeln* wurde eine Aufgabe gewählt, die die Schülerinnen und Schüler im Unterrichtsgeschehen an diese Kompetenz heranführt. Ein aktives Handeln wird dahingehend nur avisiert, indem die Lernenden Vorschläge an politische Vertreter richten sollen, welche Bedingungen erfüllt werden müssen, um „grünen“ Wasserstoff als zukünftigen Energieträger stärker einzusetzen.

6.8. Einblicke in praktische Erprobungen mit Lernenden und mit Lehrkräften im Rahmen von Workshops und Lehrkräftefortbildungen

Die Erprobung der Experimente und Materialien erfolgte in verschiedenen Settings sowohl mit Schülerinnen und Schülern, als auch mit Studierenden und Lehrkräften (*siehe Tab. 12*). Mit den einzelnen Erprobungen waren unterschiedliche Absichten verbunden. Zum einen sollte das praktische Arbeiten beobachtet werden, ob Schülerinnen und Schüler sowie Studierende und Lehrkräfte das Experiment anhand der Experimentieranleitungen durchführen, seinen Aufbau und die Auswertung nachvollziehen können. Zum anderen sollte auch auf den Umgang mit den Materialien geblickt werden. Hierbei lag der Fokus auf den Rückmeldungen und Einschätzungen der Lehrkräfte zu den konzipierten Materialien und ihrer Eignung für schulische Kontexte. Dafür wurden Fragebögen entwickelt, mit denen die Lehrkräfte bzw. Studierenden sowohl zum Experiment, als auch den begleitenden Materialien zur Auswertung des Experiments und Aufgaben zum Thema Wasserstoff und Mobilität Rückmeldungen geben konnten.

Erprobung		GD	MT	LF ¹	SL ¹	SL ²	LF ²	LF ³
Auswertung mit:	Fragebogen		x	x	x		x	x
	teilnehmende Beobachtung	x	x	x	x	x	x	x
Teilnehmende	SuS	x				x		
	Studierende				x		x	x
	Lehrkräfte		x	x			x	x
Experiment	PR Ethanol	x	x	x	x	x	x	x
	PR Glucose			x				x
	PR Stärke							x
	PR Dextrose/Lebensmittel			x				x
	PR Temperaturabhängigkeit			x				x
Materialien Experiment	Auswertung PR	x	x	x	x	x	x	x
	Versuch Knallgasprobe	x	x	x	x	x	x	x
	Zusatz Gaschromatografie	x	x	x				x
Materialien BNE	Farben des Wasserstoffs	x	x	x	x	x	x	x
	Ökologische Dimension	x	x	x	x	x	x	x
	Ökonomische Dimension	x	x	x	x	x	x	x
	Soziale Dimension				x	x	x	x
	Zusatz „Grüner Stahl“	x	x	x				x

Tab. 12: Überblick über die praktischen Erprobungen des Experiments Photoreformierung und der dazugehörigen Materialien.

Abkürzungen: PR: Photoreformierung; GD: Girls' Day 2022; MT: MINT-Tag NRW 26.08.2022; LF¹: Lehrkräftefortbildung 16.11.2022; SL¹: Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ – Erprobung mit Studierenden; SL²: Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ – Erprobung mit Schülerinnen und Schülern; LF²: Lehrkräftefortbildung 25.10.2023; LF³: Lehrkräftefortbildung 13.12.2023

6.8.1. Girls'Day 2022 (28.04.2022)

Die erste Erprobung mit Lernenden erfolgte im Rahmen des Girls'Day 2022 an der Bergischen Universität Wuppertal. Beim Girls'Day handelt es sich um einen bundesweiten Orientierungstag für Mädchen, der zur Studien- sowie der Berufsorientierung dienen soll. Die Mädchen erhalten die Möglichkeit, in Studienfächer oder auch Berufe in Bereichen Informatik, Naturwissenschaften oder Wirtschaft und Technik zu blicken, die klassischerweise durch einen hohen Männeranteil geprägt sind.⁵⁸⁹ In verschiedenen Fachgruppen der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften konnten Schülerinnen so Einblicke in unterschiedliche Berufsfelder erhalten. Insgesamt nahmen 35 Schülerinnen der 8. bis 10. Jahrgangsstufe an den Angeboten teil.⁵⁹⁰ Der Schwerpunkt lag bei den Angeboten der Fachgruppe Chemie beim Thema Energie. Bei Vorträgen und im Labor erhielten die Schülerinnen hierzu verschiedene Einblicke. Die praktische Arbeitsphase im Labor der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal bezog sich inhaltlich überwiegend auf das Programm $E^3 - \text{Energie experimentell erleben}$,⁵⁹¹ das für dieses Setting im Rahmen des Girls'Day angepasst wurde. Neben Experimenten zu alternativen Solarzellen auf Basis von Titandioxid, biologischen Brennstoffzellen und Experimenten zur Modellierung von künstlicher Photosynthese konnte innerhalb des als Stationen aufgebauten Programms der Versuch zur Photoreformierung den Schülerinnen vorgestellt werden. Die Wahl der Stationen erfolgte nach Interesse der Schülerinnen. Den Schülerinnen standen 60 Minuten im Labor zur Erprobung der Experimente zu Verfügung.

Das Ziel dieser ersten Erprobung lag primär auf der Betrachtung des Umgangs mit der Schritt-für-Schritt Versuchsvorschrift. Aufgrund der geringen Zeit und der zu erwartenden Heterogenität der Schülerinnengruppe, die sich aus unterschiedlichen Jahrgangsstufen zusammensetzte, sollte im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung des Betreuenden der Fokus auf dem Experiment und seiner Handhabung liegen. Um jedoch auch den Umgang mit den entwickelten Materialien zum Versuch im Falle der Teilnahme sehr starker Lernenden beobachten zu können, wurden Inhalte und Aufgaben zur fachlichen Auswertung des Versuchs, zur ökologischen und ökonomischen Perspektive des Einsatzes von Wasserstoff sowie zu den „Farben des Wasserstoffs“ (siehe Kap. 6.7.1.) ebenfalls bereitgestellt.

Der Versuch zur Photoreformierung wurde von vier Schülerinnen durchgeführt. Die Bearbeitungszeit von Versuch und Material umfasste den gesamten Zeitraum, der für die Laborphase anberaumt war, sodass nur eine Kleingruppe an der Station arbeitete. Die Geräte, Versuchsmaterialien und Chemikalien waren vor Beginn der Laborphase bereitgelegt. Beim Umgang der Schülerinnen mit den Anleitungen zur Durchführung war zu beobachten, dass das Experiment Schritt für Schritt aufgebaut werden konnte. Die Reihenfolge der Versuchsschritte wurde befolgt. Kleinere Schwierigkeiten zeigten dabei, dass das Reagenz-

⁵⁸⁹ Kompetenzzentrum Technik-Diversity-Chancengleichheit e. V: *Was ist der Girls'Day?*, online unter: <https://www.girls-day.de/ueber-den-girls-day/was-ist-der-girls-day2/deutsch> (Zugriff: 23.10.2023).

⁵⁹⁰ Roese-Koerner, Beate; Kappner, Isabella: *Girls'Day 2022: Nachwuchsförderung: Mädchen erkunden MINT-Berufe und Studiengänge an der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften*, online unter: <https://fk4.uni-wuppertal.de/de/oeffentlichkeitsarbeit/girlsday-rueckblick/> (Zugriff: 23.10.2023).

⁵⁹¹ Grandrath, Rebecca; Zeller, Diana; Kremer, Richard; Venzlaff, Julian; Tausch, Michael W.; Bohrmann-Linde, Claudia: *$E^3 - \text{Energieumwandlung Experimentell erleben}$* , in: *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 30 (4), 2019, S. 29-33.

glas nicht bis zum unteren Rand des eingesetzten Stopfens aufgefüllt wurde, sodass zunächst ein Luftraum zwischen Stopfen und Flüssigkeit sichtbar war. Außerdem war die zweite eingesetzte Stativklemme zur Fixierung des Stopfens nicht genutzt worden. Durch kurze mündliche Hinweise des Betreuenden konnten diese Probleme jedoch beseitigt werden. Zeitlich benötigten die Schülerinnen 15 Minuten für den Aufbau des Experiments bis die Bestrahlung der Suspension beginnen konnte. Nach ca. 30 Minuten der Bestrahlung waren 8 mL Gas in der Spritze aufgefangen, mit denen die Schülerinnen die Knallgasprobe durchführten konnten. Die Entnahme des Sauerstoffgases aus dem Infusionsbeutel und die Bedienung des Dreiwegehahns sowie die Rolle des Septums am Dreiwegehahn waren zunächst unklar. Das Aufziehen der richtigen Menge an Sauerstoffgas in die Spritze mit der Gasprobe (Verhältnis 1:2) erfolgte ohne weitere Probleme. Die Schwierigkeiten, die sich während des Experimentierens ergaben, sind vermutlich überwiegend auf die Neuartigkeit verschiedener Materialien wie Dreiwegehähne, Septen oder Infusionsbeutel zurückzuführen, zu denen die Schülerinnen auch Fragen zu ihrer Bedeutung stellten, beziehungsweise wissen wollten, wie diese funktionieren. Des Weiteren schien auch das genaue Lesen der einzelnen Versuchsschritte in der Anleitung und das genaue Betrachten der bebilderten Anleitung nicht immer exakt erfolgt zu sein. Bei einigen Rückfragen der Schülerinnen wurde auf den Wortlaut in der Anleitung verwiesen, wodurch sich dann Probleme lösten oder der Aufbau selbstständig korrigiert werden konnte.

Während der Bestrahlungszeit konnten die Schülerinnen das Begleitmaterial anschauen. Es zeigte sich, dass die Schülerinnen für das Lesen der Informationstexte zur fachlichen Auswertung des Versuchs und zu den „Farben des Wasserstoffs“ knapp 20 Minuten benötigten. Während des Lesens wurden vor allem zur fachlichen Auswertung verschiedene Fragen gestellt und der Wunsch geäußert, die Prozesse während der Photoreformierung am Photokatalysator zu erklären. Nach einer kurzen Erläuterung durch den Betreuenden wurden die verbleibenden Minuten sowohl zur Durchführung der Knallgasprobe als auch für Erläuterungen zu verschiedenen Herstellungsmöglichkeiten von Wasserstoff, deren Bedeutung für die Industrie und der damit verbundenen Kohlenstoffdioxid-Emissionen genutzt. Durch den kurzen Zeitraum der Laborphase konnten die Schülerinnen die Informationstexte und Aufgaben zur ökologischen und ökonomischen Perspektive nicht bearbeiten. Rückmeldungen konnten somit nicht eingeholt werden. Allerdings ließen die Rückfragen während der Erläuterungen zu den verschiedenen Herstellungswegen von Wasserstoff ein grundsätzliches Interesse an dieser Thematik erkennen. Im Gespräch wurde zudem rückgemeldet, dass der Aspekt nachhaltiger Energiegewinnung und Bereitstellung von Energieträgern für die meisten Schülerinnen dieser Kleingruppe von Bedeutung waren und es als wichtig empfunden wurde, darüber zu sprechen.

Insgesamt betrachtet kann die Erprobung des Versuchs zur Photoreformierung als erfolgreich angesehen werden, da die Schülerinnen mithilfe der bebilderten Schritt-für-Schritt Anleitung das Experiment ohne größere Probleme durchführen konnten und Wasserstoff entwickelt wurde, der mit der Knallgasprobe akustisch sehr deutlich nachgewiesen wurde. Die Herausforderungen beim Umgang mit den für das Experiment bereitgestellten Materialien ergab sich überwiegend daraus, dass die Schülerinnen weder mit Medizintechnik (Infusionsbeutel, Drei-/Einweghähne), noch mit den genutzten Magnetrührplatten vertraut waren. Die geleisteten Hilfestellungen konnten solche Schwierigkeiten jedoch beseitigen.

Das Interesse der Schülerinnen am Experiment und dem Thema Wasserstoff als möglichem Energieträger der Zukunft und die positiven Rückmeldungen zeigten, dass grundsätzlich ein für Lernprozesse interessanter Versuch vorliegt, anhand dessen wichtige Fragestellungen mit Lernenden angesprochen werden können. Auch die Organisatoren des Girls'Day im Fachbereich Chemie berichteten in einem Bericht von den positiven Erlebnissen der Schülerinnen: „Die Gewinnung von Wasserstoff konnten die Mädchen im Vorführversuch erleben - das anschließende Zünden von Knallgas löste große Begeisterung aus.“⁵⁹²

6.8.2. MINT-Tag NRW 2022 (26.08.2022)

Im Rahmen des MINT-Tages NRW 2022, der von Schulewirtschaft NRW und den MINT-EC Schulen NRW ausgerichtet wurde, konnte während eines 75-minütigen, als Lehrkräftefortbildung ausgerichteten Workshops das Experiment zur Photoreformierung sowie das konzipierte Material erstmals Lehrkräften vorgestellt und von diesen erprobt werden. Das Angebot dieses Fortbildungstages richtete sich ausschließlich an naturwissenschaftliche Lehrkräfte, die an MINT EC-Schulen in NRW arbeiten.

In Zusammenarbeit mit Elisabeth Kiesling wurde der Workshop „*BNE und Chemieunterricht - Von der Leitlinie zur exemplarischen Unterrichtseinbindung*“ entwickelt, der zweigeteilt in einen fachlichen Input zum Aspekt BNE im Chemieunterricht und eine praktische Phase mit Experimenten strukturiert wurde. Vorgestellt wurden im ersten Workshop-Teil die von der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal entwickelten Verlaufspläne zur exemplarischen Einbindung von BNE in den Chemieunterricht. Innerhalb des einführenden 15-minütigen Vortrages wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie die vorgestellten Experimente zu *Carbon Capture and Storage* und zur *Photoreformierung* in schulische Kontexte eingebunden werden können. Neben konkreten Bezügen zum Kernlehrplan Chemie der Sek. II wurden auch Möglichkeiten präsentiert, mit diesen Themen, Experimenten und Materialien BNE als Schwerpunkt in den Chemieunterricht einzubeziehen. Angeschlossen an den theoretischen Input hatten die teilnehmenden Lehrkräfte die Chance, die Experimente an fünf Stationen (Baustein 1: CCS Materialien, Baustein 2: Modellexperiment Kohleflöze, Baustein 3: bilinguales CCS Material, Baustein 4: Experiment Photoreformierung, Baustein 5: Materialien Photoreformierung) zu erproben und das Begleitmaterial zu sichten. Dabei konnten sie nach Interesse auswählen, welche und wie viele Stationen sie bearbeiten. Nach dieser praktischen 50-minütigen Phase erfolgte ein kurzes Abschlussgespräch im Plenum, bei dem Rückmeldungen eingeholt werden konnten.

Basis für die experimentelle Erschließung der Photoreformierung bildete die Versuchsvariante im Reagenzglas und einer High-Power-LED als Lichtquelle (Baustein 4). Zur Auswertung des Experiments waren neben Aufgaben zu fachlichen Hintergründen und der Analyse der Gasprobe auch das in *Kapitel 6.7.1.* vorgestellte Material zur ökologischen und ökonomischen Dimension Bestandteil (Baustein 5). Ziel war es neben der Durchführung des Experiments den im Material in den Fokus gesetzten Schwerpunkt zu Aufgaben, die unter dem Gesichtspunkt der Einbindung von BNE in den Chemieunterricht entstanden waren, den teilnehmenden Lehrkräften vorzustellen und ihre Eindrücke und Rückmeldungen zum

⁵⁹² Roese-Koerner/Kappner, Girls'Day 2022.

Material und den Aufgaben einzuholen. Dadurch war nicht ein objektiver Blick im Fokus, sondern die subjektive und individuelle Wahrnehmung der anwesenden Lehrkräfte. Ausgewählt waren für die Erprobung das in *Kapitel 5.6.* beschriebene Experiment sowie die Inhalte und Aufgaben zur ökologischen und ökonomischen Perspektive des Einsatzes von Wasserstoff und die „Farben des Wasserstoffs“ (*siehe Kap. 6.7.1.*). Zur gezielten Einholung von Rückmeldungen zum Experiment, aber auch zur Evaluation des gesamten Workshop-Angebots wurde ein Fragenbogen entwickelt. Dieser ist im Anhang angefügt und sollte Erkenntnisse liefern, wie die Lehrkräfte im Allgemeinen die Gestaltung und Durchführung des Workshops resümieren und das Experiment zur Photoreformierung mit Begleitmaterial für schulische Kontexte bewerten. Dazu wurden die Teilnehmenden des Workshops gebeten, ihr persönliches Resultat einzuschätzen zum Aufbau, der Durchführung und der Auswertung des Experiments und der begleitenden Materialien.

Insgesamt nahmen an dem Workshop 14 Chemielehrkräfte teil. Die durchschnittliche Lehrerfahrung lag bei 18 Jahren. Von den mehrheitlich teilnehmenden Gymnasiallehrkräften ($n = 11$) unterrichtete die Mehrheit ein Zweitfach im MINT-Bereich (Mathe 5, Physik 3). Die im einführenden Vortrag vorgestellte Leitlinie BNE NRW war bei acht Lehrkräften bekannt. Unterrichtsinhalte mit einem BNE-Bezug im Chemieunterricht einzubinden wurde von zehn bestätigt. Als Themen wurden Energieversorgung, Mobilität, Klimawandel bzw. Treibhauseffekt, Konsumverhalten und Kunststoffe benannt, mit denen BNE integriert werde.

Fragen zum persönlichen Resultat des Workshops	Bewertung
Wie bewerten Sie den heutigen Workshop im Allgemeinen (Struktur, didaktische Materialien, Methoden, praktische Anwendungen usw.)	3,5/4 (n = 13) 1 = sehr schlecht 4 = sehr gut
Hatten Sie Schwierigkeiten, den Inhalten der Lehrerfortbildung zu folgen?	4/4 (n = 14) 1 = große Schwierigkeiten 4 = keine Schwierigkeiten
Inwieweit fühlen Sie sich vorbereitet, BNE-Themen (auch mithilfe des Verlaufsplans) in Ihrem Unterricht behandeln zu können?	2,6/4 (n = 13) 1 = sehr schlecht vorbereitet 4 = sehr gut vorbereitet

Tab. 13: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats des Workshops

Die Rückmeldungen zum Workshop können insgesamt als sehr positiv angesehen werden. Schwierigkeitsgrad und Inhalte waren für die Teilnehmer absolut angemessen. Dass jedoch nur etwas mehr als die Hälfte die Leitlinie BNE NRW kannte und mehr als ein Viertel keine Themen mit Bezug zu BNE in ihrem Unterricht umsetzten, lässt die Relevanz erahnen, mit der Fortbildungsangebote an Lehrkräfte ausgerichtet werden, die das Ziel haben, Inhalte des aktuellen Lehrplans Chemie unter dem Gesichtspunkt BNE zu präsentieren, landeseigene Vorgaben vorzustellen und konkrete Unterrichtsangebote in Form von Experimenten und Materialien anzubieten. Bei der Frage, inwieweit sich die Lehrkräfte vorbereitet fühlen, BNE-Themen in ihrem eigenen Unterricht behandeln zu können, zeigte sich auch nach dem Workshop, dass hierbei noch stärkere Unsicherheiten bei der Einbindung von BNE in den Unterricht bestehen. Auch ein Zusammenhang zwischen der Unsicherheit, BNE-bezogene

Themen in den Chemieunterricht einzubinden und der Bekanntheit der Leitlinie BNE NRW sowie der bereits praktizierten Umsetzung von BNE im Chemieunterricht lässt sich nicht ausschließen, auch wenn die Stichprobengröße nicht sehr groß war.

Aufbauend auf den allgemeinen Fragen zur Gestaltung des Workshops wurden die Lehrkräfte auch expliziert um Rückmeldung zu den einzelnen Stationen gebeten. Im Falle des Experiments zur Photoreformierung umfasste dies den Baustein 4 (Experiment) und den Baustein 5 (Material zum Experiment). Zu diesen Stationen gaben acht Lehrkräfte ihre Rückmeldung in Form des Fragebogens ab, wobei nicht alle Fragen von allen Teilnehmenden vollständig beantwortet wurden, sodass zum Teil weniger als acht Antworten in die Bewertungen, die in *Tabelle 14* dargestellt sind, einfließen.

Zunächst wurden die Lehrkräfte zu ihrer Einschätzung befragt, inwieweit sie das Thema Photoreformierung als zum aktuellen Oberstufenlehrplan Chemie des Landes NRW passend befinden (siehe *Tab. 14*). Die Meinungen hierzu waren überwiegend voll zustimmend oder eher zustimmend (3,4/4). Die Lehrkräfte sollten ebenfalls einschätzen, in welchen schulischen Bereichen (im regulären Chemieunterricht, bei Facharbeiten, über einen Ausflug ins Schülerlabor, etc.) sie das Thema einbinden würden. Am häufigsten angegeben wurde der Einsatz im regulären Chemieunterricht (5/8), im Rahmen von Facharbeiten (5/8) sowie über einen Ausflug in ein Schülerlabor zum entsprechenden Thema (3/8). Als möglichen Probleme beim Einsatz des Themas im Unterricht wurden besonders häufig die Kosten (4/8), die Beschaffung von Materialien und Chemikalien⁵⁹³ bzw. die Ausstattung der Schule aufgeführt (4/8). Diese Rückmeldungen wurden auch im Rahmen der Gespräche mit verschiedenen Lehrkräften während der Experimentierphase erhalten, da häufig nach der Möglichkeit zur Beschaffung der Lichtquelle gefragt wurde und hierbei die Bezugsquelle als auch der Preis⁵⁹⁴ benannt wurden. Daneben wurde von einzelnen Teilnehmenden zurückgemeldet, dass die Dauer des Experiments, bzw. der experimentell hohe Aufwand sowie die Komplexität des Inhalts als mögliche Probleme angesehen werden. Bei der Frage nach Lösungsmöglichkeiten der vielfältig benannten Probleme, waren unter anderem finanzielle Förderungen, Unterstützung von Seiten der Hochschule sowie kleinere Lerngruppen beschrieben worden.

Zusätzlich zu diesen allgemeineren Fragen zum Thema Photoreformierung wurden gezielt Rückfragen zur Einschätzung der Lehrkräfte zum Schwierigkeitsgrad des Experiments und der Materialien für ihre Lernenden gestellt. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 14* dargestellt. Bei der Frage, ob die Teilnehmenden das Experiment im Unterricht einsetzen würden, bejahten drei dies, drei verneinten es. Zwei Lehrkräfte nannten Gründe, warum sie das Experiment nicht einsetzen würden. Hierbei waren die Kosten in beiden Fällen ausschlaggebend. Das begleitende Material zu Photoreformierung würden sechs Lehrkräfte in ihrem Unterricht einsetzen (nein = 0). Im Rahmen von Gesprächen mit unterschiedlichen Lehrkräften während der Experimentierphase wurde zudem der Wunsch geäußert, dass der Versuch als Video zur Verfügung gestellt wird. Als Grund wurde hierfür genannt, dass das Experiment so trotz fehlender Materialien im Chemieunterricht eingesetzt werden kann.

⁵⁹³ Hierzu wurde auch der Katalysator mitgezählt.

⁵⁹⁴ Der Preis für eine High-Power-LED betrug zu diesem Zeitpunkt 540 €.

Wie bewerten Sie den Aufbau des Experiments?		Bewertung
		1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Aufbau		3,1/4 (n = 7)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit der Experimentieranleitung und der Aufgaben zur Auswertung des Versuchs		Bewertung
		1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Versuchsdurchführung		3/4 (n = 7)
Beobachtung		3/4 (n = 7)
Auswertung Gaschromatografie		2,3/4 (n = 6)
Auswertung Photoreformierung		2,5/4 (n = 6)
Auswertung „Farben des Wasserstoffs“		2,7/4 (n = 6)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit dem Material?		Bewertung
		1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Aufgabe 3.1 & 3.2 (Wasserstoff und Mobilität)		2,7/4 (n = 6)
Infotexte Wasserstoff und Mobilität		3,2/4 (n = 6)
Aufgabe 3.3 (Wasserstoff in Verkehr und Industrie)		3,2/4 (n = 6)

Tab. 14: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Bei den Rückmeldungen der Lehrkräfte zum Experiment „Photoreformierung von Ethanol“ handelt es sich um eine sehr kleine Stichprobe, deren Deutung mit entsprechender Vorsicht zu tätigen ist und deren Ergebnisse nicht ohne weiteres vollständig übertragbar sind auf die Gesamtheit an Chemielehrkräften. Trotzdem liefert die Befragung wertvolle Erkenntnisse darüber, wie dieses neue Thema im schulischen Kontext von langjährigen Lehrkräften wahrgenommen wird. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass der Aufbau, die Durchführung und die Beobachtungen als eher einfach bewertet werden. Als schwieriger werden dagegen die Auswertungen zum Experiment empfunden. Interessant ist, dass die Lehrkräfte zwar das Experiment für ihre Lernenden als geeignet in der Durchführung ansehen und ihm überwiegend auch eine Relevanz für den Chemieunterricht zuordnen, sodass sie das Thema im regulären Chemieunterricht einsetzen würden, ist die Zustimmung zum Einsatz des Experimentes im eigenen Chemieunterricht allerdings deutlich geringer. Dass dies so empfunden wurde, lässt sich darauf zurückführen, dass vor allem die Lichtquelle in Form der High-Power-LED und der Photokatalysator als Gründe von denjenigen benannt wurden, die das Experiment nicht einsetzen wollen würden. Da auch andere Lehrkräfte bei den Anmerkungen zu möglichen Problemen beim Experiment besonders die Kosten der Lichtquelle, aber auch die Beschaffung des Katalysators und die Ausstattung an der eigenen Schule benannt haben, ist davon auszugehen, dass hierin die größten Hürden bei der Umsetzung des Experiments im regulären Chemieunterricht zu suchen sind. Thematisch wird die Photoreformierung als relevant für den schulischen Kontext angesehen. Auch das angebotene, begleitende Material wurde als eher einfach und von allen an der Umfrage Teilnehmenden als für den eigenen Unterricht einsatzfähig beschrieben. Damit nahmen sie

das angebotene Begleitmaterial auch getrennt vom Experiment als einsatzfähig für den Unterricht wahr. Der eher modular angedachte Charakter aller Begleitmaterialien zum Experiment konnte so durch die Wahrnehmung der Lehrkräfte bestätigt werden.

6.8.3. Lehrkräftefortbildung 16.11.2022 an der BUW

Die nächste praktische Erprobung des Versuchsaufbaus zur Photoreformierung und der dazu entwickelten Materialien fand im Rahmen einer Lehrkräftefortbildung an der Bergischen Universität Wuppertal statt. Adressiert wurden interessierte Lehrkräfte, die über den Newsletter der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal abonniert hatten und entsprechend über die Angebote informiert werden. Im Rahmen eines dreistündigen Fortbildungsangebots sollte von den Lehrkräften das Thema Photoreformierung experimentell und inhaltlich erschlossen werden. Beabsichtigt wurde, aufbauend auf den Rückmeldungen der vorhergehenden Erprobung leicht adaptierte und korrigierte Materialien für den Versuch zu präsentieren und auch hier die Rückmeldung der Teilnehmenden einzuholen.

Die Struktur der Lehrkräftefortbildung „*Photoreformierung von Biomasse - Wasserstoff aus Alkohol, Zucker und Stärke*“ orientierte sich an der des vorher beschriebenen Workshops, jedoch mit dem Unterschied, dass der zeitlich größere Rahmen eine intensivere Auseinandersetzung mit dem Thema Photoreformierung für die teilnehmenden Lehrkräfte ermöglichen sollte. Die Lehrkräftefortbildung gliederte sich in einen 30-minütigen einleitenden Vortrag mit der Vorstellung des Themas Photoreformierung. Der Fokus lag dabei auf den verschiedenen Produktionswegen von Wasserstoff, den damit zugeordneten „Farben des Wasserstoffs“ und der Verortung der Photoreformierung als einem möglichen Herstellungsweg von „grünem“ Wasserstoff. Im Anschluss daran sollte in der 100-minütigen Laborphase das Experiment im Vordergrund stehen, bei dem an vier kleineren Experimentierstationen der Versuch und das begleitende Material erprobt werden sollten. Geschlossen wurde die Lehrkräftefortbildung mit der Vorstellung der didaktischen Perspektive auf Photoreformierung von Biomasse und das Thema Wasserstoff in einem 15-minütigen Vortrag. Hierbei wurden auch die entwickelten Verlaufspläne zur exemplarischen Einbindung von BNE in den Chemieunterricht präsentiert, in die die Photoreformierung eingeordnet wurde. Neben konkreten Bezügen zum Kernlehrplan Chemie der Sek. II wurden auch die Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Photoreformierung wichtige Elemente von BNE aufgreift und so in den Chemieunterricht integrierbar sind. Nach einer kurzen Plenumsphase, in der zur Diskussion über das Thema angeregt wurde, erfolgte die Ausgabe der Fragebögen zur Einholung der Rückmeldung zur Lehrkräftefortbildung (*siehe digitaler Anhang*).

Basis für die experimentelle Erschließung der Photoreformierung innerhalb der vier Stationen bildete die Versuchsvariante im Reagenzglas und einer High-Power-LED als Lichtquelle. Für die Lehrkräfte frei wählbar waren folgende Stationen: Station 1: *Photoreformierung von Ethanol*, Station 2: *Photoreformierung von Ethanol bei erhöhten Temperaturen*, Station 3: *Photoreformierung von Glucose*, Station 4: *Photoreformierung eines glucosehaltigen Lebensmittels*. Beabsichtigt wurde mit der Bereitstellung vier leicht verschiedener Versuchssettings, dass die Lehrkräfte die Vielfalt einsetzbarer Substrate für

die Photoreformierung und den Einflussfaktor Temperatur auf die Entwicklungsrate des Wasserstoffs erfahren sollten. Zu jeder Station wurde zudem das Begleitmaterial beigelegt. Zur Auswertung des Experiments waren bei allen Stationen die identischen Aufgaben zu fachlichen Hintergründen und der Analyse der Gasprobe hinterlegt und zu den „Farben des Wasserstoffs“. Dazu waren auch die in der bereits vorherigen Erprobung (MINT-Tag NRW) vorgestellten Aufgaben und begleitenden Materialien unter dem Gesichtspunkt BNE eingebunden worden. Hierzu zählt unter anderem der Vergleich von Brennstoffzellen und Elektro-Antrieben sowie die ökonomische Perspektive auf beide.

Die Ziele, die sich mit dieser Erprobung verbanden, waren in weiten Teilen identisch zu denen der vorherigen Erprobung mit Lehrkräften. Rückmeldungen zu dem oben beschriebenen Experiment sowie den Inhalten und Aufgaben sollten durch die Befragung der Lehrkräfte eingeholt werden. Die Einschätzung der Eignung des Themas Photoreformierung für schulische Kontexte sollte Rückschlüsse dazu liefern, inwieweit das Thema, das Experiment und das begleitende Material als für Lernende geeignet von erfahrenen Lehrkräften eingeschätzt würden. Zudem sollte auch in persönlichen Gesprächen während der Laborphase erste Eindrücke der Lehrkräfte gesammelt werden. In diesem Zusammenhang wurde auch im Unterschied zur vorherigen Erprobung darauf hingewiesen, dass der benötigte Photokatalysator bei Interesse bereitgestellt werden kann oder dass die Bereitstellung weiterer Materialien für den Versuch möglich wäre.

Insgesamt nahmen an der Lehrkräftefortbildung sechs Chemielehrkräfte teil. Die durchschnittliche Lehrerfahrung lag bei ca. 14 Jahren. Besucht wurde die Veranstaltung von drei Gymnasiallehrkräften, zwei Gesamtschullehrkräften und einer Hauptschullehrkraft. Die Auswahl der Zweitfächer war dabei nicht auf den MINT-Bereich beschränkt. Die vorgestellte Leitlinie BNE NRW war der Hälfte bekannt. Unterrichtsinhalte mit einem BNE-Bezug im Chemieunterricht einzubinden wurde von vier Lehrkräften bestätigt. Als Themen mit BNE-Bezug, die im eigenen Fachunterricht schon umgesetzt werden, wurden Metallgewinnung, Kunststoffe bzw. Kunststoffrecycling und Elektrochemie benannt.

Fragen zum persönlichen Resultat der Lehrkräftefortbildung	Bewertung
Wie bewerten Sie die heutige Fortbildung im Allgemeinen (Struktur, didaktische Materialien, Methoden, praktische Anwendungen usw.)	3,8/4 (n = 6) 1 = sehr schlecht 4 = sehr gut
Hatten Sie Schwierigkeiten, den Inhalten der Lehrerfortbildung zu folgen?	3,5/4 (n = 6) 1 = große Schwierigkeiten 4 = keine Schwierigkeiten
Inwieweit fühlen Sie sich vorbereitet, BNE-Themen (auch mithilfe des Verlaufsplans) in Ihrem Unterricht behandeln zu können?	2,8/4 (n = 6) 1 = sehr schlecht vorbereitet 4 = sehr gut vorbereitet

Tab. 15: Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats der Lehrkräftefortbildung

Zwar handelt es sich erneut um eine mit sechs Teilnehmenden sehr kleine Stichprobe, jedoch lieferten auch diese Rückmeldung Erkenntnisse zum Thema Photoreformierung im

schulischen Kontext, die einige Erkenntnisse bestätigen konnten. Das Resümee zu der Lehrkräftefortbildung fiel insgesamt positiv aus (siehe Tab. 15). Es zeigte sich, dass die Mehrheit der teilnehmenden Lehrkräfte angibt, BNE-bezogene Inhalte in ihrem Unterricht umzusetzen, die Leitlinie BNE NRW war nur bei der Hälfte der Teilnehmenden bekannt. Bei der Frage, inwieweit sich die Lehrkräfte vorbereitet fühlen, BNE-bezogene Themen in ihrem eigenen Unterricht umzusetzen, bestanden auch nach der Fortbildung Unsicherheiten. Eine Beziehung zwischen der Unsicherheit, BNE-bezogene Themen in den Chemieunterricht einzubinden und der Bekanntheit der Leitlinie BNE NRW lässt sich auch hier erahnen.

Wie bewerten Sie den Aufbau des Experiments?		Bewertung
		1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Aufbau		3,5/4 (n = 6)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit der Experimentieranleitung und der Aufgaben zur Auswertung des Versuchs		Bewertung
		1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Versuchsdurchführung		3,6/4 (n = 5)
Beobachtung		4/4 (n = 4)
Auswertung Gaschromatografie		3,2/4 (n = 5)
Auswertung Photoreformierung		2,8/4 (n = 5)
Auswertung „Farben des Wasserstoffs“		3/4 (n = 4)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit dem Material?		Bewertung
		1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Aufgabe 3.1 & 3.2 (Wasserstoff und Mobilität)		2,8/4 (n = 4)
Infotexte Wasserstoff und Mobilität		2,8/4 (n = 4)
Aufgabe 3.3 (Wasserstoff in Verkehr und Industrie)		2,7/4 (n = 3)

Tab. 16: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Aufbauend auf dem persönlichen Resümee der Lehrkräftefortbildung wurde anschließend um Rückmeldung zu den Experimenten und dem begleitenden Material gebeten. Die Zahl der Rückmeldungen zu einzelnen Punkten des Fragebogens variiert, wodurch auch bei dieser Befragung zum Teil weniger Antworten als Teilnehmer in die Ergebnisse, die in *Tabelle 16* dargestellt sind, einfließen. Bei der Einschätzung, ob das Thema Photoreformierung in den aktuellen Kernlehrplan Chemie Sek. II des Landes NRW passt, stimmten die meisten Lehrkräfte zu (3,3/4). Als Einsatzmöglichkeiten in schulischen Bereichen waren jeweils „im regulären Chemieunterricht“, „über einen Ausflug ins Schülerlabor“, „bei Facharbeiten“, „an Projekttagen“ und „im Fächerübergreifenden Unterricht“ benannt worden. In den Gesprächen mit den Lehrkräften und durch den Fragenbogen ging hervor, dass als Probleme zumeist fehlende Materialien⁵⁹⁵ (4/6) und eine fachinhaltliche Überforderung der Lernenden sowie die Dauer des Experiments angeführt wurden. Als mögliche Lösungsansätze waren

⁵⁹⁵ Hierbei wurde in den Gesprächen besonders das Fehlen einer geeigneten Lichtquelle oder finanzieller Mittel für die Beschaffung einer solchen benannt.

finanzielle Förderungen, Kooperationen mit der Chemiedidaktik, die Bereitstellung des Photokatalysators und ein höheres Zeitinvestment benannt.

Bei der Einschätzung des Schwierigkeitsgrades zeigte sich, dass die Lehrkräfte sowohl das Experiment als auch das Begleitmaterial als eher einfach einschätzten. Als schwieriger wurden die fachliche Auswertung des Versuchs mit den Prozessschritten während der Photoreformierung sowie das Material zu den Aspekten Wasserstoff und Mobilität und dem Einsatz von Wasserstoff in Verkehr und Industrie bewertet. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 16* dargestellt. Während der Laborphase konnte zudem in Gesprächen auch Gründe erfahren werden, womit die Lehrkräfte die Einschätzung begründeten. Drei der anwesenden Lehrkräfte benannten die hohe Textdichte und Länge der angegebenen Informationen im Material sowie die Komplexität der Diagramme als Faktoren, weshalb ihre Lernenden mit dem Material größere Probleme haben könnten. Bei der Frage, ob die Lehrkräfte das Experiment im Unterricht einsetzen würden, stimmten vier Teilnehmende zu, eine Person enthielt sich, eine weitere nannte als Bemerkung, dass sie es nicht einsetzen würde, weil Materialien (Lichtquelle) nicht vorhanden wären. Beim begleitenden Material zum Versuch Photoreformierung gaben zwei Lehrkräfte an, dass sie es in ihrem Unterricht einsetzen würden, wobei in einem Fall als Begründung angegeben wurde, dass der Teilnehmende das Material persönlich „super“ finde. Zwei Lehrkräfte verneinten, dass sie das Material einsetzen würden. Dies wurde in einem Fall begründet. Als Grund wurde genannt, dass im Hinblick auf die eigenen Lernenden bewerte wurde, nicht jedoch im Allgemeinen Lernende gemeint wurden. Zwei Lehrkräfte machten keine Angaben.

Die Bilanz der Ergebnisse zum Experiment „Photoreformierung von Ethanol“ (bzw. der leichten Variationen mit Glucose und der Temperatur) muss aufgrund der sehr kleinen Stichprobe vorsichtig gedeutet werden. Die Antworten der Lehrkräfte spiegeln ihre subjektive Meinung wider und können somit durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst sein, die nicht eindeutig zu überblicken sind. Es lassen sich zur vorherigen Befragung im Rahmen des MINT-Tages NRW Tendenzen erkennen, auf deren Basis Aussagen zur Eignung des Experiments und der begleitenden Materialien getätigt werden können. Zu solchen Erkenntnissen gehören auch bei dieser Erprobung, dass die Lehrkräfte insgesamt das Thema Photoreformierung als inhaltlich geeignet für den schulischen Kontext und als passend zu Inhalten des Kernlehrplans Chemie empfinden. Das Experiment wurde in seinem Aufbau, der Durchführung und den Beobachtungen auch bei dieser Erprobung als eher einfach beschrieben. Die Bereitschaft, das Experiment im eigenen Unterricht einzusetzen scheint jedoch stark abhängig davon zu sein, wie die Beschaffung der benötigten Materialien empfunden wurde. Auch hier wurde die eingesetzte Lichtquelle und die damit verbundenen Kosten als Problem identifiziert. Allerdings führte der deutlich gemachte Hinweis, dass der Photokatalysator und andere Materialien bereitgestellt werden können, bei dieser Erprobung dazu, dass zwar die Probleme benannt wurden, aber auch rückgemeldet wurde, dass dafür Lösungen angeboten wurden. Es kann somit die Umsetzung von neuen als relevant angesehenen Versuchen und Themen im Chemieunterricht gefördert werden, wenn Lehrkräfte auch benötigte Materialien zur Umsetzung bereitgestellt bekommen.

Tendenziell werden die Aufgaben zur Auswertung des Experiments sowie das Material mit Aufgaben zur ökologischen und ökonomischen Perspektive des Einsatzes von Wasserstoff

sowie zu den „Farben des Wasserstoffs“ als schwieriger für die eigenen Lernenden angesehen. Auch diese Rückmeldung unterscheidet sich kaum von denen der Lehrkräfte, die im Rahmen des Workshops am MINT-Tag NRW gemacht wurden. Trotz des als erhöht empfundenen Schwierigkeitsgrades, würden die Lehrkräfte das Material in ihrem eigenen Unterricht einsetzen. Die gezielte Fokussierung auf Aufgaben und Materialien, die eine ökonomische und ökologische Perspektive auf das Thema Wasserstoff aufwerfen, kann somit bezogen auf die Stichproben des MINT-Tages NRW und der Lehrkräftefortbildung als geeignet für den Chemieunterricht im Kontext alternativer Antriebe, Brennstoffzellen und Elektromobilität angesehen werden. Insgesamt zeigen die positiven und wertschätzenden Rückmeldungen, dass ein flexibel einsetzbares Material zu einem Experiment präsentiert werden konnte, das insgesamt als schultaugliches Angebot wahrgenommen wurde.

6.8.4. Erprobungen im Rahmen des Schülerlabors „Wege aus der Klimakrise“

Die Schülerlabor-Einheit „*Wege aus der Klimakrise*“⁵⁹⁶ wurde an der Bergischen Universität Wuppertal von Mitarbeitenden bzw. Doktoranden der Didaktik der Chemie 2022 entwickelt. Beabsichtigt war ein Schülerlaborangebot zu schaffen, das gezielt BNE in den Fokus nimmt und experimentorientiert, einige aktuelle Frage- bzw. Problemstellungen zum Thema Klimawandel aufgreift und mögliche Lösungsansätze präsentiert. Dabei wurde die Klimakrise exemplarisch als eines von insgesamt neun Aspekten der planetaren Belastungsgrenzen (*siehe Kap. 1*) herausgegriffen, um ausgewählte Lösungsvorschläge dieser Problematik mit Lernenden zu erarbeiten, darüber zu diskutieren, diese zu bewerten und Handlungsoptionen zu entwickeln. Vor allem die Betrachtung verschiedener Probleme aus unterschiedlichen Perspektiven und Dimensionen heraus sowie die Sensibilisierung der Lernenden für den Umgang mit Widersprüchen bei manchen Lösungsansätzen sind wichtige Elemente einer BNE, die im Rahmen dieser Schülerlabor-Einheit einbezogen werden sollten. In vier unterschiedlichen Versuchsblöcken steht mindestens ein Schlüsselexperiment im Mittelpunkt, durch welches verschiedene Problematiken oder aktuelle Herausforderungen in Bereichen Kohlenstoffdioxid-Emissionen, Umweltbelastungen und zukünftiger Energieträger thematisiert werden. Die Schülerlabor-Einheit ist im Kernlehrplan der Oberstufe NRW für die Einführungsphase (EF), im Inhaltsfeld 2 „Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht“ verortet.⁵⁹⁷ Zu Beginn des Jahres 2023 erfolgte erstmals mit Studierenden sowie Schülerinnen und Schülern eine Erprobung. Im Folgenden sollen kurz die wichtigsten Aspekte der Schülerlabor-Einheit vorgestellt werden, bevor zu einem kurzen allgemeinen Fazit der gesamten Einheit genauer auf dem darin eingebundenen Experiment „Photoreformierung von Ethanol“ und der dazugehörigen Materialien geblickt wird.

⁵⁹⁶ Kiesling, Elisabeth; Kremer, Richard; Pereira Vaz, Nuno; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Wege aus der Klimakrise - ein BNE-Schülerlaborangebot mit mehrdimensionalem Zugang*, in: MNU Journal 76 (06), 2023, S. 464-472.

⁵⁹⁷ Kiesling et al., *Wege aus der Klimakrise*, S. 464-465.

6.8.4.1. Ziele der Schülerlabor-Einheit

Bei der Konzeption der Schülerlabor-Einheit wurden drei zentrale Punkte berücksichtigt, die in die allgemeine Zielsetzung einfließen.⁵⁹⁸ Erstens orientiert sich die Schülerlabor-Einheit in ihrer allgemeinen Zielsetzung an den SDGs 7 (Bezahlbare und saubere Energie), 9 (Industrie, Innovation und Infrastruktur) und 13 (Maßnahmen zum Klimaschutz).⁵⁹⁹ Zweitens orientiert sie sich an Themenvorschlägen zur Umsetzung in Chemie der Leitlinie BNE NRW, in der der Klimawandel, Stoffkreisläufe und Energieversorgung benannt werden.⁶⁰⁰ Drittens berücksichtigt die Schülerlabor-Einheit die Vorgaben des Kernlehrplans Chemie NRW, in dem die Lernenden im Inhaltsfeld „Reaktionsgeschwindigkeit und chemisches Gleichgewicht“ die Auswirkungen anthropogener Eingriffe hinsichtlich des Klimawandels einschätzen und ökonomische, ökologische Nutzen technischer Verfahren beurteilen sollen.⁶⁰¹

Mit der Schülerlabor-Einheit sollten also gezielt verschiedene Dimensionen angesprochen werden, aus deren Blickwinkeln heraus unterschiedliche Themen erschlossen werden sollen. Damit die Lernenden bei der Bearbeitung der einzelnen Versuchsblöcke nicht überfordert werden, wurden jeweils drei unterschiedliche Dimensionen schwerpunktmäßig für einen Versuchsblock ausgewählt.⁶⁰² In Summe werden aber die fünf in der Leitlinie BNE NRW angeführten Dimensionen mindestens einmal in der gesamten Schülerlabor-Einheit angesprochen. So werden expliziert bestimmte Themen aus einer kulturellen, sozialen oder politischen Perspektive heraus betrachtet, um so auch die im naturwissenschaftlichen Unterricht vielleicht seltener oder weniger stark angesprochenen Dimensionen im Sinne einer BNE zu berücksichtigen. Die Lernenden sollen erkennen, dass es nicht den einen Lösungsweg für die Problematik der Klimakrise existiert und dass auch die vorgestellten Ansätze als mögliche Lösungswege angesehen werden müssen, die als „Schritte in die richtige Richtung“ angesehen werden können, aber nicht alleinig wirken und Abhängigkeiten untereinander berücksichtigt werden müssen.

Mit dem Einsatz eines grafischen Werkzeugs, der SOCME (System Oriented Concept Map Extension)⁶⁰³ sollen die Lernenden zudem im Sinne eines Systemischen Denkens Wissen clustern und vernetzen, sodass mehrere Perspektiven und die vier einzelnen Themen zusammengebracht werden können.⁶⁰⁴ Dadurch sollen die Lernenden erkennen, dass vielfältige Beziehung zwischen einzelnen Themen existieren, die untereinander auch abhängig sein können bzw. sich gegenseitig beeinflussen. Mithilfe von Vorstrukturierungen soll hier die Komplexität reduziert und die Lernenden bei der Erstellung einer SOCME unterstützt werden.

⁵⁹⁸ Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 464-465.

⁵⁹⁹ UN, Agenda 2030, S. 15.

⁶⁰⁰ MSB NRW, Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung, S. 35.

⁶⁰¹ MSB NRW, Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Chemie., S. 30-31.

⁶⁰² Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 465.

⁶⁰³ Matlin, Stephen A.: *Introducing the SOCME tool for systems thinking in chemistry*, International Organization for Chemical Sciences in Development, Quebec 2020;

online unter: http://www.iocd.org/v2_PDF/2020-TechRes0301-SOCME-Intro.pdf (Zugriff: 21.09.2023).

⁶⁰⁴ Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 464.

6.8.4.2. Aufbau und Struktur der Schülerlabor-Einheit⁶⁰⁵

Im Zentrum der Schülerlaboreinheit „Wege aus der Klimakrise“ stehen vier Versuchsblöcke, mit denen jeweils eine ausgewählte Problemstellung thematisiert, experimentorientiert erarbeitet und mögliche Lösungsansätze diskutiert werden. Zu Beginn der Schülerlabor-Einheit sollen die Lernenden mithilfe eines kurzen, einführenden Vortrags (ca. 30 Minuten) in die Problematik der planetaren Belastungsgrenzen und der Klimakrise als einem Aspekt dieser eingeführt werden. Dazu werden neben den aktuellen Kohlenstoffdioxid-Emissionen auch zum ersten Mal eine vorstrukturierte SOCME zum Thema gezeigt, mit deren Hilfe die verschiedenen Dimensionen eines Themas vorgestellt werden.

In der anschließenden Laborphase (ca. 150 Minuten) erarbeiten die Lernenden in Kleingruppen in vier unterschiedlichen Versuchsblöcken ein Thema. Mittels einer digitalen Lernbegleiters (E-Book) werden die Lernenden durch das Experiment oder die Experimente geführt, das oder die sie eigenständig unter Beaufsichtigung eines Betreuenden durchführen. Zusätzlich zum Versuch sind Anwendungs- und Auswertungsaufgaben zum Experiment und zum Thema hinterlegt, die zu bearbeiten sind. Die vier Versuchsblöcke behandeln die Themen Treibhauseffekt (Versuchsblock 1), Stickoxidemissionen beim Auto (Versuchsblock 2), Carbon Capture and Storage (Versuchsblock 3) und Photoreformierung (Versuchsblock 4).⁶⁰⁶ Als Teil der Auswertungsfragen zu den einzelnen Versuchsblöcken sollen die Lernenden zum Abschluss dieser Erarbeitungsphase die für sie als wichtig empfundenen Stichwörter drei vorgegebenen Dimensionen zuordnen. Mithilfe dieser sollen sie eine vorstrukturierte SOCME zu ihrem Versuchsblock entwickeln, bevor die Kleingruppen dann in neue Kleingruppen umgebildet werden. In diesen neuen Kleingruppen befindet sich jeweils ein Experte/eine Expertin, die ihren Versuchsblock den anderen vorstellt. Ziel ist es, dass die vorher bereits erstellten SOCMEs zu einer größeren SOCME zusammengeführt werden, in denen die einzelnen Versuchsblöcke miteinander in Beziehung gesetzt sind.⁶⁰⁷

In der Abschlussphase (ca. 30 Minuten) wird exemplarisch eine SOCME von einer Lernenden-Gruppe den anderen Lernenden vorgestellt. Dabei sollen die anderen gegebenenfalls Anmerkungen, Ergänzungen und Rückmeldungen machen. Abgeschlossen wird die Schülerlabor-Einheit mit dem Verfassen eines Twitter-Posts durch die Lernenden, in dem sie persönliche, oder an die Gesellschaft bzw. Politik gerichtete Appelle und/oder Handlungsoptionen formulieren.⁶⁰⁸

6.8.4.3. Struktur des Versuchsblocks Photoreformierung

Im Rahmen der Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ bildet das Thema Photoreformierung einen von vier Versuchsblöcken, in dem die Herstellung „grünen“ Wasserstoffs als nachhaltigem und zukunftsfähigen Energieträger und damit als einem

⁶⁰⁵ Zu weiteren Darstellungen des Aufbaus: Kiesling, Elisabeth; Venzlaff, Julian; Bohrmann-Linde, Claudia: *Wege aus der Klimakrise - Eine Schülerlaboreinheit zu BNE im Chemieunterricht*. Poster, Wuppertal 2023; online unter: https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/fileadmin/Chemie/chemiedidaktik/files/material/BNE-allgemein/Poster_GDCh_23_Kiesling_Venzlaff_2_Entwurf.pdf (15.03.2024).

⁶⁰⁶ Kiesling et al., *Wege aus der Klimakrise*, S. 465.

⁶⁰⁷ Ebd., S. 465-470.

⁶⁰⁸ Ebd., S. 470.

möglichen Lösungsweg als der Klimakrise zur Diskussion gestellt wird. Eingebunden wurde hierbei der in *Kapitel 5.6.2.* beschriebene Aufbau. Das Experiment wird von den Lernenden mithilfe einer im digitalen Lernbegleiter bebilderten Schritt-für-Schritt Anleitung aufgebaut und durchgeführt. Während der Bestrahlungszeit können die im Lernbegleiter hinterlegten Aufgaben zur ökologischen, ökonomischen und sozialen Perspektive auf Wasserstoff und seinem Einsatz bearbeitet werden. Anschließend erfolgt die Durchführung des zweiten Versuchsteils, der Knallgasprobe. Wie auch bei allen anderen Versuchsblöcken dieser Schülerlabor-Einheit sollen die Auswertungsaufgaben sowohl zum Experiment als auch zu den begleitenden Materialien in der Auswahl einzelner zentraler Begriffe münden, die die Lernenden den drei ausgewählten Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales zuordnen sollen.⁶⁰⁹ Die Priorisierung und Auswahl von Begriffen erfolgt durch die Lernenden, die mithilfe dieser Begriffe die Erstellung einer SOCME zum Thema Photoreformierung beginnen. Dabei sollen sie die Begriffe in die im digitalen Lernbegleiter vorstrukturierte SOCME eintragen, den Dimensionen zuordnen und diese in Beziehung setzen.

Bei den das Experiment begleitenden Materialien handelt es sich in weiten Zügen um das bis zu diesem Zeitpunkt entwickelte und im Rahmen von Lehrkräftefortbildung und Workshop erprobte Material. Die Umfasst die in *Kapitel 6.7.1.* genauer beschriebenen Materialien und Aufgaben zum Thema Photoreformierung, zu den „Farben des Wasserstoffs“, der Betrachtung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei Brennstoffzellenbasierten Fahrzeugen und Elektroautos sowie zu Wirkungsgraden beider Antriebsformen. Daneben wurde für den Einsatz in der Schülerlabor-Einheit Material konzipiert, das die soziale Perspektive auf beide Antriebsformen in den Blick nimmt. Dieses Material ist in *Kapitel 6.7.1.4* näher beschrieben.

6.8.4.4. Erprobung mit Studierenden (30.01.2023)

Die Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ wurde in einem ersten Schritt mit Lehramtsstudierenden des Fachs Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal erprobt. Sie durchliefen die entwickelte Einheit wie intendierte Schülergruppen und sollten Rückmeldungen geben, wie sie das Programm empfunden haben und wo sie mögliche Schwierigkeiten sehen, wenn Schülerinnen und Schüler diese Schülerlabor-Einheit durchlaufen würden. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sollten in möglichen Weiterentwicklungen, Korrekturen oder Adaptionen berücksichtigt werden, bevor die Schülerlabor-Einheit mit Lernenden aus einer Schule erprobt werden sollte. Im Folgenden wird nur kurz auf die Gesamtergebnisse dieser Erprobung eingegangen und welche Rückmeldungen zur Gestaltung der Schülerlabor-Einheit, der Auswahl der Versuche und der Erstellung einer SOCME zur Visualisierung der Ergebnisse nach Abschluss der Erprobung gegeben wurde. Hier mit hinein fließen auch die Beobachtungen, die durch die Betreuenden, bzw. Entwickler der Schülerlabor-Einheit gemacht wurden. Anschließend werden die Beobachtungen während der Erprobung und die Rückmeldungen der Studierenden zum Versuchsblock Photoreformierung vorgestellt.

⁶⁰⁹ Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 469.

6.8.4.4.1. Gesamtergebnis der Erprobung mit Studierenden

Insgesamt nahmen an der ersten Erprobung acht Studierende teil. Nach dem einführenden Kurzvortrag verteilten sich jeweils zwei Personen auf die vier Versuchsblöcke. Es war zu beobachten, dass die Experimente ohne größere Probleme und mit nur wenig Unterstützung der Betreuenden von den Studierenden eigenständig durchgeführt wurden. Durch Gespräche mit den Studierenden an den Versuchsblöcken war ersichtlich, dass auch die Bearbeitung der im digitalen Lernbegleiter aufgeführten Aufgaben zu den unterschiedlichen Dimensionen der einzelnen Versuchsblöcke erfolgreich war.⁶¹⁰ Verständnisfragen zu Fragestellungen oder Formulierungen bei Aufgaben innerhalb des digitalen Lernbegleiters tauchten nur selten auf. Die größten Unterschiede zwischen den Versuchsblöcken zeigte sich in der Bearbeitungszeit. Bei Versuchsblock 2 und 3 war die Experimentierphase länger als bei den anderen beiden Blöcken, sodass insgesamt für die Erarbeitung 150 Minuten benötigt wurden.

Als herausfordernd erwies sich die am Ende des digitalen Lernbegleiters gestellten Aufgaben zur Entwicklung der SOCMEs. Sowohl die Beobachtungen der Betreuenden als auch die Rückmeldungen der Studierenden zeigten, dass bereits die Formulierung zentraler Begriffe, die für das jeweilige Thema als wichtig empfunden wurden, mit Schwierigkeit verbunden waren⁶¹¹. Besonders die Frage, welche Begriffe zu wählen sind, zeigte die Problematik, dass nach „richtigen“ Begriffen gesucht wurde, nicht nach Begriffen, die den Studierenden als bedeutsam für die jeweilige Thematik erschienen. Auch die Zuordnung gefundener Begriffe zu den unterschiedlichen Dimensionen konnte nur mit Unterstützung der Betreuenden vollzogen werden.⁶¹² Diese Probleme bestanden ebenfalls bei der Erstellung der SOCMEs. Insgesamt wurden von den Studierenden zwei SOCMEs angefertigt, bedingt dadurch, dass jeweils vier Studierende als Bearbeitende eines Versuchsblocks eine Gruppe bildeten. Bei der in der abschließenden Plenumsphase vorgestellten SOCMEs zeigte sich, dass eine Tiefgründigkeit der entworfenen SOCMEs nicht stark ausgeprägt war.⁶¹³ Auch die zentralen Merkmale einer SOCME wie die Beschriftung der Pfeile, durch die Begriffe in Beziehung gesetzt werden, fehlte fast vollständig. Trotzdem war erkennbar, dass in der angeschlossenen Diskussion die Studierende viele Aspekte der verschiedenen Versuchsblöcke miteinander in Beziehung setzen konnten. Eine Verknüpfung von Inhalten hatte somit stattgefunden, sie war jedoch nicht durch die SOCME deutlich geworden. In Bezug auf eine Erprobung mit Schülerinnen und Schülern meldeten die Studierenden ebenfalls zurück, dass laut ihrer Einschätzung die Arbeit an den Experimenten und dem begleitenden Material weniger Schwierigkeiten für die Schülerinnen und Schüler bereitgehalten würde, die Erstellung der SOCME als herausfordernd angesehen werden würde. Als Grund für die Probleme bei der Erstellung einer SOCME lässt sich einerseits die Kürze des Zeitraums vermuten, in der vier recht komplexe und vielschichtige Themen zusammengeführt werden und andererseits, dass es sich bei der Erstellung einer SOCME um eine für die Studierenden neue Methode handelte, mit der sie ihre Gedanken visualisieren sollten.⁶¹⁴

⁶¹⁰ Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 469.

⁶¹¹ Ebd., S. 469.

⁶¹² Ebd.

⁶¹³ Ebd., S. 470.

⁶¹⁴ Ebd., S. 469-470.

6.8.4.4.2. Ergebnisse der Durchführung des Versuchsblocks Photoreformierung mit Studierenden

Bedingt durch eine gleichmäßige Verteilung der Studierenden auf die einzelnen Versuchsblöcke konnten zwei Studierende das Experiment und die Materialien zur Photoreformierung bearbeiten. Zudem wurde beiden Studierenden am Ende der Laborphase ein Fragebogen ausgeteilt, in dem sie Rückmeldungen zum Experiment und den begleitenden Materialien geben konnten. Die Gestaltung des Fragebogens orientierte sich dabei an der bereits bei den Fortbildungen und Workshops an die Lehrkräfte ausgehändigten Fragebögen. Er ist im Anhang angefügt. Zudem wurde der durch die Studierenden ausgefüllte, digitale Lernbegleiter herangezogen, um die bearbeiteten Aufgaben zu untersuchen und sie mit dem Erwartungshorizont zu vergleichen.

Während der Laborphase konnten die Studierenden beim Experimentieren beobachtet werden. Sie konnten ohne größere Probleme mit den Anleitungen zur Durchführung den Versuch Schritt für Schritt aufbauen, sodass nach 15 Minuten der Aufbau erfolgt war. Nach 30 Minuten waren 5 mL Gas aufgefangen worden, mit denen die Knallgasprobe durchgeführt werden konnte. Die Wartezeit während der Bestrahlung wurde wie beabsichtigt durch die Studierenden zur Bearbeitung der Aufgaben genutzt. Kleinere Schwierigkeiten ergaben sich während des Experimentierens dadurch, dass das Reagenzglas nicht bis zum unteren Rand des aufgesetzten Stopfens aufgefüllt wurde, wodurch ein kleiner Luftraum zwischen Stopfen und Flüssigkeit zu erkennen war. Trotz dieses kleinen Luftraums konnte die Knallgasprobe erfolgreich durchgeführt werden, auch wenn die Lautstärke des Knalls nicht so stark war wie bei anderen Erprobungen. Zu Beginn war außerdem die Stativklemme zur Fixierung des Stopfens nicht beachtet worden. Dies konnte durch einen kurzen Hinweis des Betreuenden behoben werden. Die Rückmeldungen der Studierenden mittels des Fragebogens sind den Aufbau des Experiments betreffend deckungsgleich mit den Beobachtungen, die im Labor gemacht werden konnten. Beide Studierende gaben an, dass sie mithilfe der bebilderten Versuchsanleitung keine Schwierigkeiten hatten, den Versuch aufzubauen. Auch die Durchführung wurde als eher einfach, die Beobachtungen sogar als sehr einfach bewertet. Rückgemeldet wurden im Zusammenhang mit der praktischen Erprobung auch in einem Fall, dass zu Beginn einiges an Unklarheit dazu bestand, wie das Reagenzglas zu befüllen wäre. Auch das war mit den Beobachtungen übereinstimmend.

Für die Bearbeitung des begleitenden Materials wurden von den Studierenden insgesamt 55 Minuten benötigt, bis die Aufgabe zur Erstellung der SOCME erreicht wurde. Darin enthalten waren auch die etwa sieben Minuten zur Durchführung des zweiten Versuchsteils mit der Knallgasprobe. Während dieser Phase konnten nur wenige Beobachtungen gemacht werden, wie die Studierenden mit dem Material arbeiteten, sodass die Rückmeldungen hierzu mittels des Fragebogens entscheidende Hinweise dazu liefern, wie die Aufgaben und das begleitende Material wahrgenommen wurden. Der Schwierigkeitsgrad der Auswertungsaufgaben zur Photoreformierung und der Informationen zu den fachlichen Hintergründen wurden als eher schwierig bis eher einfach bewertet. Angemerkt wurde unter anderem, dass die Auswertung der Photoreformierung auf submikroskopischer Ebene als zu schwierig für Schülerinnen und Schüler angesehen wird und die fachlichen Grundlagen als anspruchsvoll wahrgenommen werden. Die Aufgaben zu den „Farben des Wasserstoffs“ wurden von den

Studierenden als sehr einfach bewertet. Das Material und die Aufgaben zu Wasserstoff vs. Elektromobilität, wo die ökologischen und ökonomischen Dimensionen aufgeworfen werden, wurde als eher einfach bewertet, während die Aufgaben zur sozialen Dimension der Verkehrswende als eher schwierig angesehen wurden. Im Rahmen des Fragebogens wurde in einem Fall rückgemeldet, dass die Menge an genutzten Diagrammen und Statistiken zu den Aufgaben zur sozialen Dimension leicht unübersichtlich wirken und dass die Vergleiche zwischen den zwei Antriebsformen am Ende der Aufgaben zu den verschiedenen Dimensionen wie eine Wiederholung wirke. Dieser Aspekt wurde auch während persönlicher Gespräche im Laufe der Erarbeitungsphase angemerkt, dass es zum Teil als Wiederholung angesehen werde, wenn bei jeder Dimension eine Bewertung der ökologischen, ökonomischen oder sozialen Perspektive erfolge. Auch die länger benötigte Zeit, die zwei Diagramme zu den unterschiedlichen Treibhausgas-Emissionen verschiedener Antriebe zu verstehen und ihre Inhalte zu entnehmen wurde angemerkt und als „unübersichtlich“ beschrieben. Als sehr positiv hervorgehoben wurde der Einsatz erklärender oder zusammenfassender Videos als Wechsel zwischen verschiedenen Formaten sowie die soziale Dimension, die explizit für das Thema Photoreformierung herausgegriffen wurde und somit in den Bereich des Chemieunterrichts einbezogen wurde.

Bei der Betrachtung des bearbeiteten, digitalen Lernbegleiters durch die Studierenden zeigt sich, dass die Aufgaben ohne größere Probleme inhaltlich dem Erwartungshorizont entsprechend bearbeitet wurden. Sowohl die Aufgaben zur fachlichen Auswertung als auch die Erstellung einer Tabelle zum Vergleich der „Farben des Wasserstoffs“ wurden inhaltlich korrekt dargestellt. Die Einordnung der Photoreformierung in diese Farben erfolgte ebenfalls angemessen und logisch begründet. Die Aufgaben zur ökologischen und ökonomischen Dimension konnten von den Studierenden auch in der Art beantwortet werden, wie es dem Erwartungshorizont dieser Aufgaben entsprach. Schriftlich wurde im Rahmen der Aufgabe zur ökonomischen Dimension ein Fazit ergänzt, dass keiner der Antriebe grundsätzlich zu bevorzugen sein, sondern je nach Anwendungsgebiet gehandelt werden sollte. Damit zeigt sich eindeutig, dass die intendierte Absicht mit dieser Aufgabe, aus verschiedenen Perspektiven heraus auf ein Thema zu Blicken und aufzuzeigen, dass es nicht einen einzelnen Lösungsweg für ein Problem gibt, durchaus als erfüllt angesehen werden kann. Die Aufgabe zur sozialen Dimension wurde nur sehr kurz beantwortet. Auf die Aufgabenstellung wurde offensichtlich nicht genauer eingegangen. Als Vorschläge für mögliche Maßnahmen, die die Sorgen der Bevölkerung berücksichtigen, wurden höhere Elektroauto Prämien und eine intensivere Aufklärung benannt. Letzterer Aspekt wurde nicht näher definiert. Ein genauer Grund hierfür kann sich im Falle dieser einzelnen Erprobung nicht identifizieren lassen.

Auch wenn bei der Erprobung mit nur zwei Studierenden an dem Versuchsblock Photoreformierung teilnehmen konnten, konnten wertvolle Rückmeldungen zum Versuch und den konzipierten Lernbegleiter eingeholt werden. Wie auch bei den vorherigen Erprobungen spiegeln die Rückmeldungen die subjektive Wahrnehmung der Teilnehmenden wider und können nicht als objektive Beobachtungen gewertet werden. Insgesamt kann aber sowohl durch die Erprobungen mit den Studierenden als auch durch die Einschätzungen der Studierenden wie auch Lehrkräfte angenommen werden, dass das Experiment auch von Schülerinnen und Schülern der intendierten Altersgruppe (11. Klasse/Einführungsphase) problemlos durchführbar sein sollte. Dadurch wurde das Experiment in der gleichen Art und

Weise in den Versuchsblock übernommen. Auf Basis der Rückmeldungen wurden kleine Anpassungen im digitalen Lernbegleiter beim begleitenden Material vor der Erprobung mit den Schülerinnen und Schülern vorgenommen. Die Einordnung der Photoreformierung zu einer Variante „grünen“ Wasserstoff herzustellen wird dem Anschein nach als nicht zu anspruchsvoll wahrgenommen, obwohl sie das Bindeglied zwischen dem Experimentalteil und dem Auswertungsteil ist, der BNE stärker ins Zentrum setzt. Dieser Beurteilungsprozess scheint innerhalb des Versuchsblocks jedoch nicht als schwierig angesehen zu werden. Ähnliche Rückmeldungen konnten auch bei den Befragungen von Lehrkräften erhalten werden, sodass diese zentrale Aufgabe für Schülerinnen und Schüler als bewältigbar angesehen werden können. Als herausfordernder können dagegen die Aufgaben zur fachlichen Auswertung des Versuchs und den unterschiedlichen Dimensionen bei Vergleich zwischen der Nutzung von Wasserstoff oder Strom im Verkehrssektor angesehen werden. Angepasst wurden in diesem Zusammenhang die Darstellung der Diagramme zu den Treibhausgas-Emissionen verschiedener Antriebe. Hier wurde zur Reduzierung der Informationsdichte die Antriebsvariante mit dem 90 kWh-Motor entfernt, sodass nur noch ein Typ eines Elektromotors aufgeführt ist. Um jedoch den Schülerinnen und Schülern weiterhin eine Vorstrukturierung für die Bewertung beider Antriebsformen aus den unterschiedlichen Dimensionen zu ermöglichen, wurde eine weitere, strukturelle Änderung der Materialien nicht vorgenommen. Die Aufgaben zur sozialen Dimension wurden übernommen, da sie zwar als Herausforderung angesehen wurden, nicht jedoch als unlösbar für Schülerinnen und Schüler, sodass sie im Sinne einer möglichen Differenzierung mit den Aufgaben auch unterschiedlich leistungsstarke Kohorten an Schülerinnen und Schülern angesprochen werden können.

6.8.4.5. Erprobung mit Schülerinnen und Schülern (13.02.2023)

Die erste Erprobung mit Schülerinnen und Schülern erfolgte im Rahmen eines durch eine Gesamtschule veranstalteten „MINT-Tages“, an dem interessierte Schülerinnen und Schüler an einem frei gewählten Angebot an der Bergischen Universität Wuppertal im Bereich der Naturwissenschaften teilnehmen konnten. Im Fachbereich Chemie wurde die Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ angeboten, das für diesen Anlass erstmals konzipiert wurde. 17 Schülerinnen und Schüler entschieden sich für dieses Angebot, von denen elf Teilnehmende der 11. Jahrgangsstufe und jeweils zwei der 9., 10. und 12. Jahrgangsstufe waren und auch unterschiedlichen Kurszusammensetzung bestanden. Damit war die überwiegende Anzahl der Teilnehmenden der intendierten Zielgruppe der Einführungsphase der gymnasialen Oberstufe zuzuordnen.

Beabsichtigt wurde sowohl auf das gesamte Programm der Schülerlabor-Einheit zu blicken und mögliche Rückschlüsse auf Weiterentwicklungen zu ziehen, als auch innerhalb der einzelnen Versuchsblöcke die Schülerinnen und Schüler beim Experimentieren und der Bearbeitung der Aufgaben zu beobachten und darüber für die einzelnen Versuchsblöcke Erkenntnisse zu erlangen, die eine Optimierung ermöglichen würden. Angestrebt wurde zudem diese Erprobung zu nutzen, um die Möglichkeit der Verstetigung dieser Schülerlabor-Einheit im Rahmen des Schülerlabors „Chemie-Labothek“ an der Bergischen Universität Wuppertal zu ermitteln.

6.8.4.5.1. Gesamtergebnis der Erprobung mit Schülerinnen und Schülern

Bei der Erprobung mit den Schülerinnen und Schülern konnten einige parallele Beobachtungen zu der Kohorte mit den Studierenden gemacht werden.⁶¹⁵ Grundsätzlich hatten die Lernenden mit der Durchführung der Experimente und der Bearbeitung der Aufgaben sowie im Umgang mit dem begleitenden Material in Form von Infotexten oder Grafiken nur wenige Schwierigkeiten. Es zeigte sich eine hohe Selbstständigkeit. Die Betreuenden der Schülerlabor-Einheit mussten nur selten bei der praktischen Arbeit während des Experimentierens und bei inhaltlichen Fragen zum Material unterstützen.

Deutlich größere Schwierigkeiten bestanden allerdings bei der Formulierung zentraler Begriffe, der Zuordnung diese zu den entsprechenden Dimensionen und der Erstellung der SOCME. Hier mussten die Betreuenden wesentlich stärker leitend eingreifen und die Schülerinnen und Schüler dabei unterstützen, welche Begriffe für sie bei den jeweiligen Versuchsblöcken als zentral erschienen und welcher Dimension sie primär damit verbinden und ausdrücken wollen würden. Auch bei der Erstellung einer SOCME wurde viele Fragen an die Betreuenden gerichtet, wie genau eine solche zu gestalten wäre. Die Probleme, die sich bereits in der Erarbeitungsphase beobachten ließen, wurde auch bei der Präsentation einer SOCME durch eine Lernenden-Gruppe sichtbar. Die SOCME enthielt zwar zahlreiche Begriffe, die den Dimensionen zugeordnet waren, jedoch nur selten in Beziehung zueinander gesetzt worden waren. Die gerichteten Pfeile waren nicht immer beschriftet worden. Die bereits vorgegebenen Begriffe, die als Unterstützung angedacht waren, waren ebenfalls nicht miteinbezogen worden. In der Diskussion zeigte sich jedoch, dass viele Aspekte, die die Lernenden während der Laborphase erarbeitet hatten, präsent waren und sie darüber berichten konnten. Auch die Anbahnung von vernetzendem Wissen zu den unterschiedlichen Versuchsblöcken wurden bei einigen Schülerinnen und Schülern ersichtlich, die einzelnen Punkte verknüpfen konnten und so während der abschließenden Plenumsphase Ergänzungen zu der vorgestellten SOCME geben konnten.

Die Gründe für die Schwierigkeiten während der Erprobung mit den Schülerinnen und Schülern sind vermutlich ähnlich zu den Herausforderungen, die während der ersten Erprobung von den Studierenden gemacht wurden. Da die Methode für die Lernenden neu war, musste mehr Übung und Routine im Umgang mit Werkzeugen zum Systemischen Denken wie für die Anfertigung der SOCME benötigt. Auch der Umgang mit solchen Werkzeugen im naturwissenschaftlichen Unterricht müsste stärker gefördert werden. Das Ziel einer mehrdimensionalen Betrachtung konnte jedoch mit den Schülerinnen und Schülern erreicht werden. Dies zeigte sich recht deutlich in der abschließenden Plenumsphase, in der herausgearbeitet wurde, dass es nicht einen richtigen Weg oder die eine richtige Technologie als Ausweg aus der Klimakrise gibt, sondern dass unterschiedliche Faktoren ineinandergreifen und berücksichtigt werden müssen. Deutlich wird dies auch durch die formulierten Twitter-Posts der Schülerinnen und Schüler, in denen sie nicht nur persönliche Botschaften verfassten, wie sie selbst zur Lösung des Problems beitragen könnten, sondern auch in den Appellen, die an Politik und/oder Gesellschaft gerichtet wurden, welche Maßnahmen ergriffen

⁶¹⁵ Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 469-470.

oder welche Schritte in Zukunft gegangen werden müssen.⁶¹⁶ Sie zeigen, dass die Lernenden sensibilisiert wurden, dass mehrere Perspektiven berücksichtigt und verschiedene Akteure miteinbezogen werden müssen, um Probleme lösen zu können.

6.8.4.5.2. Ergebnisse der Durchführung des Versuchsblocks Photoreformierung mit Schülerinnen und Schülern

Der Versuchsblock Photoreformierung wurde von vier Schülern durchgeführt. Die Schüler wurden während der Laborphase beim Umgang mit dem Experiment und dem digitalen Lernbegleiter beobachtet. Anmerkungen und Fragen der Schüler an den Betreuenden wurden notiert. Beabsichtigt war, auch den digitalen Lernbegleiter, den die Schüler bearbeiten sollten, mit dem Erwartungshorizont zu vergleichen. Jedoch konnten die Ergebnisse nicht rechtzeitig gesichert werden, um sie für eine Beurteilung berücksichtigen zu können, wie Schülerinnen und Schüler mit dem begleitenden Material umgehen.

Bei der Arbeit mit den Geräten und Materialien für den Versuch zeigte sich, dass die Schüler ohne größere Probleme mit den Anleitungen zur Durchführung den Versuch Schritt für Schritt aufbauen konnten. Der Aufbau erfolgte innerhalb von 20 Minuten. Auch bei dieser Erprobung konnte beobachtet werden, dass das Reagenzglas nicht vollständig bis zum unteren Rand des aufgesetzten Stopfens aufgefüllt wurde. Durch einen kurzen Hinweis des Betreuers wurde aber dieses Problem beseitigt. Nach 30 Minuten konnten 9 mL Gas aufgefangen werden, mit denen die Schüler die Knallgasprobe durchführten konnten. Die Entnahme des Sauerstoffgases aus dem Infusionsbeutel über das am Dreiwegehahn angeschlossene Septum erfolgte auf Nachfrage der Schüler. Die zuvor durchgeführte Berechnung der benötigten Menge an Sauerstoffgas und das anschließende Aufziehen in die Spritze mit der Gasprobe erfolgte ohne Hilfestellung. Die Bestrahlung der Suspension wurde auch nach der ersten durchgeführten Knallgasprobe von den Schülern fortgesetzt, sodass diese noch ein weiteres Mal nach 25 Minuten durchgeführt wurde. Bei diesem Durchgang experimentierten die Schüler selbstständig ohne Hilfestellung des Betreuenden.

Während der Bestrahlung bearbeiteten die Schüler die Aufgaben und Materialien im digitalen Lernbegleiter. Insgesamt benötigten die Schüler 85 Minuten, bis sie die Aufgabe zur Erstellung der SOCME erreicht hatten. Darin enthalten waren auch die beiden etwa sieben Minuten zur Durchführung der Knallgasproben. Während dieser Phase stellten die Schüler an den Betreuenden drei Fragen, die inhaltlich das Material betrafen. Unklarheit bestand bei den Schülern zu dem auszufüllenden Diagramm bei der fachlichen Auswertung der Photoreformierung. Die vorgegebenen Lücken zu den Formeln konnten überwiegend nicht beschriftet werden. Nur die Lücke für Wasser (H_2O) konnte eigenständig gefüllt werden. Mithilfe von Nachfragen und Anmerkungen des Betreuenden konnten die Schüler auch die Lücken, in die die Protonen (H^+) und Ethanol (CH_3CH_2OH) eingefügt werden müssen, ausfüllen. Im Gespräch mit den Schülern erschien es als problematisch, die Informationen aus dem Informationstext entnehmen und auf das Diagramm zu übertragen. Die weiteren Rückfragen betrafen zum einen das Diagramm zu den Treibhausgas-Emissionen verschiedener Antriebsformen. Hier ergaben sich Unklarheiten darüber, was das Diagramm

⁶¹⁶ Kiesling et al., Wege aus der Klimakrise, S. 469-470.

aussagt und wofür die einzelnen Balken innerhalb des Diagramms stehen. Zum anderen wurde gefragt, was mit Wirkungsgraden bei Antrieben gemeint ist. Die weitere Bearbeitung des digitalen Lernbegleiters wirkte aus der beobachteten Perspektive heraus so, als würden die Informationstexte eher überflogen. Rückfragen zu den Diagrammen, die beim Material zur sozialen Dimension eingebettet waren, wurden nicht gestellt. Die zur Bearbeitung freigelassenen Räume im digitalen Lernbegleiter wurden stichpunktartig ausgefüllt. Jede Aufgabe wurde bearbeitet. Schwierigkeiten bestanden noch bei der Findung verschiedener, zentraler Begrifflichkeiten, die den unterschiedlichen Dimensionen zugeordnet werden sollten. Hier wussten die Schüler zunächst keine weiteren Begriffe einzutragen. Auf den Hinweis des Betreuenden hin, dass dort individuelle Begrifflichkeiten, die sie persönlich als wichtig für das Thema Photoreformierung empfinden wurden, konnte eine Diskussion darüber gestartet werden. Schließlich füllten auch die Schüler in diese Felder Begriffe ein. Insgesamt lässt sich nach der Erprobung in der Schülerlabor-Einheit ein positives Fazit zum Umgang der Schüler mit dem Experiment und den Materialien ziehen. Der Versuch konnte von den Schülern eigenständig aufgebaut und durchgeführt werden, ohne dass größere Hilfestellungen benötigt worden wären. Zwar lassen sich die Ergebnisse im Falle dieser einzelnen Erprobung nicht generalisieren, jedoch zeigen die Beobachtungen Übereinstimmungen zu den Einschätzungen des Schwierigkeitsgrades, der durch Lehrkräfte und Studierende im Rahmen vorheriger Befragungen zum Experiment gemacht wurden. Auf das praktische Arbeiten bezogen kann das Experiment für Schülerinnen und Schüler einer 11. Jahrgangsstufe als geeignet angesehen werden. Bestätigt wurde auch, dass die fachlichen Hintergründe zur Photoreformierung eine größere Herausforderung an die Lernenden stellen und mehr Unterstützung durch die betreuende Person erfolgen muss. Einschränkend muss hierzu auch erwähnt werden, dass vor der Durchführung nicht das individuelle Leistungsniveau der Schüler erfasst werden konnte. Auf welches Vorwissen die Schüler zurückgreifen konnten, ist unbekannt. Das muss ebenfalls für die Deutung des Umgangs der Schüler mit dem restlichen Begleitmaterial gelten. Hierbei zeigten sich kleinere Schwierigkeiten, deren Ursachen nicht vollständig zu identifizieren sind. Trotzdem war es den Schülern möglich, mit individuellen Hilfestellungen durch den Betreuenden die Aufgaben zu bearbeiten und den Versuchsblock abzuschließen. Dass die Schüler inhaltlich verschiedene Aspekte der Photoreformierung, des Einsatzes von Wasserstoff im Verkehrssektor und der Bedeutung von Wasserstoff als zukünftigem Energieträger berücksichtigt haben, zeigte sich bei der Erstellung der SOCMEs und den Diskussionen in den Kleingruppen. Jeder der Schüler, die am Versuchsblock Photoreformierung teilgenommen hatten, konnte fachlich korrekte Inhalte beisteuern, aus denen unterschiedliche Perspektiven auf das Thema und die verschiedenen Dimensionen hervorgingen. Nachteile und Vorteile beim Einsatz von Wasserstoff wurden bei der Bewertung miteinbezogen. Zwar war die Erstellung der SOCME, wie bereits zuvor erwähnt, für alle Lernenden problematisch, aber inhaltlich konnten verschiedene Aspekte in der Diskussion wiedergegeben werden. Hierdurch konnte schlussendlich eine Bewertung durch die Schülerinnen und Schüler erfolgen, welche Lösungswege in welchen Bereichen als sinnvoll erscheinen können und dass es nicht einen Lösungsweg gibt, sondern das Zusammenspiel vieler zielführend ist.

6.8.5. Lehrkräftefortbildung „Wege aus der Klimakrise“ 25.10.2023

Ergänzend zur Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ wurde das Angebot im Oktober 2023 im Rahmen einer Lehrkräftefortbildung ebenfalls evaluiert. Die Inhalte waren dabei deckungsgleich zu denen der zuvor durchgeführten Erprobung mit Schülerinnen und Schülern. Bedingt durch das Format einer Fortbildung wurde der zeitliche Ablauf angepasst. Der Fokus lag auf der Erprobung der Experimente und der Bearbeitung der Lernbegleiter sowie auf der Erstellung der SOCMEs.

Die Lehrkräftefortbildung „*Wege aus der Klimakrise - Entwicklung einer Laboreinheit zur Förderung von BNE*“ umfasste ein dreistündiges Format, das sich an der Struktur vorheriger Lehrkräftefortbildungen orientierte. Den Start bildete ein 30-minütiger einführender Vortrag, in dem die Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ kurz vorgestellt wurde. Neben den inhaltlichen Ankerpunkten der Grenzen des Wachstums wurde ein kurzer Einblick in die bildungspolitischen Programme zu BNE und Möglichkeiten der Umsetzung von BNE im Chemieunterricht präsentiert. In diesem Zusammenhang wurden auch Anknüpfungspunkte der Schülerlabor-Einheit an den Kernlehrplan Chemie NRW Sek. II, die Ziele nachhaltiger Entwicklung und die Leitlinie BNE NRW dargestellt. In der anschließenden 100-minütigen Laborphase wurden die einzelnen Versuchsblöcke von den Lehrkräften erprobt, indem die Experimente durchgeführt und der digitale Lernbegleiter erarbeitet wurde. Geschlossen wurde die Lehrkräftefortbildung mit der Vorstellung der in den SOCMEs erarbeiteten Ergebnissen und einer Diskussion über Potentiale der Schülerlabor-Einheit sowie Kritikpunkten an dem Konzept. Die letzte Phase umfasste 50 Minuten. Für den Versuchsblock zur Photoreformierung wurde an die dort arbeitenden Lehrkräfte zudem ein Fragebogen ausgegeben, als Rückmeldung zum Versuchsblock intendiert war (*siehe digitaler Anhang*). Der Versuchsblock zur Photoreformierung ist von den Inhalten identisch mit dem der Schülerlabor-Einheit (*siehe Kap. 6.8.4.3.*). Ziel dieser Erprobung innerhalb der Schülerlabor-Einheit war es, Rückmeldungen zu dem Experiment sowie den in digitalen Lernbegleiter hinterlegten Materialien und Aufgaben zur ökologischen, ökonomischen und sozialen Perspektive des Einsatzes von Wasserstoff einzuholen. Die Einschätzung der Lehrkräfte zum Schwierigkeitsgrad des Experiments und der Materialien sollte Rückschlüsse liefern, inwieweit das Thema Photoreformierung und die unterschiedlichen Dimensionen auf das Thema Wasserstoff im schulischen Kontext als geeignet für Kurse der Oberstufe empfunden wird. Zudem sollten auch in persönlichen Gesprächen Eindrücke der Lehrkräfte zum Experiment gesammelt werden.

Die Lehrkräftefortbildung wurde von insgesamt 18 Teilnehmenden besucht, von denen fünf Personen, die das Experiment zur Photoreformierung von Ethanol bearbeiteten, mithilfe des Fragebogens zur Fortbildung und dem Versuch sowie der begleitenden Materialien befragt wurden. Die durchschnittliche Lehrerfahrung lag bei anderthalb Jahren, was dadurch bedingt war, dass vier der fünf Teilnehmenden seit einem halben Jahr Lehrkräfte im Vorbereitungsdienst an Gymnasien waren. Die Leitlinie BNE NRW war der Mehrheit (4/5) bekannt. Unterrichtsinhalte mit einem BNE-Bezug im Chemieunterricht einzubinden, wurde von zwei Lehrkräften bestätigt. Als Themen mit BNE-Bezug, die im eigenen Fachunterricht schon umgesetzt werden, wurden nachhaltige Ernährung, erneuerbare Energien bzw. Treibstoffe sowie Recycling von Metallen, Akkus und neue Materialien für Akkus benannt.

Fragen zum persönlichen Resultat der Lehrkräftefortbildung	Bewertung
Wie bewerten Sie die heutige Fortbildung im Allgemeinen (Struktur, didaktische Materialien, Methoden, praktische Anwendungen usw.)	3,4/4 (n = 5) 1 = sehr schlecht 4 = sehr gut
Hatten Sie Schwierigkeiten, den Inhalten der Lehrerfortbildung zu folgen?	2,8/4 (n = 5) 1 = große Schwierigkeiten 4 = keine Schwierigkeiten
Inwieweit halten Sie die Schülerlabor-Einheit „Wege aus der Klimakrise“ als geeignet, um BNE in Ihren Chemieunterricht einzubinden?	2/4 (n = 5) 1 = sehr schlecht geeignet 4 = sehr gut geeignet

Tab. 17: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats der Lehrkräftefortbildung

Auch bei dieser Erprobung handelt es sich um eine mit fünf Teilnehmenden erneut sehr kleine Kohorte. Da es sich um sehr subjektive Wahrnehmungen handelt, dienen die Ergebnisse ergänzend zu denen vorheriger Erprobungen zur Schaffung einer genaueren Einschätzung, wie das Thema Photoreformierung im schulischen Kontext von Lehrkräften wahrgenommen wird und ob es als sinnvolle Ergänzung zu Inhalten des Kernlehrplans angesehen werden kann. Das Gesamtresümee der befragten Lehrkräfte lässt sich als gemischt beschreiben (*siehe Tab. 17*). Die Fortbildung selbst wurde mehrheitlich als gut bis sehr gut wahrgenommen und den Inhalten konnten die meisten ohne größere Schwierigkeiten folgen. Im Schnitt weniger geeignet sehen die Lehrkräfte die Schülerlabor-Einheit, um BNE in den eigenen Chemieunterricht einzubinden. Die Ergebnisse zu diesen Fragen lassen sich nur spekulativ deuten. Unter Umständen zeigt sich an dieser Stelle das Problem, dass die Erstellung der SOCME auch bei den Lehrkräften größere Schwierigkeiten mit sich brachte, wodurch die Einschätzung beeinflusst werden kann, dass die Schülerlabor-Einheit als nicht so geeignet empfunden wird, BNE in den Chemieunterricht einzubinden. Eventuell zeigen sich hierbei auch Parallelen zu der Erprobung mit den Schülerinnen und Schülern, bei denen ähnliche Schwierigkeiten zu sehen waren, die einerseits darauf zurückgeführt werden können, dass es sich bei der SOCME um ein unbekanntes und nicht eingeübtes Werkzeug handelt und andererseits zusätzlich neue Themen mit neuen Methoden verbunden wurden.

Wie bewerten Sie den Aufbau des Experiments?	Bewertung 1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Aufbau	3,3/4 (n = 4)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit der Experimentieranleitung und der Aufgaben zur Auswertung des Versuchs	Bewertung 1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Versuchsdurchführung	3/4 (n = 5)
Beobachtung	4/4 (n = 5)
Auswertung Photoreformierung	2,2/4 (n = 5)
Auswertung und Versuch Knallgasprobe	3,6/4 (n = 5)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit dem Material?	Bewertung 1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Auswertung Farben des Wasserstoffs	3,8/4 (n = 5)
Aufgabe und Material Wasserstoff und Mobilität	3,8/4 (n = 5)
Aufgabe und Material Wasserstoff in Verkehr und Industrie	2,4/4 (n = 5)
Aufgabe und Material Brennstoffzellen- und E-Autos - eine sozial gerechte Verkehrswende?	1,5/4 (n = 2)

Tab. 18: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Im Anschluss an die persönliche Bilanz der Lehrkräfte zur Fortbildung wurden sie um Einschätzungen zum Experiment und dem begleitenden Material gebeten. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 18* dargestellt. Ob das Thema Photoreformierung in den aktuellen Kernlehrplan Chemie Sek. II des Landes NRW passt, stimmten die meisten Lehrkräfte zu (3,3/4). Als Einsatzmöglichkeiten waren „über einen Ausflug ins Schülerlabor“ (vier Nennungen) und „im regulären Chemieunterricht“ (3 Nennungen) am häufigsten vertreten. Von den Lehrkräften als problematisch bei der Umsetzung im eigenen Unterricht wurden in drei Fällen fehlende Materialien (hierbei auch der Katalysator) oder mangelnde Ausstattung benannt und jeweils einmal, dass die Anforderung an Schülerinnen und Schüler zu schwer wären, dass ausreichend Unterrichtszeit fehle und das Thema eher am Rande des Kernlehrplans liege. Als Lösungsansätze waren u.a. finanzielle Unterstützung, die Beschaffung von Materialien, mehr Unterrichtszeit und kleinere Schülergruppen angeführt worden.

Der Schwierigkeitsgrad des Experiments für Lernende wurde sowohl beim Aufbau, als auch bei der Durchführung und der Beobachtung als eher einfach, als schwieriger wurde der Umgang mit dem begleitenden Material eingeschätzt. Die fachliche Auswertung, das Material und die Aufgaben zur ökonomischen und sozialen Perspektive wurden als eher schwierig bezeichnet, die Aufgaben zur Knallgasprobe, den „Farben des Wasserstoffs“ sowie der ökologischen Perspektive auf den Einsatz von Wasserstoff als eher einfach bis sehr einfach. Anmerkungen zum Experiment wurden in zwei Fällen auf dem Fragebogen ergänzt. In beiden Fällen wurde die Menge an Aufgaben bzw. die Textaufgaben als demotivierend beschrieben. In Gesprächen konnte zudem ermittelt werden, dass zwei der Lehrkräfte die Einschätzung des höheren Schwierigkeitsgrades mit der Textdichte des Materials begründeten. Die Frage, ob das Experiment im Unterricht eingesetzt würde, beantworteten

vier Teilnehmende mit ja, eine Person verneinte sie. Als Begründung wurde benannt, dass das Experiment zu ereignislos wäre. Bemerkungen zum begleitenden Material wurde in drei Fällen ergänzt. Rückgemeldet wurde, dass die Aufgaben Schülerinnen und Schüler demotivieren können und vom Hauptaspekt ablenken würden und dass einiges bei den Aufgaben eher in den Deutschunterricht gehören würde. Angefragt wurden zudem Differenzierungsmöglichkeiten für schwächere Lernende. Insgesamt würden von den Lehrkräften vier das Material in ihrem Unterricht einsetzen. Als Ergänzungen zu dieser Frage nannten zwei Lehrkräfte, dass sie das Material bei einem Einsatz reduzieren würden, und Unterstützungsmaterial einbinden würden, bzw. dass sie nur einzelne Elemente aus Texten oder Grafiken entnehmen würden. Eine Person verneinte den Einsatz ohne weitere Angaben.

Die Ergebnisse zeigen unter der Berücksichtigung der geringen Anzahl an Teilnehmenden, dass diese den Versuch überwiegend positiv und geeignet für Schüler/innengruppen halten und auch das Thema Photoreformierung als passend für die Oberstufe empfinden. Als problematisch wurde erneut die Bereitstellung der Materialien beschrieben. Vermutlich ist hierin auch der Grund zu suchen, warum die Bereitschaft gering ist, das Experiment trotz der positiven Einschätzung seiner Gebräuchlichkeit für den Chemieunterricht in den eigenen Chemieunterricht einzubinden. Die Einbindung des Themas Photoreformierung wurde jedoch von fast allen Teilnehmenden in Rahmen eines Besuchs im Schülerlabor bestätigt. Damit scheint dieses Format eine gute Alternative für Lehrkräfte zu bieten, bei mangelnder Ausstattung aktuell relevante Themen in das Fach Chemie zu integrieren.

Aufgaben zur Auswertung des Experiments sowie das Material zur ökonomischen Perspektive des Einsatzes von Wasserstoff in Verkehr und Industrie wurden als schwieriger für die eigenen Lernenden angesehen. Am schwierigsten wurden die Aufgaben zur sozialen Perspektive auf die Verkehrswende eingeschätzt, wobei hier nur zwei Teilnehmende eine Einschätzung vornahmen. Sehr positiv hervorzuheben ist die Bereitschaft der Lehrkräfte, das Material in ihren eigenen Unterrichts einzusetzen, auch wenn zum Teil angegeben wurde, dass Reduzierungen vorgenommen oder nur einzelne Teil herausgegriffen würden. Dies war bei der Konzeption des Materials beabsichtigt worden, dass die Lehrkräfte es als Angebot wahrnehmen, aus dem sie selbst in Abhängigkeit der entsprechenden Lerngruppen auswählen können, welche Teile sie für besonders relevant halten. Anders als bei anderen Erprobungen mit Lehrkräften wurde dieses Mal von verschiedenen Teilnehmenden benannt, dass der Umfang an Aufgaben hoch und diese sehr textlastig sind. Ein genauer Zusammenhang lässt sich nicht eindeutig erkennen, jedoch bedingt sich die Auswahl verschiedener Texte mit dem Schwerpunkt BNE, der für das Material und die Betrachtung des Themen Photoreformierung und Wasserstoff gewählt wurde. Möglicherweise zeigt sich hierbei, dass stärker auf diese Perspektiven nachhaltiger Entwicklung hingewiesen werden muss, da sie noch nicht in der alltäglichen Unterrichtspraxis angekommen ist. Die Anfrage möglicher Differenzierungen beim Material ist in diesem Zusammenhang auch eine wertvolle Anmerkung, da bei der Erstellung die Differenzierung nicht im Vordergrund stand. Sicherlich ist dieser Punkte einer, der perspektivisch auch für das Material zur Photoreformierung umgesetzt werden sollte. Jedoch müssten solche Erprobungen eine größere Anzahl an Teilnehmenden aus dem Bereich der Schülerinnen und Schüler erfordern, damit Forschungsergebnisse hierzu generiert werden können. Das war im Rahmen dieser Arbeit leider nicht realisierbar.

6.8.6. Lehrkräftefortbildung 13.12.2023

Die zuletzt durchgeführte Erprobung wurde ebenfalls im Rahmen einer Lehrkräftefortbildung an der Bergischen Universität Wuppertal realisiert. Adressiert wurden interessierte Lehrkräfte, die über den Newsletter der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal abonniert hatten und über die Angebote informiert werden. Beabsichtigt wurde, mit den Lehrkräften das Thema Photoreformierung experimentell und inhaltlich zu erschließen und Rückmeldungen zum Experiment und den Materialien einzuholen. Geöffnet wurde dieses Format auch für Lehramtsstudierende des Fachs Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal. Die Struktur und der Aufbau der Lehrkräftefortbildung „Photoreformierung von Biomasse - Wasserstoff aus Alkohol, Zucker und Stärke“ orientierte sich an der aller vorherigen Lehrkräftefortbildungen und war identisch zu der vom 16.11.2023 (siehe Kap. 6.8.3.). Auch bei dieser Erprobung wurden verschiedene Stationen angeboten, an denen die Teilnehmenden die Photoreformierung experimentell erschließen konnten (Station 1: Photoreformierung von Ethanol, Station 2: Photoreformierung von Ethanol bei erhöhten Temperaturen, Station 3: Photoreformierung von Glucose, Station 4: Photoreformierung eines glucosehaltigen Lebensmittels). Das Material umfasste alle in Kapitel 6.7.1. dargestellten Materialien. Bei der Lehrkräftefortbildung waren sechs Teilnehmende anwesend, eine Lehrkraft und fünf Studierende des Fachs Chemie für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen. Eine durchschnittliche Lehrerfahrung kann nicht ohne weiteres angegeben werden. Die Leitlinie BNE NRW war allen Teilnehmenden bekannt. Unterrichtsinhalte mit einem BNE-Bezug im Chemieunterricht wurde von einer Lehrkraft im Bereich Luftzusammensetzung, Brennstoffzelle und Antriebsarten für die siebte Jahrgangsstufe angegeben.

Fragen zum persönlichen Resultat der Lehrkräftefortbildung	Bewertung
Wie bewerten Sie die heutige Fortbildung im Allgemeinen (Struktur, didaktische Materialien, Methoden, praktische Anwendungen usw.)	3,8/4 (n = 6) 1 = sehr schlecht 4 = sehr gut
Hatten Sie Schwierigkeiten, den Inhalten der Lehrerfortbildung zu folgen?	3,6/4 (n = 6) 1 = große Schwierigkeiten 4 = keine Schwierigkeiten
Inwieweit fühlen Sie sich vorbereitet, BNE-Themen (auch mithilfe des Verlaufsplans) in Ihrem Unterricht behandeln zu können?	3,2/4 (n = 6) 1 = sehr schlecht vorbereitet 4 = sehr gut vorbereitet

Tab. 19: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats der Lehrkräftefortbildung

Bei dieser letzten Erprobung konnten sechs Teilnehmende um Rückmeldung gebeten werden. Sie sind ergänzend zu den Ergebnissen der vorherigen Lehrkräftefortbildungen zu sehen, wobei einschränkend gesagt werden muss, dass die eigentlich intendierte Zielgruppe nicht erreicht werden konnte, da nur eine reguläre Lehrkraft an dem Angebot teilnahm. Daher ist die Auswertung der Ergebnisse stärker auf die Sicht von Studierenden zu sehen. Das Fortbildungsangebot erhielt von den Teilnehmenden insgesamt positive Bewertungen (siehe Tab. 19). Die Frage nach Kenntnis über die landeseigenen Rahmenvorgaben wie die Leitlinie

BNE NRW wurde von allen Teilnehmenden bejaht. Anders als bei vorherigen Fortbildungen fühlten sich die Teilnehmer nach Abschluss besser vorbereitet, BNE-bezogene Themen in ihrem eigenen Unterricht umzusetzen. Bei der Deutung der Ergebnisse muss auch an dieser Stelle an die kleine Stichprobengröße verwiesen werden. Allerdings zeigen sich beim Vergleich der Daten, dass die Studierenden insgesamt positivere Bewertungen abgeben, inwieweit sie sich vorbereitet fühlen, BNE-bezogene Themen in den Chemieunterricht einzubinden. Dies und der Fakt, dass bei dieser Kohorte allen die Leitlinie BNE NRW bekannt war, zeigt, dass das Thema BNE bereits stärker in den universitären Bereich eingebunden ist und eine größere Bekanntheit besitzt. Dadurch könnte sich auch die größere Sicherheit beim Umgang mit Materialien und Experimenten, die einen BNE-Bezug in den Fokus setzten, ergeben.

Wie bewerten Sie den Aufbau des Experiments?	Bewertung 1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Aufbau	2,7/4 (n = 6)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit der Experimentieranleitung und der Aufgaben zur Auswertung des Versuchs	Bewertung 1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Versuchsdurchführung	3,5/4 (n = 6)
Beobachtung	3,8/4 (n = 6)
Auswertung Photoreformierung	3,6/4 (n = 6)
Versuch Knallgasprobe	2,7/4 (n = 6)
Zusatzmaterial Gaschromatografie	2,3/4 (n = 6)
Wie bewerten Sie den Schwierigkeitsgrad für Ihre Lernenden bei der Arbeit mit dem Material?	Bewertung 1 = sehr schwierig 4 = sehr einfach
Auswertung Farben des Wasserstoffs	3,2/4 (n = 6)
Aufgabe und Material Wasserstoff und Mobilität	3,2/4 (n = 6)
Aufgabe und Material Wirkungsgrade & CO ₂ -Bilanz verschiedener Antriebe (Wasserstoff in Verkehr und Industrie)	2,7/4 (n = 6)
Aufgabe und Material Brennstoffzellen- und E-Autos - eine sozial gerechte Verkehrswende?	3/4 (n = 6)
Zusatzaufgabe: Grüner Stahl	2,8/4 (n = 5)

Tab. 20: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Die Bilanz der Ergebnisse zum Experiment „Photoreformierung von Ethanol“ und der Abwandlungen beim Versuchsaufbau (Änderung der Temperatur, Glucose und Reissirup als Substrate) kann wegen der sehr kleinen Stichprobe nur vorsichtig gedeutet werden. Überwiegende Zustimmung zeigte sich bei der Frage, ob das Thema Photoreformierung in den aktuellen Kernlehrplan Chemie Sek. II des Landes NRW passt (3,5/4). Als Einsatzmöglichkeiten in der Schule wurde am häufigsten „über einen Ausflug ins Schülerlabor“ (6/6), „im Fächerübergreifenden Unterricht“ (4/6), „bei Facharbeiten“ (4/6), „an Projekttagen“ (4/6) und „in Arbeitsgemeinschaften“ (4/6) benannt. Als Probleme bei der

Umsetzung des Experiments wurden verschiedenen Aspekte aufgeführt, zu denen bei der Zusammenfassung der Nennungen ein hoher zeitlicher Aufwand (3/6) sowie eine Überforderung der Lernenden durch das Experiment bzw. das angebotene Material (4/6) angeführt. Als mögliche Lösungen waren zur Verkürzung des Versuchs die Variante mit der Erhöhung der Temperatur angegeben worden. Daneben waren auch weitere Reduktionen der Inhalte und die „Erarbeitung der Inhalte im Rahmen eines größeren Projekts“ benannt worden. Insgesamt wurde der Versuch von der Mehrheit der Teilnehmenden vom Aufbau, der Durchführung und den Beobachtungen als eher einfach angesehen (*siehe Tab. 20*). Das Experiment würden vier Teilnehmende in den Chemieunterricht einbinden, zwei nicht.

Für den Schwierigkeitsgrad des Materials und der Aufgaben zur Auswertung des Versuchs ergibt sich, dass es für Schülerinnen und Schüler als schwieriger angesehen wird als das Experiment. Fünf Teilnehmende würden es im Unterricht einsetzen, eine Person machte keine Angaben. Bei Anmerkungen zum Material wurde sowohl auf die hohe Bearbeitungszeit durch die längeren Texte als auch in einem weiten Fall auf eine empfundene Unübersichtlichkeit bei den Materialien hingewiesen.

Auch an dieser Stelle zeigt sich in den Antworten der Teilnehmenden, dass diese subjektiv zu werten sind, wodurch die Deutung der Ergebnisse nur vorsichtig erfolgen kann. Diese letzte Erprobung, auch wenn sie nicht die eigentliche Zielgruppe erreichen konnte, spiegelt exemplarisch die Sicht von Studierenden auf das Experiment wider. Das Experiment wird als eher einfach oder sehr einfach beschreiben, die begleitenden Materialien mit BNE-Bezug dagegen als schwieriger für Lernenden. Trotzdem gibt der überwiegende Teil an, dass sie sowohl das Experiment als auch die begleitenden Materialien im Chemieunterricht einsetzen würden. Für diese Kohorte scheinen somit die Themen Photoreformierung und Wasserstoff aus der Perspektive der nachhaltigen Entwicklung für einen zukünftigen Chemieunterricht von Bedeutung und Interesse zu sein.

6.9. Fazit der Erprobungen

Die Erprobungen im Rahmen der Lehrkräftefortbildungen und mit den Studierenden sowie Schülerinnen und Schülern (*siehe Tab. 21*) ermöglichen eine vorsichtige Einschätzung darüber, inwieweit das Thema Photoreformierung, das dazugehörige Experiment und die begleitenden Materialien als geeignet für Lernprozesse im Kontext von Chemieunterricht angesehen werden kann. Insgesamt zeigt sich eine hohe Bereitschaft bei Lehrkräften, das Thema Photoreformierung in den Chemieunterricht einzubinden. Die empfundene Relevanz, die bereits in der Umfrage ermittelt werden konnte, zeigte sich auch bei den Erprobungen. Besonders aber die Schwerpunktsetzung zu BNE und das Angebot, das im durch das begleitende Material gemacht wird, wird von Lehrkräften und auch Studierenden als geeignet für die Auseinandersetzung mit Schülerinnen und Schülern angesehen. Das Betrachten unterschiedlicher Dimensionen auf ein Thema auch bezüglich ökonomischer und sozialer Blickwinkel wird überwiegend als für den Unterricht einsetzbar eingeschätzt. Damit lässt sich der Rückschluss ziehen, dass die entwickelten Materialien in gleicher Weise wie der Versuch zur Photoreformierung als ergänzendes Produkt zu den regulären Inhalten des Kernlehrplans Chemie angesehen werden können.

Format und Titel	Datum, Ort	Teilnehmendenzahl ¹		
		SuS	St	L
Station im Schülerlaborangebot „Photoreformierung – Wasserstoff aus Ethanol“, Girls‘Day	28.04.2022, Wuppertal	4	-	-
Workshop „BNE und Chemieunterricht - Von der Leitlinie BNE zur exemplarischen Unterrichtseinbindung“ zusammen mit E. Kiesling, MINT-Tag NRW	26.08.2022, Bottrop	-	-	8
Experimentalvortrag „Photoreformierung von Biomasse - Wasserstoff aus Alkohol, Zucker und Stärke“ zusammen mit C. Bohrmann-Linde, 38. Fortbildungs- und Vortragstagung der GDCh FG CU - „Chemie nachhaltig kommunizieren“	16.09.2022, Osnabrück	unbekannt		
Lehrkräftefortbildung „Photoreformierung - Wasserstoff aus Biomasse“ zusammen mit C. Bohrmann-Linde	16.10.2022, Wuppertal	-	-	6
Experimentalvortrag „Photoreformierung: grüner Wasserstoff aus Biomasse“ zusammen mit C. Bohrmann-Linde, 29. Lehrerkongress für Chemielehrerinnen und Chemielehrer der Sek. I/II	30.10.2022, Wuppertal	unbekannt		
Schülerlaborangebot „Wege aus der Klimakrise“ in Zusammenarbeit mit E. Kiesling, N. Pereira Vaz, R. Kremer	30.01.2023, Wuppertal	-	2	-
Schülerlaborangebot „Wege aus der Klimakrise“ in Zusammenarbeit mit E. Kiesling, N. Pereira Vaz, R. Kremer, Externer MINT-Tag d. Friedrich-Albert-Lange-Schule Solingen	13.02.2023, Wuppertal	4	-	-
Diskussionsvortrag „Wege aus der Klimakrise - Eine Schülerlaboreinheit zu BNE im Chemieunterricht“ zusammen mit E. Kiesling, GDCh WiFo - Rethinking Chemistry	05.09.2023, Leipzig	unbekannt		
Experimentalvortrag „Wege aus der Klimakrise - ein Schülerlaborangebot zur Förderung von BNE“ zusammen mit C. Bohrmann-Linde, Herbsttagung 2023 des MNU-Landesverbandes Westfalen	26.09.2023, Dortmund	-	-	12
Workshop „Die Reduzierung von CO ₂ -Emissionen - BNE-fördernde Lernangebote für den Chemieunterricht“ zusammen mit E. Kiesling, CDR Dialog 2023: Bildungskonferenz	11.10.2023, München	-	-	3
Lehrkräftefortbildung „Wege aus der Klimakrise - BNE als Leitidee für einen Experimentierparcours“ zusammen mit E. Kiesling, N. Pereira Vaz, R. Kremer, C. Bohrmann-Linde	25.10.2023, Wuppertal	-	-	5
Lehrkräftefortbildung „Photoreformierung - Wasserstoff aus Biomasse“ zusammen mit C. Bohrmann-Linde	13.12.2023, Wuppertal	-	5	1

Tab. 21: Überblick zu den Angeboten zum Thema Photoreformierung im Rahmen von Vorträgen, Workshops und Fortbildungen. 1: Teilnehmendenzahlen wurden angegeben sofern bekannt. Abkürzungen: SuS: Schülerinnen und Schüler, St: Studierende, L: Lehrkräfte

Die Erprobungen mit den Lehrkräften haben zudem gezeigt, dass die Förderung der Kompetenzentwicklung von Lehrenden, wie sie in BNE 2030 als zentrales Handlungsfeld identifiziert wird, auch mit den Weiterbildungsangeboten in Form der Lehrkräftefortbildungen gefördert werden können. Zwar war die Zustimmung der Lehrkräfte, dass sie nach den Fortbildungsangeboten sich eher nicht vorbereitet fühlten, BNE in ihren eigenen Chemieunterricht zu integrieren, jedoch zeigen hier Vergleiche zur Erhebung von BNE in Lehr- und Lernsettings, dass auch nach vielen Jahren, in denen BNE stärker präsent gemacht werden sollte, immer noch Unsicherheit bei Lehrkräften in dem Bereich zu finden sind. Damit kommt Weiterbildungsangeboten eine besondere Bedeutung zu BNE zu präsentieren, die damit verbundenen Kompetenzerwartungen und konkrete Beispiele zur Einbindung von BNE vorzustellen, um Lehrkräfte in ihrer Absicht zu unterstützen, BNE als einen zentralen Aspekt in Schule und Unterricht einzubinden.

7. Schlussbetrachtung

Der sich immer rascher vollziehende Wandel des ökologischen Systems Erde bedingt durch menschliches Handeln wird das 21. Jahrhundert maßgeblich prägen. Die Auswirkungen auf die Ökosysteme sind jedoch nur ein Aspekt des Klimawandels. In zunehmenden Maßen werden auch ökonomische Prozesse beeinflusst und gleichfalls soziale Gefüge beeinträchtigt. Die planetaren Belastungsgrenzen zeigen dabei anschaulich, welche Bereiche akut betroffen sind und einer zügigen Handlungsinitiative bedürfen. Der Klimawandel ist dabei nur ein Bereich, dessen sicherer Handlungsspielraum überschritten wurde. Die Notwendigkeit, den zu schnellen und extremen Änderungen des Klimas entgegenwirken zu müssen, steht außer Frage. Es ist daher eine der dringlichsten Aufgaben, Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Das Problem, das hinter dieser Aufgabe steht, kann jedoch nicht bloß durch das Beschreiten eines einzelnen Lösungswegs gelöst werden. Da die Auswirkungen des Klimawandels sowohl auf ökologische, ökonomische als auch soziale Subsysteme wirken, müssen Lösungsansätze diese unterschiedlichen Dimensionen sowie ihre Abhängigkeiten untereinander ebenfalls berücksichtigen. Nur verschiedene, parallel beschrittene Lösungswege können in einer globalisierten Welt dazu führen, dass sie ineinandergreifen, um das Problem zu bewältigen.

Heutzutage lässt sich eine Vielzahl an möglichen Lösungswegen benennen, die durch Forschungen zu den Ursachen des Klimawandels, die Folgen für die Menschheit und die Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft verdeutlichen. Auch die Ansätze zur Reduzierung der den Klimawandel beschleunigenden Treibhausgase sind Gebiete, die in der Forschungslandschaft intensiv untersucht werden. Einer dieser möglichen, als zukunftsweisend bezeichneten Wege sind die verstärkten Forschungen zum breiten Einsatz von Wasserstoff als zukünftigem Energieträger. Anders als Strom, gewonnen aus erneuerbaren Energien besitzt Wasserstoff als chemischer Energieträger den Vorteil, ohne größere Probleme gespeichert werden zu können. Seine Einsatzmöglichkeiten sind vielfältig und können zur Reduzierung von Kohlenstoffdioxid-Emissionen in Sektoren beitragen, in denen sie wie beim Verkehr und der Industrie durch die Verbrennung von fossilen Energieträgern heutzutage noch in hohem Maße anfallen. Allerdings muss auch hierbei genau auf die Einsatzgebiete geblickt werden. Eine alleinige Umstellung auf brennstoffzellenbasierte Antriebsformen ergibt keinen Sinn. Vielmehr müssen differenziert Vor- und Nachteile abgewogen werden, in welchen Bereichen Elektroantriebe oder Brennstoffzellenfahrzeuge sinnvoller erscheinen. Dabei müssen auch Zielkonflikte ausgehalten werden, dass es nicht nur den einen perfekten Lösungsweg gibt.

Genauso wie bei den Chancen, die sich durch den Einsatz von Wasserstoff ergeben, muss für eine umfassende Bewertung des Nutzens dieses Energieträgers auch auf die Herstellungswege geblickt werden. Zwar ist es zutreffend, dass bei der Verbrennung von Wasserstoff keine Kohlenstoffdioxid-Emissionen anfallen, jedoch fallen unter Umständen erhebliche Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei der Herstellung von Wasserstoff an. Wie bereits dargestellt wurde, wird immer noch der überwiegende Teil des Wasserstoffs über die Dampfreformierung von Methan gewonnen, bei der hohe Emissionen an Kohlenstoffdioxid frei werden. Dieser auch als „grauer“ Wasserstoff bezeichnete Typ steht im deutlichen Gegensatz zu dem Ziel, Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Wasserstoff in

Verkehr und Industrie zu reduzieren. Andere Wege der Herstellung von Wasserstoff, die mit Farben verknüpft wurden, zeigen in diesem Punkt deutlich geringere Emissionswerte. Sowohl „blauer“ als auch „türkiser“ Wasserstoff können hierzu gezählt werden. Allerdings besitzen beide als Grundlage immer noch fossile Energieträger. Nur Wasserstoff, der über die Elektrolyse von Wasser mit Strom aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, präsentiert sich als geeignete Alternative, die Produktion von Wasserstoff CO₂-neutral zu gestalten.

In dieser Arbeit konnte mit der Photoreformierung ein weiterer potenzieller Herstellungsweg für Wasserstoff vorgestellt werden. Er ermöglicht mithilfe von Lichtenergie die unterschiedlichsten Ausgangsstoffe primär in Wasserstoff umzuwandeln. Allen voran die Photoreformierung von Biomasse eröffnete eine Perspektive, Pflanzenstoffe oder als Abfälle anfallende Stoffe zur Produktion von Wasserstoff zu nutzen. Die Gewinnung des Wasserstoffs mittels Photoreformierung ist auch dahingehend von Vorteil, dass bei Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien für Lichtquellen oder des Sonnenlichts selbst keine zusätzlichen Kohlenstoffdioxid-Emissionen bei der Herstellung anfallen. Der so produzierte Wasserstoff ist somit CO₂-neutral und lässt sich dem „grünen“ Wasserstoff zuordnen.

Das konzipierte Experiment zur Photoreformierung erfüllt besonders in dem weiterentwickelten kleineren Aufbau zentrale Bedingungen, die an ein Experiment für den naturwissenschaftlichen Unterricht gestellt werden. Vor allem die Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sind entscheidend. Die Bildungsraten an Wasserstoff bei der Photoreformierung von Ethanol ermöglichen auch in 45-minütigen Schulstunden Gasmengen zu erhalten, mit denen Untersuchungen der gewonnenen Gasproben bzw. Folgeexperimente ohne Probleme durchgeführt werden können. Die eingesetzten Materialien und Chemikalien sind mit Ausnahme des Photokatalysators als schulgängig zu betrachten. Der Photokatalysator selbst wäre potentiell auch nicht mit hohen Kosten verbunden. Hier lässt sich darauf hoffen, dass in Zukunft auch Bezugsquellen dieses Photokatalysators für Schulen leicht zu erreichen sind. Es konnte zudem gezeigt werden, dass in dem gewählten Aufbau verschiedene Substrate zu Wasserstoff umzusetzen sind. Die Varianz einsetzbarer Stoffe für die Photoreformierung bietet die Möglichkeit, im Chemieunterricht unterschiedliche Fragestellungen auch im Rahmen forschend-entwickelnder Unterrichtsverfahren zu bearbeiten.

Nicht nur der entwickelte Versuch, sondern auch das Begleitmaterial wurde mit der Maßgabe konzipiert, konkrete Bezüge zu BNE zu ermöglichen. Die in dieser Arbeit dargestellten, verschiedenen Perspektiven auf die Wasserstoffproduktion sowie die unterschiedlichen Dimensionen, die berücksichtigt werden müssen, um eine Bewertung des Energieträgers Wasserstoff vornehmen zu können und daraus Handlungsoptionen abzuleiten, gehören zum Kernanliegen einer BNE. Zur stärkeren Fokussierung auf einen bestimmten Aspekt der Nutzung von Wasserstoff wurde exemplarisch der Einsatz von Wasserstoff im Mobilitätssektor als Schwerpunkt gewählt, der einen Lebensweltbezug für Schülerinnen und Schüler ermöglicht. Ihnen soll mit dem Material ein umfassender Einblick die Einsatzmöglichkeiten von Wasserstoff, seinen Vor- und Nachteilen in bestimmten Bereichen gegeben werden. Dadurch sollen die Schülerinnen und Schüler für die Betrachtung von Themen aus der Perspektive einer nachhaltigen Entwicklung sensibilisiert werden, um so BNE stärker sichtbar zu machen. Nur so können zukünftige Generationen nachhaltiges Handeln als zentralen Faktor für eine nachhaltige Entwicklung identifizieren.

Die Evaluation während verschiedener Erprobungen mit Schülerinnen und Schülern, Studierenden, und Lehrkräften konnte trotz der kleinen Stichproben verschiedene Erkenntnisse liefern. Das Experiment wie auch die Materialien wurden im Überwiegenden als wertvoller Beitrag für den Chemieunterricht erachtet. Vor allem die Betrachtung der Themen Wasserstoff und Photoreformierung aus unterschiedlichen Dimensionen wurde sowohl von Studierenden wie auch Lehrkräften als geeignet für schulische Kontexte gesehen. Die Bedeutung der BNE für den Chemieunterricht konnte im Rahmen verschiedener Vorträge, Workshops und Lehrkräftefortbildungen im Zusammenhang mit der Vorstellung der konzipierten Verlaufspläne sowie der Materialien zum Thema Photoreformierung hervorgehoben werden. Die Rückmeldungen zu diesen Angeboten fielen insgesamt positiv aus.

Im Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen im Bereich der Photoreformierung bietet das Thema Wasserstoff einen vielversprechenden Ansatz, mit Schülerinnen und Schülern im naturwissenschaftlichen Unterricht ein aktuelles wie auch zukunftsweisendes Forschungsfeld zu besprechen. Die stete Erforschung neuer Materialien für Photokatalysatoren bietet zudem die Möglichkeit, das in dieser Arbeit vorgestellte Experiment eventuell zu optimieren, indem neue Photokatalysatoren, sofern sie für den Chemieunterricht im Umgang mit Lernenden sicher durchführbar sind, eingesetzt werden. Hierbei sind sicherlich die Photokatalysatoren auf Basis von Kohlenstoffnitrid ein möglicher Weg. Es ist ersichtlich, dass das Thema Photoreformierung für den schulischen Kontext noch nicht zu Ende beforscht ist. Das Potential desselbigen ist jedoch sehr groß.

Es ist die Aufgabe unserer und zukünftiger Generationen, nachhaltige Entwicklung zum zentralen Gegenstand ökologischer, ökonomischer, sozialer, kultureller und politischer Entscheidungen zu machen, damit rückblickend auf eine - wie im Anfangszitat beschriebene - „*damalige Zeit*“ gesagt werden kann, dass Entscheidungen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung getroffen wurden. Nur so können in der heutigen Zeit, in der die Möglichkeiten zur Umgestaltung im positiven Sinne eine nahezu unendliche und vielschichtige Anzahl an Lösungswegen für den zu schnellen Wandel des Klimas bietet, die negativen Folgen für kommende Generationen abgeschwächt werden. Das Wissen um das Handeln ist gegeben, die Bereitschaft es zu tun, muss folgen, damit in Zukunft nicht gesagt werden kann, dass wir zwar alles und alle Möglichkeiten hatten, sie aber nicht nutzten.

8. Verzeichnisse

8.1. Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery Electric Vehicle (dt.: Elektrofahrzeug)
BLK	Bund-Länder-Konferenz
BNE	Bildung für nachhaltige Entwicklung
CCS	Carbon Capture and Storage (dt.: CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CCUS	Carbon Capture Utilisation and Storage (dt.: CO ₂ -Abscheidung, Nutzung und -Speicherung)
CDR	Carbon Dioxide Removal
EU	Europäische Union
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (dt.: Brennstoffzellenfahrzeug)
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarotspektrometrie
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (dt.: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
IRENA	International Renewable Energy Agency (dt.:)
KMK	Kultusministerkonferenz
LKW	Lastkraftwagen
MEC	Microbial electrolysis cell (dt. Mikrobielle Elektrolysezelle)
NRW	Nordrhein-Westfalen
PEM	Proton-exchange-membrane (dt.: Protonen-Austausch-Membran, genutzt bei Elektrolyseuren als auch Brennstoffzellen)
PKW	Personenkraftwagen
SAP	Sustainable aviation fuel (dt.: Nachhaltiger Luftfahrttreibstoff)
SDG(s)	Sustainable Development Goal(s) (dt.: Ziel(e) Nachhaltiger Entwicklung)
Sek. I	Sekundarstufe I
Sek. II	Sekundarstufe II
SOCME	System-oriented concept map extension (dt.: System-orientierte Concept Map Erweiterung)
THG	Treibhausgas
TRL	Technology Readiness Level (dt.: Technologie-Reifegrad)
UN	United Nations (dt.: Vereinte Nationen)
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (dt.: Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur)

8.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Planetaren Belastbarkeitsgrenzen 2023

Abbildung 2: Denkbare Einsatzmöglichkeiten für Wasserstoff

Abbildung 3: Treibhausgasemissionen (THG) bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen (FCEV) und Elektroautos (BEV) (2020-2030).

Abbildung 4: Treibhausgasemissionen bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Elektroautos (2030-2040)

Abbildung 5: Vergleich der Wirkungsgrade verschiedener Antriebe

Abbildung 6: Absorption von Licht durch Photokatalysator

Abbildung 7: Elektron-Loch-Paar

Abbildung 8: Reduktion und Oxidation am Photokatalysator

Abbildung 9: Bandposition ausgewählter Halbleiter im Energiediagramm

Abbildung 10: Mögliche Reaktionsmechanismen der Photoreformierung von Methanol am Photokatalysator Titandioxid.

Abbildung 11: Schematischer Reaktionsverlauf an Titandioxid-Teilchen beim ersten Oxidationsschritt von Ethanol-Molekülen

Abbildung 12: Vorgeschlagener Reaktionsmechanismus der Photoreformierung von Di- oder Polyolen über die Pfade des indirekten bzw. direkten Loch-Transfers

Abbildung 13: Vorgeschlagener Reaktionsweg bei längerkettigen Polyol-Molekülen durch direkten Loch-Transfer am Beispiel von Sorbit

Abbildung 14: Schematische Darstellung der allgemeinen Prozessschritte am Photokatalysator mit eingesetztem Co-Katalysator

Abbildung 15: Vergleich des Primärenergieverbrauchs der Menschheit (2014) zu nutzbaren fossilen und nuklearen Energieressourcen der Erde sowie der jährlichen Sonneneinstrahlung. Darstellung von Richard Kremer

Abbildung 16: Angaben zur Umsetzung bestimmter Themen im Fachunterricht

Abbildung 17: Einschätzung der Relevanz bestimmter Themenbereiche für den Fachunterricht mit Bezug zu BNE

Abbildung 18a & 18b: Fragen zum Angebot eines Schülerlabors

Abbildung 19: Meinungsbildung zu Lehrkräftefortbildungen zu den ausgewählten Themen

Abbildung 20: Titandioxidsuspension vor der Bestrahlung (links) und nach der Zugabe von Reagenzien und einer Bestrahlungszeit von 10 Minuten (rechts)

Abbildung 21a & 21b: REM-Aufnahmen des hergestellten Pt/TiO₂-Photokatalysators. a (links): Pt/TiO₂-Photokatalysator nach der Herstellung. b (rechts): Pt/TiO₂-Photokatalysator nach der Photoreformierung (Skalierung entspricht 1 µm)

Abbildung 22: Grundlegende Versuchsschritte (a-f) bei der Durchführung der Photoreformierung

Abbildung 23: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L). Gaschromatographisch wurden die Proben nach 10 mL, 20 mL und 30 mL untersucht.

Abbildung 24: Glucose-Teststreifen. Links: Test der Lösung vor Versuchsbeginn. Rechts: Test nach beendetem Versuch

Abbildung 25: Gaschromatogramm der Gasprobe aus dem 2. Ansatz

Abbildung 26: Aufbau Photoreformierung im Reagenzglas (kleiner Aufbau)

Abbildung 27: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %)

Abbildung 28: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) im Vergleich zwischen einer mit Wasserstoff vorbehandelten Suspension und einer nicht vorbehandelten Suspension

Abbildung 29: Gaschromatogramm der erhaltenen Gasprobe bei der Photoreformierung von Ethanol im Vergleich zur Referenzmessung von Wasserstoffgas aufgenommen mit dem Low-cost Gaschromatographen

Abbildung 30: Gaschromatogramm der erhaltenen Gasprobe bei der Photoreformierung von Ethanol im Vergleich zur Referenzmessung von Wasserstoffgas aufgenommen mit dem Gaschromatographen von Shimadzu

Abbildung 31: Fehling-Probe: 1. Ethanol-Lösung, Photokatalysator, nicht bestrahlt (Vergleichsprobe); 2. Ethanol-Lösung (vergällt), Fehling nicht bestrahlt; 3. Ethanol-Lösung (unvergällt), Photokatalysator, Fehling, nicht bestrahlt; 4. Ethanol-Lösung (unvergällt), Fehling, nicht bestrahlt; 5. Ethanol-Lösung (vergällt), Photo-katalysator, Fehling bestrahlt; 6. Ethanol-Lösung (unvergällt), Photokatalysator, Fehling, bestrahlt

Abbildung 32: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) über zehn Stunden

Abbildung 33: Gaschromatogramm der Langzeitbestrahlung von Ethanol nach 20 Stunden (Low-Cost GC)

Abbildung 34: Vergleich der Gaschromatogramme (Shimadzu GC) der Bestrahlung von Ethanol nach 90 Minuten, 24 Stunden und 24 Stunden bei der Bestrahlung mit vier High-Power LED. Als Referenzen sind zudem Proben von Wasserstoff, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff, Ethanol und Methan aufgeführt.

Abbildung 35: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol bei unterschiedlichen Volumenanteilen der eingesetzten Lösungen

Abbildung 36: Versuchsaufbau zur Untersuchung des Temperatureinflusses auf die Photoreformierung

Abbildung 37: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) bei unterschiedlichen Temperaturen

Abbildung 38: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) bei unterschiedlichen Mengen des Photokatalysators

Abbildung 39: Vergleich der Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) unter Nutzung von einem nicht bestrahlten und einem bereits bei der Photoreformierung eingesetzten Photokatalysators

Abbildung 40: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Methanol, Ethanol und Propanol mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$.

Abbildung 41: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethylenglykol, Glycerin, Erythrit, Xylit und Sorbit mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$

Abbildung 42: Gasentwicklung bei der Photoreformierung verschiedener einwertiger und mehrwertiger Alkohole mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$

Abbildung 43: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L)

Abbildung 44: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L) bei unterschiedlichen Temperaturen

Abbildung 45: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose (100 g/L), Fructose (100 g/L), Saccharose (191,7 g/L) und Lactose (191,7 g/L)

Abbildung 46: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Stärke (100 g/L) bei $70 \text{ }^\circ\text{C}$

Abbildung 47: Gasentwicklung bei der Photoreformierung unterschiedlicher zuckerhaltiger Lebensmittel

Abbildung 48: Gasentwicklung bei der Photoreformierung einwertiger Alkohole mit der Konzentration $c = 1,71 \text{ mol/L}$ bei der Nutzung unterschiedlicher Lichtquellen

Abbildung 49: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Glucose und Fructose ($c = 0,56 \text{ mol/L}$) bei der Nutzung unterschiedlicher Lichtquellen

Abbildung 50: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Ethanol (10 Vol. %) in unterschiedlichen Reagenzgläsern

Abbildung 51: Die 17 Ziele Nachhaltiger Entwicklung

Abbildung 52: Visualisierung der Kernkompetenzen und Kompetenzbereiche im GreenComp

Abbildung 53: Fünf-Dimensionen-Modell nachhaltiger Entwicklung. Eigene Darstellung basierend auf Leitlinie BNE NRW

Abbildung 54: Verlaufsplan für den Chemieunterricht in der Sek. I an Gymnasien

Abbildung 55: Verlaufsplan für den Chemieunterricht in der Sek. II an Gymnasien

Abbildung 56: Lehrplanbezüge zu Wasserstoff und Photoreformierung in den Bundesländern

Abbildung 57: Ausschnitt aus dem Material. Bild-für-Bild Experimentieranleitung

Abbildung 58: Ausschnitt auf dem begleitenden Material zum Versuch „Photoreformierung von Ethanol“

Abbildung 59: Exemplarischer Ausschnitt aus dem Material des Modul-Angebots „BNE unter Einbezug von Titandioxid“ zur Photoreformierung von Ethanol.

8.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die „Farben des Wasserstoffs“ im Vergleich

Tabelle 2: Energiekostenvergleich für PKW in €/100 km

Tabelle 3: Übersicht zu den Oxidationspotentialen und der freien Reaktionsenthalpie ausgewählter Substrate bei pH 7

Tabelle 4: Grundfragen Kohorte

Tabelle 5: Auswahl einiger Fragen zu BNE

Tabelle 6: Gasentwicklung bei der Bestrahlung verschiedener Glucose-Lösungen

Tabelle 7: Gasentwicklung bei der Bestrahlung einer Ethanol-Lösung (10 Vol. %; $c = 1,71 \text{ mol/L}$)

Tabelle 8: Gasentwicklung bei der Bestrahlung einer Methanol-Lösung (6,9 Vol. %; $c = 1,71 \text{ mol/L}$)

Tabelle 9: Gasentwicklung bei der Bestrahlung von Wasser

Tabelle 10: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Stärke (10 g/L)

Tabelle 11: Gasentwicklung bei der Photoreformierung von Cellulose (10 g/L)

Tabelle 12: Überblick über die praktischen Erprobungen des Experiments Photoreformierung und der dazugehörigen Materialien

Tabelle 13: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats des Workshops

Tabelle 14: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Tabelle 15: Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats der Lehrkräftefortbildung

Tabelle 16: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Tabelle 17: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats der Lehrkräftefortbildung

Tabelle 18: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Tabelle 19: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des persönlichen Resultats der Lehrkräftefortbildung

Tabelle 20: Darstellung der Ergebnisse zur Bewertung des Versuchs und der Begleitmaterialien „Photoreformierung von Ethanol“

Tabelle 21: Überblick zu den Angeboten zum Thema Photoreformierung im Rahmen von Vorträgen, Workshops und Fortbildungen

8.4. Literaturverzeichnis

1. ADAC: Es gurgelt und summt: Der Toyota Mirai im ADAC Test, 03.07.2023, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/>, (27.03.2024).
2. ADAC: Kostencheck Elektroautos: Das sind die 30 günstigsten Modelle, 05.01.2024, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-elektroautos/>, (27.03.2024).
3. ADAC: Test Hyundai Nexo: Elektro-SUV mit Brennstoffzelle, 13.01.2023, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-nexo/>, (27.03.2024).
4. ADAC: Top 10: Die günstigsten Mittelklasse-Autos im ADAC Kosten-Check, 04.01.2024, <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-mittelklasse-autos/>, (27.03.2024).
5. ADAC: Wasserstoffautos: Technik, Modelle, Tests, Tankstellen, 29.12.2023, <https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/wasserstoffauto-so-funktioniert-es/>, (28.03.24).
6. AL-AZRI, ZAKIYA H.N.; CHEN, WAN-TING; CHAN, ANDREW; JOVIC, VEDRAN; INA, TOSHIAKI; IDRIS, HICHAM; WATERHOUSE, GEOFFREY I.N.: The roles of metal co-catalysts and reaction media in photocatalytic hydrogen production: Performance evaluation of M/TiO₂ photocatalysts (M = Pd, Pt, Au) in different alcohol-water mixtures, in: Journal of Catalysis 329, 2015, S. 355-367.
7. ARCELORMITTAL: Wasserstoff-Projekt H2H Hamburg (H₂ aus Hamburg), <https://www.h2-hh.de/de/projekte/details/h2h-hamburg.html>, (12.01.2024).
8. ASHKAVAND, MOSTAFA; JENTSCH, SEBASTIAN; EGGERS, NATASCHA; BIRTH-REICHERT, TORSTEN: Readiness Levels. Kennzahlen zur systemtechnischen Bewertung - Eine Übersicht (Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung), Magdeburg 2023.
9. AUTOMOTORSPORT (Hebermehl, Gregor): Das bedeutet der Wasserstoff-Farbcode, <https://www.auto-motor-und-sport.de/tech-zukunft/wasserstoff-farben-bedeutung/> (05.10.23).
10. BADER, HANS JOACHIM; LÜHKEN, Arnim: Anforderungen an ein Schulexperiment, in: Katrin Sommer, Judith Wambach-Laicher, Peter Pfeifer (Hrsg.) Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht, Seelze: Aulis 2018, S. 464-467.
11. BADER, HANS JOACHIM; LÜHKEN, ARNIM: Legitimation des Experiments für den Chemieunterricht, in: Katrin Sommer, Judith Wambach-Laicher, Peter Pfeifer (Hrsg.) Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht, Seelze: Aulis 2018, S. 461-462.
12. BAE, EUNYOUNG; CHOI, WONYONG; PARK, JAIWOOK; SHIN, HYEON SUK; KIM, SEUNG BIN; LEE, JAE SUNG: Effects of Surface Anchoring Groups (Carboxylate vs Phosphonate) in Ruthenium-Complex-Sensitized TiO₂ on Visible Light Reactivity in Aqueous Suspensions, in: The Journal of Physical Chemistry B 108 (37), 2004, S. 14093-14101.
13. BAHADORI, ELNAZ; RAMIS, GIANGUIDO; ZANARDO, DANNY; MENEGAZZO, FEDERICA; SIGNORETTO, MICHELA; GAZZOLI, DELIA; PIETROGIACOMI, DANIELA; DI MICHELE,

- ALESSANDRO; ROSSETTI, ILENIA: Photoreforming of Glucose over CuO/TiO₂, in: *Catalysts* 10 (5), 2020, S. 1-20.
14. BAHRUJIA, HASLIZA; BOWKERA, MICHAEL; DAVIESA, PHILIP R.; PEDRONOA, FABIEN: New insights into the mechanism of photocatalytic reforming on Pd/TiO₂, in: *Applied Catalysis B: Environmental* 107, 2011, S. 205-209.
 15. BALDUCCI, GABRIELE: The adsorption of glucose at the surface of anatase: A computational study, in: *Chemical Physics Letters* 494 (1-3), 2010, S. 54-59.
 16. BANERJEE, DEBARUN; KUSHWAHA, NIDHI; SHETTI, NAGARAJ P.; AMINABHAVI, TEJRAJ M.; AHMAD, EJAZ: Green hydrogen production via photo-reforming of bio-renewable resources, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167, 2022, S. 1-14.
 17. BELLARDITA, MARIANNA; GARCIA-LOPEZ, ELISA ISABEL; MARCI, GIUSEPPE; PALMISANO, LEONARDO: Photocatalytic formation of H₂ and value-added chemicals in aqueous glucose (Pt)-TiO₂ suspension, in: *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (14), 2016, S. 5934-5947.
 18. BERTO, TOBIAS: Elucidation of reaction pathways of the photoreforming and overall water splitting reaction over precious metal decorated semiconductors. Dissertation, München 2016.
 19. BERTO, TOBIAS; SANWALD, KAI E.; EISENREICH, WOLFGANG; GUTIÉRREZ, OLIVER Y.; LERCHER, JOHANNES A.: Photoreforming of ethylene glycol over Rh/TiO₂ and Rh/GaN:ZnO, in: *Journal of Catalysis* 338, 2016, S. 68-81.
 20. BIANCHI, GUIA; PISIOTIS, ULRIKE; CABRERA GIRALDEZ, MARCELINO: GreenComp. Der Europäische Kompetenzrahmen für Nachhaltigkeit, Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen Europäische Union 2022; online unter: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC128040/JRC128040_009.pdf, (18.01.2024).
 21. BICKENDORFF, MICHAEL; SCHNABEL, TOBIAS; LONDONG, JÖRG: Die photokatalytische Oxidation als ein Verfahren der weitergehenden Abwasserreinigung, in: *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 67 (3), 2020, S. 177-184.
 22. BINNEWIES, MICHAEL; JÄCKEL, MANFRED; WILLNER, HELGE; RAYNER-CANHAM, GEOFF: *Allgemeine und Anorganische Chemie*, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2011.
 23. BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA; SIEHR, ILONA (Hrsg.): *Chemie. Qualifikationsphase. Nordrhein-Westfalen*, Bamberg: Buchner 2023.
 24. BROCK, ANTJE: *Verankerung von Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule*, Berlin 2017.
 25. BROCK, ANTJE; GRUND, JULIUS: *Executive Summary. Bildung für nachhaltige Entwicklung in Lehr-Lernsettings – Quantitative Studie des nationalen Monitorings – Befragung von LehrerInnen*, Berlin 2019.
 26. BROCK, ANTJE; HOLST, JORRIT: *Schlüssel zu Nachhaltigkeit und BNE in der Schule: Ausbildung von Lehrenden, Verankerung in der Breite des Fächerkanons und jenseits der Vorworte. Kurzbericht des Nationalen Monitorings zu Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE)*, Berlin 2022.
 27. *BROT FÜR DIE WELT: Studie: Edles Metall - Unwürdiger Abbau Platin aus Südafrika und die Verantwortung deutscher Unternehmen*, Berlin 2018; online unter: https://www.brot-fuer-die-welt.de/fileadmin/mediapool/2_Downloads/Fachinformationen/Analyse/Analyse75-de-v10-Web.pdf, (Zugriff: 28.11.2024).

28. BRUNDTLAND, GRO HARLEM (Hrsg.); AGNELLI, SUSANNA (Verfasserin); HAUFF, VOLKER (Hrsg.): Unsere gemeinsame Zukunft: der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung, Greven: Eggenkamp 1987.
29. BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMUV): Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos?, 01.10.2021, <https://www.bmuv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten>, (27.03.2024).
30. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG (BMZ); STÄNDIGE KONFERENZ DER KULTUSMINISTER DER LÄNDER IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (KMK): Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, Bonn & Berlin 2007; online unter: https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2007/2007_06_00_Orientierungsrahmen_Globale_Entwicklung.pdf, (13.03.2024).
31. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BMWi): Die Nationale Wasserstoffstrategie, Berlin 2020.
32. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK): Energiekostenvergleich für Pkw, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/2021-08-pkw-energiekostenvergleich.html>, (04.01.2024).
33. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ (BMWK): Erneuerbare Energien, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> (17.07.2023).
34. BUNDESNETZAGENTUR: Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur, <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html> (09.08.2023).
35. CARMESIN, JANNIS (Quarks): Ist Wasserstoff der Alleskönner für die Energiewende?, 2020, <https://www.quarks.de/technik/energie/was-die-allzweckwaffe-fuer-die-energie-wende-leisten-kann/>, (Zugriff: 02.06.22).
36. CHANG, LAM; YONG, SIEK TING; CHAI, SIANG PIAO; PUTRI, LUTFI KURNIANDITIA; TAN, LLING LLING; MOHAMED, ABDUL RAHMAN: A review of methanol photoreforming: elucidating the mechanisms, photocatalysts and recent advancement strategies, in: Materials Today Chemistry 27, 2023, S. 1-42.
37. CHEN, SHEN-MING; LU, NORMAN; CHEN, JUN-YU; YANG, CHENG-YU; YEH, YUN-PENG; FENG, TSUNG-YAO; SHIH, YANG-HSIN; KOKULNATHAN, THANGAVELU; CHEN, DONG: Enhanced photocatalytic degradation of atrazine by platinized titanium dioxide under 352 nm irradiation, in: Water Science and Technology 75 (5), 2017, S. 1128-1137.
38. CHEN, WAN-TING; CHAN, ANDREW; SUN-WATERHOUSE, DONGXIAO; LLORCA, JORDI; IDRIS, HICHAM; WATERHOUSE, GEOFFREY I.N.: Performance comparison of Ni/TiO₂ and Au/TiO₂ photocatalysts for H₂ production in different alcohol-water mixtures, in: Journal of Catalysis 367, 2018, S. 27-42.
39. CHRISTOFORIDIS, KONSTANTINOS C.; FORNASIERO, PAOLO: Photocatalytic Hydrogen Production: A Rift into the Future Energy Supply, in: ChemCatChem 9 (9), 2016, S. 1523-1544.
40. CLARIZIA, LAURA; RUSSO, DANILO; DI SOMMA, ILARIA; ANDREOZZI, ROBERTO; MAROTTA, RAFFAELE: Hydrogen Generation through Solar Photocatalytic Processes: A

- Review of the Configuration and the Properties of Effective Metal-Based Semiconductor Nanomaterials, in: *Energies* 10(10), 2017, S 1-21.
41. CLAUSEN, JENS: Das Wasserstoffdilemma: Verfügbarkeit, Bedarfe und Mythen, Berlin 2022.
 42. CONTE, FRANCESCO; ROSSETTI, ILENIA; RAMIS, GIANGUIDO; VAULOT, CYRIL; HAJJARGARREAU, SAMAR; BENNICI, SIMONA: Low Metal Loading (Au, Ag, Pt, Pd) Photocatalysts Supported on TiO₂ for Renewable Processes, in: *Materials* 15 (8), 2022, S. 1-19.
 43. DE HAAN, GERHARD: Die Kernthemen der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung, in: *Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik* 25 (1), 2002, S. 13-20.
 44. DEUTSCHE UNESCO-KOMMISSION: Nachhaltigkeit lernen: Hamburger Erklärung der Deutschen UNESCO-Kommission zur Dekade der Vereinten Nationen „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (2005–2014), Hamburg 2003; online unter: <https://www.unesco.de/sites/default/files/2018-04/Nachhaltigkeit%20lernen.pdf>, (13.03.2024).
 45. DEUTSCHE UNESCO-KOMMISSION: UN-Dekade mit Wirkung - 10 Jahre „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ in Deutschland, Bonn 2015, S. 43; online unter: <https://www.bne-portal.de/bne/shareddocs/downloads/files/duk-un-dekade-mit-wirkung.pdf>, (13.03.2024).
 46. DEUTSCHEN BILDUNGSSERVER: Transfer-21 Nordrhein-Westfalen: Agenda 21 in Schule und Jugendarbeit, https://www.bildungsserver.de/innovationsportal/innovationsprojekt.html?innovationsprojekte_id=57, (21.10.2023).
 47. DEUTSCHER INDUSTRIE- UND HANDELSKAMMERTAG E. V. (Hrsg.): Wasserstoff. DIHK - Faktenpapier, Berlin 2020.
 48. DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E. V. (DLR): Zukünftige maritime Treibstoffe und deren mögliche Importkonzepte. Kurzstudie, Geesthacht 2022.
 49. DIE SENATORIN FÜR KINDER UND BILDUNG: Chemie. Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe - Einführungsphase und Qualifikationsphase -, Bremen 2022; online unter: https://www.lis.bremen.de/sixcms/media.php/13/BP%20Che%20GyO_final_skb_k.pdf, (12.04.2024).
 50. DÖRSCHELN, JENNIFER: Organische Leuchtdioden. Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht. Dissertation, in: Hans Niedderer, Helmut Fischler und Elke Sumfleth (Hrsg.) *Studien zum Physik- und Chemielernen*, Band 274, Berlin: Logos 2019.
 51. EARTH OVERSHOOT DAY: Past Earth Overshoot Days, <https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>, (17.09.23).
 52. EIXLER, ANNA: Verlaufsplan BNE-geeigneter Themen für den Chemieunterricht an Berufskollegs (Chemikant*in, 1. & 2. Lehrjahr), Wuppertal 2023; online unter: <https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/de/unterrichtsmaterialien/bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung/>, (14.03.2024).
 53. EN2X - WIRTSCHAFTSVERBAND FUELS UND ENERGIE E. V.: Tankstellenbestand, <https://en2x.de/service/statistiken/tankstellenbestand/> (09.08.2023).
 54. ENGAGEMENT GLOBAL: Orientierungsrahmen für den Lernbereich Globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung, Bonn 2016; online unter:

https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2015/2015_06_00-Orientierungsrahmen-Globale-Entwicklung.pdf (18.09.2023).

55. EUROPÄISCHE KOMMISSION: Der europäische Grüne Deal, Brüssel 2019.
56. EUROPÄISCHE KOMMISSION: Wasserstoffstrategie für ein klimaneutrales Europa, Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Brüssel 2020.
57. FARCHMIN, FRED: Die Entwicklung von Grobelektrolyse-Systemen: Notwendigkeit und Herangehensweise, in: Johannes Töpler und Jochen Lehmann (Hrsg.): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven, Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 229-244.
58. FREIE UND HANSESTADT HAMBURG. BEHÖRDE FÜR SCHULE UND BERUFSBILDUNG: Bildungsplan Studienstufe Chemie, Hamburg 2022; online unter: <http://www.hamburg.de/bildungsplaene/nofl/16762756/chemie-gyo-2022/>, (12.04.2024).
59. FU, XIANLIANG; LONG, JINLIN; WANG, XUXU; LEUNG, DENNIS Y.C.; DING, ZHENGXIN; WU, LING; ZHANG, ZIZHONG; LI, ZHAOHUI; FU, XIANZHI: Photocatalytic reforming of biomass: A systematic study of hydrogen evolution from glucose solution, in: International Journal of Hydrogen Energy, 33 (22), 2008, S. 6484-6491.
60. FUJISHIMA, AKIRA, HONDA, KENICHI: Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, in: Nature 238, 1972, S. 37-38.
61. FUJISHIMA, AKIRA; RAO, TATA N.; TRYK, DONALD A.: Titanium dioxide photocatalysis, in: Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 1 (1), 2000, S. 1-21.
62. GARCIA-LOPEZ, ELISA I.; PALMISANO, LEONARDO: Fundamentals of photocatalysis: The role of the photocatalysts in heterogeneous photo-assisted reactions, in: Elisa I. Garcia Lopez, Leonardo Palmisano (Hrsg.) Materials Science in Photocatalysis, Amsterdam (u.a.): Elsevier 2021, S. 3-9.
63. GARCIA-LOPEZ, ELISA I.; PALMISANO, LEONARDO; MARCI, GIUSEPPE: Overview on Photoreforming of Biomass Aqueous Solutions to Generate H₂ in the Presence of g-C₃N₄-Based Materials, in: ChemEngineering 7(1), 2023, S. 1-9.
64. GIETZ, PAUL; NELLE, PETER; PENZ, CARSTEN; SCHUMACHER, ELKE; DE VRIES, WILKE: Elemente Chemie. Oberstufe. Nordrhein-Westfalen, Stuttgart: Klett 2023.
65. GLOBAL FOOTPRINT NETWORK: Earth Overshoot Day, <https://www.footprintnetwork.org/our-work/earth-overshoot-day/>, (17.09.23).
66. GRANDRATH, REBECCA; ZELLER, DIANA; KREMER, RICHARD; VENZLAFF, JULIAN; TAUSCH, MICHAEL W.; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: E³ - Energieumwandlung Experimentell erleben, in: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie, 30 (4), 2019, S. 29-33.
67. GU, QUAN; LONG, JINLIN; FAN, LIZHOU; CHEN, LIMING; ZHAO, LULU; LIN, HUAXIANG; WANG, XUXU: Single-site Sn-grafted Ru/TiO₂ photocatalysts for biomass reforming: Synergistic effect of dual co-catalysts and molecular mechanism, in: Journal of Catalysis 303, 2013, S.141-155.
68. HEBLING, CHRISTOPHER; RAGWITZ, MARIO; FLEITER, TOBIAS; GROOS, ULF; HÄRLE, DOMINIK; HELD, ANNE; JAHN, MATTHIAS; MÜLLER, NILS; PFEIFER, THOMAS; PLÖTZ, PATRICK; RANZMEYER, OMBENI; SCHAADT, ACHIM; SENSFUß, FRANK; SMOLINKA, TOM; WIETSCHEL, MARTIN: Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland, Karlsruhe

- (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI) und Freiburg (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE) 2019.
69. HEFFEN, MARIA; TAUSCH, MICHAEL W.: Photokatalyse – homogen und heterogen. Das Photo-Blue-Bottle Experiment runderneuert, in: Praxis der Naturwissenschaften. Chemie in der Schule 64 (6), 2015, S. 51-55.
 70. HESSISCHES KULTUSMINISTERIUM: Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe. Chemie, Wiesbaden 2016; online unter: <https://kultus.hessen.de/sites/kultusministerium.hessen.de/files/2021-07/kcgo-ch.pdf>, (12.04.2024).
 71. HOCHSCHULNETZWERK BNE IN DER LEHRKRÄFTEBILDUNG IN NRW: <https://www.geographie.uni-wuppertal.de/de/bne-hochschulnetzwerk/>, (15.03.2024).
 72. HOLLEMANN, ARNOLD FREDERIK; WIBERG, EGON: Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin: de Gruyter 1995.
 73. HOLST, JORRIT; BROCK, ANTJE: Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) in der Schule: Strukturelle Verankerung in Schulgesetzen, Lehrplänen und der Lehrerbildung, Berlin 2020.
 74. HYIRON: Pressemitteilung. In Lingen wird weltweit größte Wasserstoff-Direktreduktionsanlage zur Herstellung von grünem Eisen von Niedersachsens Umwelt- und Energieminister Meyer eröffnet, <https://hyiron.com/de/eroeffnung-der-wasserstoff-direktreduktionsanlage-in-lingen-durch-niedersachsens-umwelt-und-energieminister-meyer/>, (27.09.23).
 75. IBANEZ, JORGE G.; TAUSCH, MICHAEL W.; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA; FERNANDEZ-GALLARDO, ISABEL; ROBLES-LEYZAOLA, AINOHA; KREES, SIMONE; MEUTER, NICO; TENNIOR, MATHIAS: The Basis for Photocatalytic Writing, in: Journal of Chemical Education 88 (8), S. 1116-1118.
 76. ILIE, MIRELA; COJOCARU, BOGDAN; PARVULESCU, VASILE I.; GARCIA, HERMENEGILDO: Improving TiO₂ activity in photo-production of hydrogen from sugar industry wastewaters, in: International Journal of Hydrogen Energy 36 (24), S. 15509-15518.
 77. INDRAKANTI, VENKATA PRADEEP; KUBICKI, JAMES D.; SCHOBERT, HAROLD H.: Photoinduced activation of CO₂ on Ti-based heterogeneous catalysts: Current state, chemical physics-based insights and outlook, in: Energy and Environmental Science 2 (7), 2009, S. 745-758.
 78. INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (IFA): Wasserstoff, GESTIS-Stoffdatenbank; <https://gestis.dguv.de/data?name=007010>, (14.03.2024).
 79. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC): Climate Change 2023. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf 2023.
 80. INTERNATIONAL UNION OF PURE AND APPLIED CHEMISTRY (IUPAC): Photocatalyst, in: Glossary of terms used in photochemistry. 3rd edition. (IUPAC Recommendations 2006), 79 (3), 2007, S. 293-465.
 81. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA): Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I - Trade outlook for 2050 and way forward, Abu Dhabi 2022.
 82. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA): Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal, Abu Dhabi 2020.

83. KAWAI, TOMOJI; SAKATA, TADAYOSHI: Conversion of carbohydrate into hydrogen by a photocatalytic process, in: *Nature* 286, 5772, 1980, S. 474-476.
84. KENNEDY, JULIA; BAHRUJIA, HASLIZA; BOWKERA, MICHAEL; DAVIES, PHILIP R.; BOULEGHLIMAT, EMIR; ISSARAPANACHEEWIN, SUDARAT: Hydrogen generation by photocatalytic reforming of potential biofuels: Polyols, cyclic alcohols, and saccharides, in: *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 356, 2018, S. 451-456.
85. KIESLING, ELISABETH; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: BNE im Chemieunterricht - von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung, in: *CHEMKON* 29 (S1), 2022, S. 239-245.
86. KIESLING, ELISABETH; KREMER, RICHARD; PEREIRA VAZ, NUNO; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Wege aus der Klimakrise - ein BNE-Schülerlaborangebot mit mehrdimensionalem Zugang, in: *MNU Journal* 76 (06), 2023, S. 464-472.
87. KISCH, HORST: *Semiconductor Photocatalysis. Principles and Applications*, Weinheim: Wiley-VCH 2015.
88. KLINGSHIRN, CLAUS F.: Past, Present and Future Applications, in: Claus F. Klingshirn, Bruno K. Meyer, Andreas Waag, Axel Hoffmann, Jean Geurts (Hrsg.) *Zinc Oxide. From Fundamental Properties Towards Novel Applications*, Berlin & Heidelberg: Springer 2010, S. 325-346.
89. KOBAYASHI, ATSUSHI: Photoredox Cascade Catalyst for Efficient Hydrogen Production with Biomass Photoreforming, in: *Angewandte Chemie* 62 (46), 2023, S. 1-5.
90. KOMPETENZZENTRUM TECHNIK-DIVERSITY-CHANCENGLEICHHEIT E. V: Was ist der Girls'Day?; online unter: <https://www.girls-day.de/ueber-den-girls-day/was-ist-der-girls-day2/deutsch>, (Zugriff: 23.10.2023).
91. KORCZAK, PETER: Die Solar-Wasserstoffanlage in Neunburg vorm Wald, in: *PLUS LUCIS* (3), 1993, S. 14-18.
92. KOZLOVA, EKATERINA A.; KURENKOVA, ANNA; GERASIMOV, EVGENY; GROMOV, NIKOLAY V.; MEDVEDEVA, TATIANA B.; SARAIEV, ANDREY A.; KAICHEV, VASILY V.: Comparative study of photoreforming of glycerol on Pt/TiO₂ and CuO_x/TiO₂ photocatalysts under UV light, in: *Materials Letters* 283 (128901), 2021, S. 1-4.
93. KREMER, RICHARD: *Photokatalytische Wasserstoffherstellung. Modellexperimente mit homogenen und heterogenen Systemen für Unterricht und Lehre*. Dissertation, Wuppertal 2023.
94. KÜHNEL, MORITZ; REISNER, ERWIN: Solar hydrogen generation from lignocellulose, in: *Angewandte Chemie. International Edition* 57, 2018, S. 3290-3296.
95. KÜSTER SIMIC, ANDRÉ; SCHÖNFELDT, JANEK: H₂-Transformation der Stahlindustrie und des Energieanlagenbaus, in: *Working Paper Forschungsförderung (Hans-Böckler-Stiftung)*, 260, 2022.
96. KURENKOVA, ANNA Y.; MEDVEDEVA, TATIANA B.; GROMOV, NIKOLAY V.; BUKHTIYAROV, ANDREY V.; GERASIMOV, EVGENY Y.; CHEREPANOVA, SVETLANA V.; KOZLOVA, EKATERINA A.: Sustainable Hydrogen Production from Starch Aqueous Suspensions over a Cd_{0.7}Zn_{0.3}S-Based Photocatalyst, in: *Catalysts* 11 (7), 2021, S. 1-15.
97. LAN, LAN; DALY, HELEN; JIAO, YILAI; YAN, YIN; HARDACRE, CHRISTOPHER; FAN, XIAOLEI: Comparative study of the effect of TiO₂ support composition and Pt loading on the performance of Pt/TiO₂ photocatalysts for catalytic photoreforming of cellulose, in: *International Journal of Hydrogen Energy* 46, 2021, S. 31054-31066.
98. LAN, LAN; DALY, HELEN; SUNG, REHANA; TUNA, FLORIANA; SKILLEN, NATHAN; ROBERTSON, PETER K. J.; HARDACRE, CHRISTOPHER; FAN, XIAOLEI: *Mechanistic Study*

- of Glucose Photoreforming over TiO₂-Based Catalysts for H₂ Production, in: ACS Catalysis 13 (13), 2023, S. 8574-8587.
99. LEHMANN, JÜRGEN: Befunde empirischer Forschung zu Umweltbildung und Umweltbewußtsein, Opladen: Leske + Budrich 1999.
 100. LERLEI, SARAH: Herstellung von grünem Wasserstoff durch Photoreformierung. Umsetzung verschiedener Zucker und zuckerhaltiger Lebensmittel, Masterarbeit, Wuppertal 2020.
 101. LI, XIN; YU, JIAGUO; MIETEK, JARONIEC: Hierarchical photocatalysts, in: Chemical Society Reviews 45 (9), 2016, S. 2603-2636.
 102. LI, WENXI; ZHAO, WENXUAN; ZHU, HAORYU; LI, ZHI-JUN; WANG, WANGLEI: State of the art in the photochemical degradation of (micro)plastics: from fundamental principles to catalysts and applications, in: Journal of Materials Chemistry A 11 (6), 2023, S. 2503-2527.
 103. LOB, REINHOLD E.: 20 Jahre Umweltbildung in Deutschland. Eine Bilanz, Köln: Aulis 1997.
 104. LOGAN, BRUCE E.: Daily Energy Use and Carbon Emissions. Fundamentals and Applications for Students and Professionals, Hoboken: Wiley 2022.
 105. LOHSE, ANDREAS (POWER-TO-X): Weltweit gibt es 814 Wasserstofftankstellen - 105 sind es in Deutschland, Wasserstoff International, 08.02.2023 <https://power-to-x.de/weltweit-gibt-es-814-wasserstofftankstellen-105-sind-es-in-deutschland/>, (09.08.2023).
 106. LOPEZ, CRISTINA R.; PULIDO MELIAN, ELISENDA; ORTEGA MENDEZ, JOSÉ ALEJANDRO; SANTIAGO, DUNIA E.; DONA RODRIGUEZ, JOSE MIGUEL; GONZALEZ DIAZ, OSCAR: Comparative study of alcohols as sacrificial agents in H₂ production by heterogeneous photocatalysis using Pt/TiO₂ catalysts, in: Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry 312, 2015, S. 45-54.
 107. LOPEZ TENLLADO, FRANCISCO JAVIER; HIDALGO-CARRILLO, JESUS; MONTES, VICENTE; SÁNCHEZ, ELENA; URBANO, FRANCISCO; MARINAS, ALBERTO: Photocatalytic production of hydrogen from binary mixtures of C-3 alcohols on Pt/TiO₂: Influence of alcohol structure, in: Catalysis Today 328, 2018, S. 2-7.
 108. MA, YIWEN; LIN, LIHUA; TAKATA, TSUYOSHI; HISATOMI, TAKASHI; DOMEN, KAZUNARI: A perspective on two pathways of photocatalytic water splitting and their practical application systems, in: Physical Chemistry Chemical Physics 25, S. 6586-6601.
 109. MAACK, LISA: Hürden einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. Akteurinnen und Akteure zwischen Immanenz und Reflexivität. Dissertation, Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt 2018.
 110. MACHHAMMER, OTTO; BODE, ANDREAS; HORMUTH, WOLFGANG: Ökonomisch/ökologische Betrachtung zur Herstellung von Wasserstoff in Großanlagen, in: Chemie Ingenieur Technik 87(4), 2015, S. 409-418.
 111. MATLIN, STEPHEN A.: Introducing the SOCME tool for systems thinking in chemistry, International Organization for Chemical Sciences in Development, Quebec 2020; online unter: http://www.iocd.org/v2_PDF/2020-TechRes0301-SOCME-Intro.pdf, (Zugriff: 21.09.2023).
 112. MEADOWS, DENNIS; MEADOWS, DONELLA; ZAHN, ERICH; MILLING, PETER: Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt 1972.

113. MELCHIONNA, MICHELE; BELTRAM, ALESSANDRO; MONTINI, TIZIANO; MONAI, MATTEO; NASI, LUCIA; FORNASIERO, PAOLO; PRATO, MAURIZIO: Highly efficient hydrogen production through ethanol photoreforming by a carbon nanocone/Pd@TiO₂ hybrid catalyst, in: Chemical Communications 52 (4), 2016, S. 764-767.
114. MENZE, STEFFEN; VAN NEK, RALF; SCHULTE-COERNE, ROLF; SIEVE, BERNHARD F. (Hrsg.): Chemie heute S II - Nordrhein-Westfalen. Qualifikationsphase, Braunschweig: Westermann 2022.
115. MINISTERIUM FÜR BILDUNG: Lehrplan Chemie. Grund- und Leistungsfach in der gymnasialen Oberstufe (Mainzer Studienstufe), Mainz 2022; online unter: https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/Lehrplaene/Chemie_SekII.pdf, (13.01.2024).
116. MINISTERIUM FÜR BILDUNG DES LANDES SACHSEN-ANHALT: Fachlehrplan Gymnasium Chemie, Magdeburg 2022; online unter: https://www.bildung-lsa.de/files/b45de329c361a40a2f0a7211902d5815/FLP_Chemie_Gym_01082022_swd.pdf, (12.04.2024).
117. MINISTERIUM FÜR BILDUNG UND KINDERTAGESFÖRDERUNG, INSTITUT FÜR QUALITÄTSENTWICKLUNG MECKLENBURG-VORPOMMERN: Rahmenplan für die Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe. Chemie - Erprobungsfassung -, 2022; online unter: https://www.bildung-mv.de/export/sites/bildungsserver/downloads/unterricht/rahmenplaene_allgemeinbildende_schulen/Chemie/RP_CHE_SEK2_erprobungsfassung.pdf, (12.04.2024).
118. MINISTERIUM FÜR BILDUNG UND KULTUR SAARLAND: Chemie Lehrplan Gymnasiale Oberstufe Grundkurs, 2023; online unter: https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/mbk/Lehrplaene/Lehrplaene_GOS_ab_2019_2020/Chemie/LP_CH_GK_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=2, (12.04.2024).
119. MINISTERIUM FÜR BILDUNG UND KULTUR SAARLAND: Chemie Lehrplan Gymnasiale Oberstufe Leistungskurs, 2023; online unter: https://www.saarland.de/SharedDocs/Downloads/DE/mbk/Lehrplaene/Lehrplaene_GOS_ab_2019_2020/Chemie/LP_CH_LK_2023.pdf?__blob=publicationFile&v=2, (12.04.2024).
120. MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND KULTUR DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN: Fachanforderungen Chemie. Allgemein bildende Schulen. Sekundarstufe I. Sekundarstufe II, Kiel 2022; online unter: <https://fachportal.lernnetz.de/sh/fachanforderungen/chemie.html?file=files/Fachanforderungen%20und%20Leitf%C3%A4den/Sekundarstufe/Fachanforderungen/Fachanforderungen%20Chemie%20Sekundarstufe%20%282022%2C%20barrierearm%29.pdf&cid=16896>, (12.04.2024).
121. MINISTERIUM FÜR ENERGIEWENDE, LANDWIRTSCHAFT, UMWELT, NATUR UND DIGITALISIERUNG DES LANDES SCHLESWIG-HOLSTEIN: Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung, Kiel 2021; online unter: https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/B/bne/Downloads/bneStrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=2, (13.03.2024).
122. MINISTERIUM FÜR KULTUS, JUGEND UND SPORT BADEN-WÜRTTEMBERG: Bildungsplan des Gymnasiums. Chemie, Stuttgart 2016; online unter: <https://www.bildungsplaene->

- bw.de/site/bildungsplan/bpExport/3241327/Lde/index.html?_page=0&requestMode=PDF&_finish=Erstellen, (12.04.2024).
123. MINISTERIUM FÜR SCHULE UND BILDUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (MSB NRW): Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung, Düsseldorf 2019; online unter: https://www.schulministerium.nrw/sites/default/files/documents/Leitlinie_BNE.pdf (21.09.2023).
124. MINISTERIUM FÜR SCHULE UND BILDUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (MSB NRW): Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen Chemie, Düsseldorf 2019; online unter: https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/198/g9_ch_klp_%203415_2019_06_23.pdf, (10.09.2023)
125. MINISTERIUM FÜR SCHULE UND BILDUNG NORDRHEIN-WESTFALEN (MSB NRW): Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen Chemie, Düsseldorf 2022, S. 50-52; online unter: https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/314/klp_gost_ch_2022_06_07.pdf, (10.09.2023).
126. MINISTERIUM FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND ENERGIE DES LANDES SACHSEN-ANHALT: Nachhaltigkeitsstrategie des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg 2018; online unter: https://mwu.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MWU/Umwelt/Nachhaltigkeit/00_Startseite_Nachhaltigkeit/190722_Nachhaltigkeitsstrategie.pdf, (13.03.2024).
127. MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR, LANDWIRTSCHAFT UND WEINBAU RHEINLAND-PFALZ: Nachhaltigkeitsstrategie Rheinland-Pfalz. Fortschreibung 2019, Mainz 2019; online unter: https://www.rlp.de/fileadmin/02/Themen/Regierungsschwerpunkte/Nachhaltigkeit/PDF/2019_Nachhaltigkeitsstrategie.pdf, (13.03.2024).
128. MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INNOVATION, DIGITALISIERUNG UND ENERGIE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN: Wasserstoffstudie Nordrhein-Westfalen. Eine Expertise für das Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2019.
129. NATIONALKOMITEE DER UN-DEKADE „BILDUNG FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG“ im Auftrag von Deutsche UNESCO-Kommission e. V.: UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ 2005-2014. Nationaler Aktionsplan für Deutschland, Bonn 2011.
130. NATUR- UND UMWELTSCHUTZ-AKADEMIE NRW (NUA): Das Landesprogramm „Schule der Zukunft“, <https://www.sdz.nrw.de/landesprogramm/ziele>, (22.10.2023).
131. NIEDERSÄCHSISCHES KULTUSMINISTERIUM: Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Berufliche Gymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg. Chemie, Hannover 2022, S. 27; online unter: <https://cuvo.nibis.de/cuvo.php?p=download&upload=362>, (13.01.2024).
132. ORGANISATION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND KULTUR (UNESCO): Bildung für nachhaltige Entwicklung. Eine Roadmap. BNE 2030, Bonn 2021; online unter https://www.unesco.de/sites/default/files/2022-02/DUK_BNE_ESD_Roadmap_DE_barrierefrei_web-final-barrierefrei.pdf, (12.03.2024).

133. PANAGIOTOPOULOU, PARASKEVI; KARAMEROU, ELENI E.; KONNDARIDES, DIMITRIS I.: Kinetics and mechanism of glycerol photo-oxidation and photo-reforming reactions in aqueous TiO₂ and Pt/TiO₂ suspensions, in: *Catalysis Today* 209, 2013, S. 91-98.
134. PETERSEN, MALTE; WORLICZEK, PAUL; MAX, JOHANNES B.; NABIYAN, AFSHIN; WEJNER, MANUEL; EICHHORN, JONAS; STREB, CARSTEN; SCHACHER, FELIX H.; WILKE, TIMM: Hydrogen Evolution Reaction with Sunlight for School Chemistry Education, in: *World Journal of Chemical Education* 9(4), 2021, S. 190-196.
135. PICHLER, CHRISTIAN; UEKERT, TAYLOR; REISNER, ERWIN: Photoreforming of biomass in metal salt hydrate solutions, in: *Chemical Communications* 56 (43), 2020, S. 5743-5746.
136. PITZKE, JANA: Entwicklung eines BNE-bezogenen Leitfadens für Lehrkräfte des Sachunterrichts. Bachelorarbeit, Wuppertal 2022.
137. REGUFE, MARIA JOAO; PEREIRA, ANA; FERREIRA, ALEXANDRE F. P.; MAFALDA RIBEIRO, ANA; RODRIGUES, ALIRIO E.: Current Developments of Carbon Capture Storage and/or Utilization–Looking for Net-Zero Emissions Defined in the Paris Agreement, in: *Energies* 14 (9) 2406, 2021, S. 1-26.
138. REINMOLD, MARCO; LÜHKEN, ARNIM: Rethinking the Squeaky Pop Test - A Novel Hydrogen Test for Chemistry Classes, in: *Journal of Chemical Education* 100 (7), 2023, S. 2696-2703.
139. REISNER, ERWIN: Wann treffen sich organische Photoredoxkatalyse und künstliche Photosynthese?, in: *Angewandte Chemie* 131 (12), 2019, S. 3694-3695.
140. RHEINISCHE POST: *Von wegen farblos: Was Wasserstoff von Wasserstoff unterscheidet*, https://rp-online.de/wirtschaft/was-wasserstoff-von-wasserstoff-unterscheidet_aid-93146335 (05.10.23).
141. RICHARDSON, KATHERINE; STEFFEN, WILL; LUCHT, WOLFGANG; BENDTSEN, JORGEN; CORNELL, SARAH E.; DONGES, JONATHAN F.; DRÜKE, MARKUS; FETZER, INGO; BALA, GOVINDASAMY; VON BLOH, WERNER; FEULNER, GEORG; FIEDLER, STEPHANIE; GERTEN, DIETER; GLEESON, TOM; HOFMANN, MATTHIAS; HUISKAMP, WILLEM; KUMMU, MATTI; MOHAN, CHINCHU; NOGUÉS-BRAVO, DAVID; PETRI, STEFAN; PORKKA, MIINA; RAHMSTORF, STEFAN; SCHAPHOFF, SIBYLL; THONICKE, KIRSTEN; TOBIAN, ARNE; VIRKKI, VILI; WANG-ERLANDSSON, LAN; WEBER, LISA; ROCKSTRÖM, JOHAN: Earth beyond six of nine planetary boundaries, in: *Science Advances* 9 (37), 2023, S. 1-16.
142. ROCKSTRÖM, JOHAN; STEFFEN, WILL; NOONE, KEVIN; PERSSON, ÅSA; CHAPIN, F. STUART; LAMBIN, ERIC F.; LENTON, TIMOTHY M.; SCHEFFER, MARTEN; FOLKE, CARL; SCHELLNHUBER, HANS JOACHIM; NYKVIST, BJÖRN; DE WIT, CYNTHIA A.; HUGHES, TERRY; VAN DER LEEUW, SANDER; RODHE, HENNING; SÖRLIN, SVERKER; SNYDER, PETER K.; COSTANZA, ROBERT; SVEDIN, UNO; FALKENMARK, MALIN; KARLBERG, LOUISE; CORELL, ROBERT W.; FABRY, VICTORIA J.; HANSEN, JAMES; WALKER, BRIAN; LIVERMAN, DIANA; RICHARDSON, KATHERINE; CRUTZEN; PAUL; FOLEY, JONATHAN A.: A safe operating space for humanity, in: *Nature* 461, 2009, S. 472-475; online unter: <https://www.nature.com/articles/461472a> (Zugriff: 13.09.2023).
143. ROESE-KOERNER, BEATE; KAPPNER, ISABELLA: Girls' Day 2022: Nachwuchsförderung: Mädchen erkunden MINT-Berufe und Studiengänge an der Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften, online unter: <https://fk4.uni-wuppertal.de/de/oeffentlichkeitsarbeit/girlsday-rueckblick/>, (Zugriff: 23.10.2023).

144. ROSARIO, ADRIANE V.; PEREIRA, ERNESTO C.: The role of Pt addition on the photocatalytic activity of TiO₂ nanoparticles: The limit between doping and metallization, in: *Applied Catalysis B: Environmental* 144, 2014, S. 840-845.
145. ROSSETTI, ILENIA: Hydrogen Production by Photoreforming of Renewable Substrates, in: *International Scholarly Research Notices. Chemical Engineering*, 2012, S. 1-21.
146. ROUSSEAU, RAPHAEL; KETEP, STEPHANIE F.; ETCHEVERRY, LUC; DELIA, MARIE-LINE; BERGEL, ALAIN: Microbial electrolysis cell (MEC): Strengths, weaknesses and research needs from electrochemical engineering standpoint, in: *Bioresource Technology Reports* 9, 2020, S. 1-9.
147. RUMAYOR, MARTA; CORREDOR, JUAN; RIVERO, MARIA JOSE; ORTIZ, INMACULADA: Prospective life cycle assessment of hydrogen production by waste photoreforming, in: *Journal of Cleaner Production* 336, 2022, S. 1-11.
148. SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR KULTUS: Lehrplan Gymnasium Chemie, Dresden 2019; online unter: https://www.schulportal.sachsen.de/lplandb/index.php?lplanid=131&lplansc=e9qPZ2d7vxCDDVRErsY&token=38fd6522eefbd7ee33649b4717c2b170#page131_32583, (12.04.2024).
149. SÄCHSISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR KULTUS: Sächsische Landesstrategie Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE), Dresden 2018; online unter: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/32399/documents/49680>, (13.03.2024).
150. SANWALD KAI E.; BERTO TOBIAS; EISENREICH, WOLFGANG; GUTIERREZ OLIVER Y.; LERCHER, JOHANNES A.: Catalytic routes and oxidation mechanisms in photoreforming of polyols, in: *Journal of Catalysis* 344, 2016, S. 806-816.
151. SAUSER, BRIAN J.; VERMA, DINESH, RAMIREZ-MARQUEZ, JOSE EMMANUEL; GOVE, RYAN: From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels. [Konferenzbeitrag] Conference on Systems Engineering Research, Los Angeles 07.-08.04.2006.
152. SCHNEIDER, STEFAN; BAJOHR, SIEGFRIED; GRAF, FRANK; KOLB, THOMAS: Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse, in: *Chemie Ingenieur Technik* 92 (8), 2020, S. 1023-1032.
153. SENATSVORWALTUNG FÜR BILDUNG, JUGEND UND SPORT BERLIN, MINISTERIUM FÜR BILDUNG, JUGEND UND SPORT DES LANDES BRANDENBURG: Rahmenlehrplan für die gymnasiale Oberstufe. Teil C. Chemie, 2021; online unter: https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/gymnasiale_oberstufe/curricula/2022/Teil_C_RLP_GOST_2022_Chemie.pdf, (12.04.2024).
154. SHIMURA, KATSUYA; YOSHIDA, HISAO: Heterogeneous photocatalytic hydrogen production from water and biomass derivatives, in: *Energy and Environmental Science* 4 (7), 2011, S. 2467-2481.
155. SKILLEN, NATHAN; DALY, HELEN; LAN, LAN; ALJOHANI, MESHAL; MURNAGHAN, CHRISTOPHER W. J.; FAN, XIAOLEI; HARDACRE, CHRISTOPHER; SHELDRAKE GARY N.; ROBERTSON, PETER K. J.: Photocatalytic Reforming of Biomass: What Role Will the Technology Play in Future Energy Systems, in: *Topics in Current Chemistry* 380, 2022, S. 1-40.
156. SCHMIDT, THOMAS: Wasserstofftechnik: Grundlagen, Systeme, Anwendungen, Wirtschaft, München: Hanser 2020

157. SOLA, ALBERTO C.; HOMS, NARCIS A.; RAMÍREZ DE LA PISCINA, PILAR: Photocatalytic H₂ production from ethanol(aq) solutions: The effect of intermediate products, in: International Journal of Hydrogen Energy 41 (43), 2016, S. 19629-19636.
158. STAATSINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND BILDUNGSFORSCHUNG MÜNCHEN (ISB): Fachlehrpläne. Gymnasium: Chemie 13 (grundlegendes Anforderungsniveau), <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/13/chemie/grundlegend>, (13.01.2024).
159. STAATSINSTITUT FÜR SCHULQUALITÄT UND BILDUNGSFORSCHUNG MÜNCHEN (ISB): Fachlehrpläne. Gymnasium: Chemie 13 (erhöhtes Anforderungsniveau), <https://www.lehrplanplus.bayern.de/fachlehrplan/gymnasium/12/chemie/erhoeht>, (13.01.2024).
160. STERNBERG, ANDRÉ; HANK, CHRISTOPH; HEBLING CHRISTOPHER (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE): Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km, Freiburg 2019, S. 3; online unter: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf, (27.03.2024).
161. STRÖBELE, WOLFGANG: Energiewende einfach erklärt. Von guten Absichten und unbequemen Fakten, Wiesbaden: Springer 2022.
162. SÜDDEUTSCHE ZEITUNG (Diermann, Ralph): *Methan und Hitze für den Klimaschutz*, <https://www.sueddeutsche.de/wissen/wasserstoff-erdgas-co-1.4935847> (05.10.23).
163. SUN, FENG; WANG, PING; YI, ZHOUXIANG; WARK, MICHAEL; YANG, JUNHE; WANG, XIANYING: Construction of strontium tantalate homo-semiconductor composite photocatalysts with tunable type II junction structure for overall water splitting, in: Catalysis Science & Technology 8 (12), 2018, S. 3025-3033.
164. SYNWOLDT, CHRISTIAN; NOVAK, DAVID: Wasserstoff. Technik - Projekte - Politik, Weinheim: Wiley 2022.
165. TAUSCH, MICHAEL W.: Photochemische cis-trans-Isomerisierung, in: Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (MNU) 40 (2), 1987, S. 92-103.
166. TAUSCH, MICHAEL W.; HEFFEN, MARIA; KRÄMER, RENÉ; MEUTER, NICO: Passendes Licht - Harmlose Stoffe, in: Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule, 64 (2), 2015, S. 45-49.
167. TEWARI, YADU B.; LANG, BRIAN E.; DECKER, STEPHEN R.; GOLDBERG, ROBERT N.: Thermodynamics of the hydrolysis reactions of 1,4-β-d-xylobiose, 1,4-β-d-xylotriose, d-cellobiose, and d-maltose, in: The Journal of Chemical Thermodynamics 40 (10), 2008, S. 1517-1526.
168. THÜRINGER MINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT UND KULTUR: Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Chemie, Erfurt 2012, online unter: https://www.schulportal-thueringen.de/tip/resources/medien/14475?dateiname=Lp_Chemie_Gymnasium_20_08_2013.pdf, (12.04.2024).
169. THÜRINGER MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE UND NATURSCHUTZ: Die Thüringer Nachhaltigkeitsstrategie 2018, Erfurt 2018; online unter: https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Nachhaltigkeit/Thuer_Nachhaltigkeitsstrategie_18_09_11_TNS.pdf, (13.03.2024).
170. THYSSENKRUPP: thyssenkrupp beschleunigt grüne Transformation: Bau der größten deutschen Direktreduktionsanlage für CO₂-armen Stahl entschieden, 08.09.2022,

- <https://www.thyssenkrupp.com/de/newsroom/pressemeldungen/presdetailseite/thyssenkrupp-beschleunigt-gruene-transformation--bau-der-grossten-deutschen-direktreduktionsanlage-fur-co2-armen-stahl-entschieden-146797>, (12.01.2024).
171. UEKERT, TAYLOR; DORCHIES, FLORIAN; PICHLER, CHRISTIAN; REISNER, ERWIN: Photoreforming of food waste into value-added products over visible-light-absorbing catalyst, in: Green Chemistry 22 (10), 2020, S. 3262-3271.
 172. UEKERT, TAYLOR; KASAP, HATICE; REISNER, ERWIN: Photoreforming of Nonrecyclable Plastic Waste over a Carbon Nitride/Nickel Phosphide Catalyst, in: Journal of the American Chemical Society 141 (38), 2019, S. 15201-15210.
 173. UMWELTBUNDESAMT (UBA): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2022, Dessau-Roßlau 2023; online unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_05_23_climate_change_20-2023_strommix_bf.pdf (18.07.2023).
 174. UMWELTBUNDESAMT (UBA): Erdüberlastungstag: Ressourcen für 2022 verbraucht, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/erdueberlastungstag-ressourcen-fuer-2022-verbraucht>, (Zugriff: 17.09.23).
 175. UMWELTBUNDESAMT (UBA): Soziale Aspekte der Verkehrswende, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/soziale-aspekte-der-verkehrswende#undefined>, (Zugriff: 10.01.2024).
 176. UMWELTBUNDESAMT (UBA): Wasserstoff - Schlüssel im künftigen Energiesystem, 2024, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluessel-im-kuenftigen-energiesystem#Industrie>, (12.04.24).
 177. UNITED NATIONS (UN): AGENDA 21, United Nations Conference on Environment & Development, Rio de Janeiro 1992; online unter: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>, (10.04.2024).
 178. UNITED NATIONS (UN): Report of the United Nations conference on environment and development (Rio declaration on environment and development), Rio de Janeiro 1992; online unter: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_CONF.151_26_Vol.I_Declaration.pdf, (10.04.2024).
 179. UNITED NATIONS (UN): Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly, New York 25.09.2015; online unter: <https://sdgs.un.org/2030agenda>, (12.03.2024).
 180. VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Photoreforming of Biomass - Producing Hydrogen from Sugar, in: World Journal of Chemical Education. 9(4), 2021, S. 130-135.
 181. VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Photoreformierung - grüner Wasserstoff aus Alkohol, Zucker und Stärke, in: CHEMKON 30 (6), 2023, S. 254-259.
 182. VENZLAFF, JULIAN; KOSUMI, KALTRINA; ZELLER, DIANA; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Education for Sustainable Development and Experiments involving Titanium Dioxide, World Journal of Chemical Education, 11 (3), S. 80-86.
 183. VEREINTE NATIONEN (UN): Agenda 21, Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung (Deutsche Übersetzung); <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/ag21dok/index.htm>, (10.04.2024).
 184. VERNE, JULES: Die geheimnisvolle Insel, Wien (u.a.): Hartleben´s Verlag 1876.

185. WDR (Quarks): Grüner Stahl, 2022, <https://www.ardmediathek.de/video/quarks/gruener-stahl/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWl5YTE5MzkxLWM0MjQtNGZhNS1hZTM0LWM2OWU1NWU3Mzg3Yw>, (12.04.2024).
186. WDR (Quarks): Wasserstoffauto gegen Elektromobil, 2022, <https://www.ardmediathek.de/video/quarks/wasserstoffauto-gegen-elektromobil/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWQzYjVINTI5LTMyMjktNDNINi1hNzQ4LWM0NGZkNjQwZDk4Yw>, (Zugriff: 10.01.2024).
187. WINKLER, JOCHEN: Titandioxid. Produktion, Eigenschaften und effektiver Einsatz, Hannover: Vincentz Network 2013.
188. WISSER, CAROLIN: Photoreformierung zur Erzeugung von grünem Wasserstoff - Erprobung des Umsatzes verschiedener Alkohole als Substrate und didaktische Perspektive, Bachelor-Thesis, Wuppertal 2024.
189. WUPPERTAL INSTITUT FÜR KLIMA, UMWELT, ENERGIE: Bewertung der Vor- und Nachteile von Wasserstoffimporten im Vergleich zur heimischen Erzeugung - Update. Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e.V., Wuppertal 2021.
190. WÖHRLE, DIETER; TAUSCH, MICHAEL W.; STOHRER, WOLF-DIETER: Photochemie. Konzepte, Methoden, Experimente, Weinheim (u.a.): Wiley-VCH 1998.
191. WOLF, INGO; FISCHER, ANNE-KATHRIN; HUTTARSCH, JEAN-HENRI (Herausgegeben von: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021, Potsdam 2021; online unter: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://ariadneprojekt.de/media/2021/08/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2021.pdf&ved=2ahUKEWj5-d-bxK2FAxUI_7sIHQImDL4QFnoECBEQAQ&usg=AOvVaw2C45wxzebsw-FhV-SDC-NE, (27.03.2024).
192. XU, XINYUAN; SHI, LEI; ZHANG, SHU; AO, ZHIMIN; ZHANG, JINQIANG; WANG, SHAOBIN; SUN, HONGQI: Photocatalytic reforming of lignocellulose: A review, in: Chemical Engineering Journal 469, 2023, S. 1-18.
193. YASUDA, MASAHIDE; TAKAYUKI, TOMO; SHOICHI, HIRATA; TSUTOMU, SHIRAGAMI; TOMOKO, MATSUMOTO: Neighboring Hetero-Atom Assistance of Sacrificial Amines to Hydrogen Evolution Using Pt-Loaded TiO₂-Photocatalyst, in: Catalysts 4(2), 2014, S. 162-173.
194. ZELLER, DIANA: Didaktische Erschließung von Titandioxid für den Chemieunterricht - Entwicklung und Optimierung von Experimenten, didaktischen Konzepten und Medien. Dissertation, Wuppertal 2019.
195. ZHAO, HENG; LIU, JING; ZHONG, NA; LARTER, STEVE; LI, YU; KIBRIA, GOLAM; SU, BAO-LIAN; CHEN, ZHANGXIN; HU, JINGUANG: Biomass Photoreforming for Hydrogen and Value-Added Chemicals Co-Production on Hierarchically Porous Photocatalysts, in: Advanced Energy Materials 13 (21), 2023, S. 1-23.
196. ZHENG, XIAN-JUN; WEI, LI-FANG; ZHANG, ZHI-HONG; JIANG, QIAO-JUAN; WEI, YONG-JIE; XIE, BING; WEI, MING-BAO: Research on photocatalytic H₂ production from acetic acid solution by Pt/TiO₂ nanoparticles under UV irradiation, in: International Journal of Hydrogen Energy 34 (22), 2011, S. 9033-9041.
197. ZHENG, YUN; LIN, LIHUA; WANG, BO; WANG, XINCHEN: Polymeres graphitisches Kohlenstoffnitrid für die nachhaltige Photoredoxkatalyse, in: Angewandte Chemie 127 (44), 2015, S. 13060-13077.

8.5. Publikationsverzeichnis

(Erscheinungsjahr absteigend)

1. KIESLING, ELISABETH; KREMER, RICHARD; PEREIRA VAZ, NUNO; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Wege aus der Klimakrise - ein BNE-Schülerlaborangebot mit mehrdimensionalem Zugang, in: MNU Journal 76 (06), 2023, S. 464-472.
2. VENZLAFF, JULIAN; KOSUMI, KALTRINA; ZELLER, DIANA; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Education for Sustainable Development and Experiments involving Titanium Dioxide, World Journal of Chemical Education, 11 (3), S. 80-86.
3. VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Photoreformierung - grüner Wasserstoff aus Alkohol, Zucker und Stärke, in: CHEMKON 30 (6), 2023, S. 254-259.
4. KIESLING, ELISABETH; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: BNE im Chemieunterricht - von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung, in: CHEMKON 29 (S1), 2022, S. 239-245.
5. VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Photoreforming of Biomass - Producing Hydrogen from Sugar, in: World Journal of Chemical Education. 9(4), 2021, S. 130-135.
6. KIESLING, ELISABETH; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: BNE und Chemieunterricht - BNE als roter Faden durch die Schulchemie und Beispiel einer Lerneinheit zur Klimawirksamkeit von Kohlenstoffdioxid, in: CHEMKON 30 (3), 2021, S. 96-102.
7. BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA; MEUTER, NICO; KREMER, RICHARD; PEREIRA VAZ, NUNO; VENZLAFF, JULIAN: Forschung trifft Schule - Chemie-Labothek als innovatives, vernetzendes Format, in: Marcus Kubsch, Stefan Sorge, Julia Arnold, Nicole Graulich (Hrsg.): Lehrkräftebildung neu gedacht, Münster: Waxmann 2021, S. 108-112.
8. GRANDRATH, REBECCA; ZELLER, DIANA; KREMER, RICHARD; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA; TAUSCH, MICHAEL W.: E³ - Energieumwandlung experimentell erleben, in: Naturwissenschaften im Unterricht Chemie 30 (4), 2019, S. 29-33.

Posterbeiträge

1. KIESLING, ELISABETH; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Wege aus der Klimakrise - Eine Schülerlaboreinheit zu BNE im Chemieunterricht, GDCh Wissenschaftsforum (WiFo) - Rethinking Chemistry, Leipzig September 2023.
2. VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: Photoreformierung – Wasserstoff aus Ethanol", 38. Fortbildungs- und Vortragstagung der GDCh FG Chemieunterricht – "Chemie nachhaltig kommunizieren, Osnabrück September 2022.
3. KIESLING, ELISABETH; VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE, CLAUDIA: BNE im Chemieunterricht - Von der Leitlinie BNE NRW zur exemplarischen Unterrichtseinbindung, 37. Fortbildungs- und Vortragstagung der GDCh FG Chemieunterricht, September 2021. Ausgewählt für einen Kurzvortrag als Spitzenposter und prämiert mit dem Posterpreis der GDCh FG Chemieunterricht-Tagung 2021.
4. VENZLAFF, JULIAN; BOHRMANN-LINDE-CLAUDIA: Versuche zur natürlichen Photosynthese - Der Klassiker im Experimentierparcours E³, GDCh Wissenschaftsforum (WiFo), Aachen September 2019.

9. Anhang

9.1. Verwendete Materialien und Chemikalien

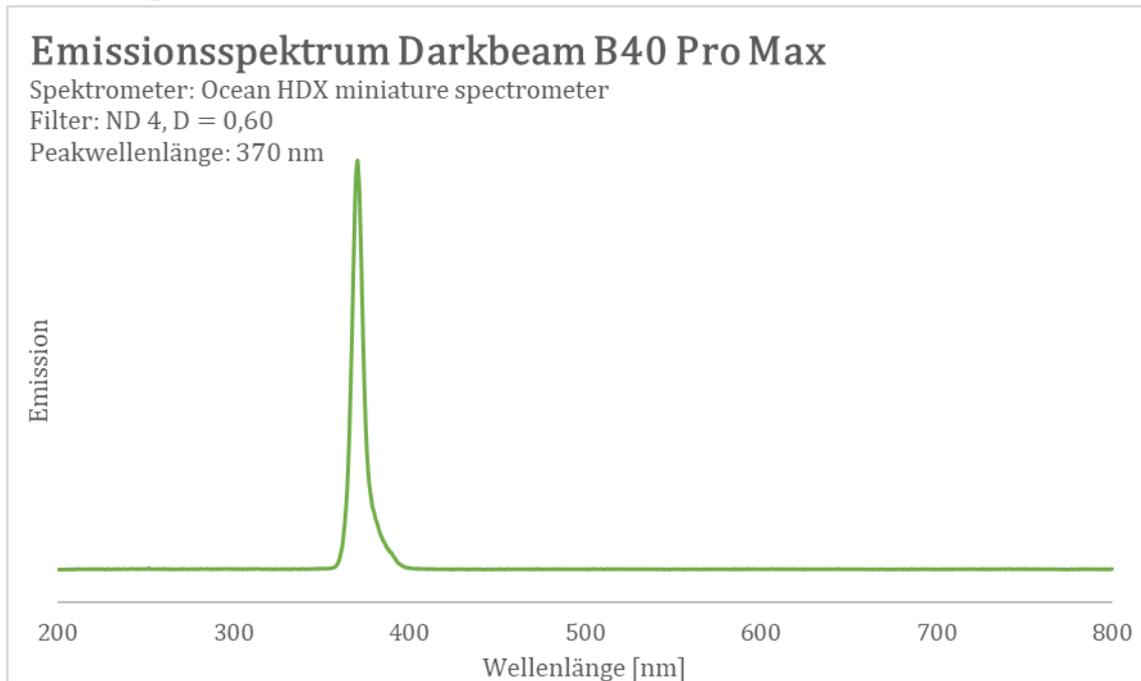
Materialkategorie	Bezeichnung	Hersteller/Modell	Bezugsquelle
Heiz-/Rührplatten	Heiz- und Magnetrührplatte	Neolab D-6010	Neolab
Glasgeräte	großes Reagenzglas (Quarzglas)	Neubert-Glas	Neubert-Glas
	Bechergläser (vers. Größen)	Schott	Altbestand
Lichtquellen	High Power LED 365 nm	Sahlmann, Photochemical Solutions	Sahlmann Photochemical Solutions
	SDO-UV365	SiDiOU Group	Amazon.de
	Darkbeam B40 Pro Max	Darkbeam	Amazon.de
	ULTRA VITALUX 300 W, 230 V, E27	Osram	Conrad
	WESLITE UV-365nm	WESLITE	Amazon.de
Gaschromatograph	GC 15 mit Standard-Säule (Belegung: Siliconöl OV101 (20%), Träger: Chromosorb WHSP 80-100 msh, Länge: 1,20 m).	AK Kappenberg	AK Kappenberg
	GC 2010 Pro mit Carboxen-Säule (Carboxen®-1010 Porous Layer Open Tubular Kapillar-GC-Säule, Länge: 30 m, innerer Durchmesser: 0,32 mm)	Shimadzu	Shimadzu
Spektrometer	Ocean HDX miniature spectrometer	OceanOptics	OceanOptics
Medizintechnik	Drei-Wege-Hahn, Luer-Lock (w/w/m)		LCEM GmbH
	Zwei-Wege-Hahn, Luer-Lock (w/m)		LCEM GmbH
	Injekt-Stopfen		LCEM GmbH

	Spritzen (vers. Größen)	Braun	Altbestand
	Kanülen (vers. Größen)	Braun	Altbestand
	Infusionsbeutel (150 mL)	Hemedis GmbH	Hemedis GmbH
Verschiedenes	durchbohrte Stopfen		Altbestand
	Ultraschallbad		Altbestand
	Rührfische		Altbestand

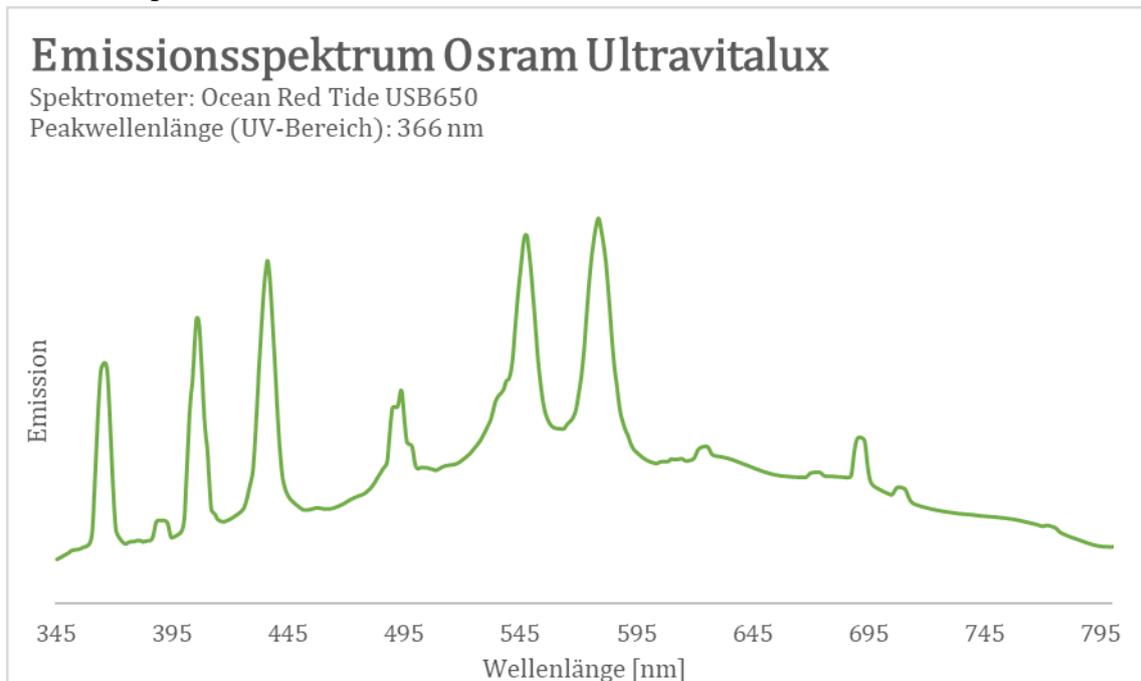
Chemikalie	Hersteller/Bezugsquelle	Gebinde	CAS-Nr.
Titandioxid, Aeroxide P25	Evonik	500 g	13463-67-7
Hexachloroplatinsäure	Sigma Aldrich	1 g	18497-13-7
Triethanolamin	Carl-Roth	500 mL	102-71-6
Methanol	Merck	1 L	67-56-1
Ethanol	Chemikalienlager Berg. Universität Wuppertal	2,5 L	64-17-5
D-(+)-Glukose	Sigma Aldrich	1 kg	50-99-7
Stärke	Altbestand	500 g	9005-25-8
Mikrokristalline Cellulose	GET-Reinigungsprodukte GbR	1 kg	9004-34-6
Schwefelsäure	Carl-Roth	1 L	7664-93-9
Salzsäure	Carl-Roth	1 L	7647-01-0
Wasserstoffgas	Altbestand		1333-74-0
Stickstoffgas	Altbestand		7727-37-9
Sauerstoffgas	Altbestand		7782-44-7
Kohlenstoffdioxidgas	Altbestand		124-38-9

9.2. Emissionsspektren der genutzten Lichtquellen

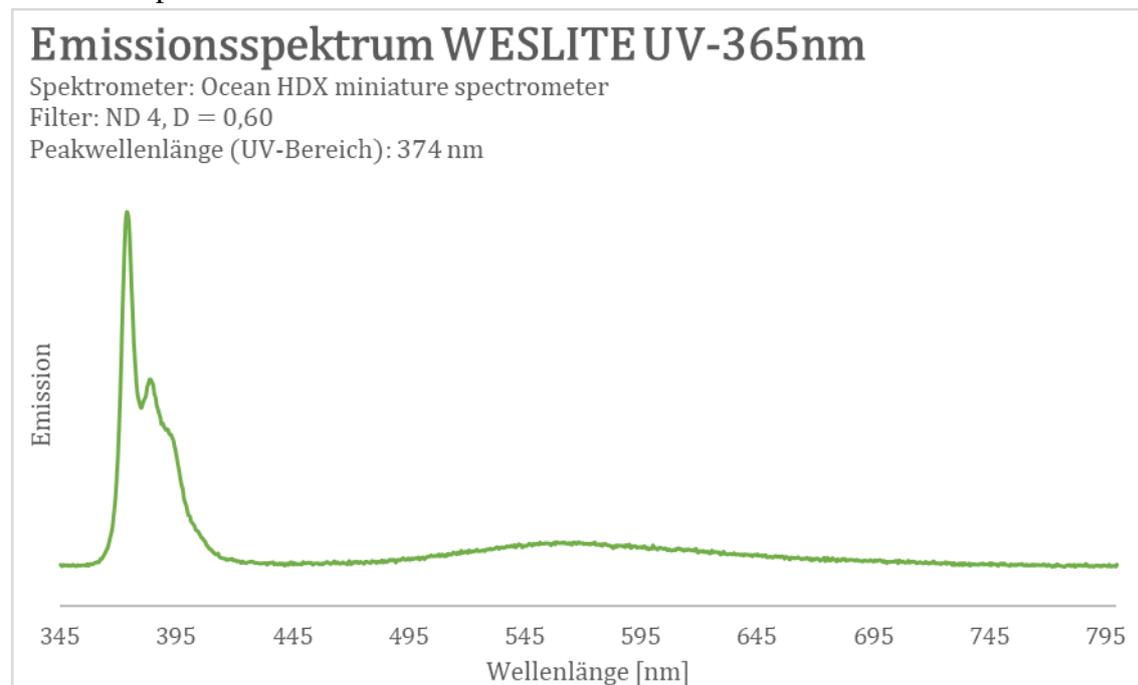
Emissionsspektrum Darkbeam B40 Pro Max



Emissionsspektrum Osram Ultravitalux



Emissionsspektrum WESLITE UV-365nm



High-Power-LED (3x365 nm; 3x1450 mW)

Peakwellenlänge: 367 nm

9.3. Gefährdungsbeurteilung Photoreformierung von Ethanol

Versuchsbeschreibung & Gefährdungsbeurteilung

Versuchs-Nr.: 33

Photoreformierung von Ethanol

Versuchs-Kategorie:

Versuchs-Typ: **Chemie**

Gerät

Waage, Ultraschallbad, großes Reagenzglas, Becherglas, Magnetrührplatte mit Rührfisch (kleine Form), durchbohrter Stopfen, 10-mL Spritze, 1-mL Spritze, Kanüle, Zweiwegehahn, Stativmaterial, Highpower-LEDs (365 nm), Gasbeutel mit Septum, Petrischale, Feuerzeug



Ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

Versuchsdurchführung

Photoreformierung von Ethanol

1. Wiegen Sie 50 mg des TiO₂/Pt-Katalysators in einem großen Reagenzglas ab.
2. Geben Sie eine Ethanol-Lösung (c = 1 mol/L) zum Katalysator hinzu und füllen Sie das Reagenzglas bis etwa 2 cm unterhalb des Randes auf.
3. Tauchen Sie das Reagenzglas mit der Suspension für 3 Minuten in ein Ultraschallbad.
4. eben Sie einen Rührfisch zur Suspension hinzu.
5. Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem durchbohrten Stopfen, in den eine 1-mL Spritze mit aufgesetztem Zweiwegehahn gesteckt ist.
6. Spannen Sie das Reagenzglas mit dem befestigten Aufsatz in eine Stativklammer über einer Magnetrührplatte ein.
7. Setzen Sie eine 10-mL Spritze auf den Zweiwegehahn auf. Der Stempel der Spritze sollte nach unten gedrückt sein.
8. Spannen Sie eine weitere Stativklammer unmittelbar über dem Stopfen ein, sodass dieser fest auf den Reagenzglas sitzt.
9. Schalten Sie die Magnetrührplatte ein (mind. 300 U/min).
10. Schalten Sie anschließend die Highpower-LEDs (365 nm) zur Bestrahlung der Suspension ein (mind. 30 min).

Untersuchung der Gasprobe

Schließen Sie nach der Bestrahlung den Zweiwegehahn. Nehmen Sie nun die 10-mL Spritze mit dem Zweiwegehahn von der 1-mL Spritze ab und setzen Sie eine Kanüle auf den Zweiwegehahn. Falls sich noch etwas Flüssigkeit in der Spritze befinden sollte, nehmen sie die Kappe der Kanüle ab und halten die Spritze senkrecht nach unten. Öffnen Sie den Zweiwegehahn und entlassen Sie durch vorsichtigen Druck auf den Kolben der Spritze die restliche Flüssigkeit auf ein Papierhandtuch. Schließen Sie nun den Zweiwegehahn wieder.

Entnehmen Sie die berechnete Menge an Sauerstoffgas aus dem bereitgelegten Gasbeutel. Hierfür stechen Sie die Kanüle in das an den Gasbeutel angeschlossene Septum (gelb). Öffnen Sie den Zweiwegehahn und ziehen Sie in die Spritze die benötigte Menge an Sauerstoff auf. Füllen Sie in eine Petrischale etwa 0,5 cm hoch Seifenlösung. Führen Sie die Kanüle in die Seifenlösung ein und formen Sie eine etwa 0,5 mL große Gasblase (Abb. 1). Zünden Sie mithilfe eines Feuerzeugs die Gasblase.

Gefährdungen durch:

Stoffliche Eigenschaften	vorhanden
KMR-Stoff 1A/1B	<input type="checkbox"/>
durch Einatmen	<input type="checkbox"/>
durch Hautkontakt	<input type="checkbox"/>
durch Augenkontakt	<input checked="" type="checkbox"/>
Brandgefahr	<input checked="" type="checkbox"/>
Explosionsgefahr	<input checked="" type="checkbox"/>
Infektionsgefahr	<input type="checkbox"/>

weitere Gefährdungen

weitere Gefahren und Hinweise

Tätigkeitsbeschränkung:

Schülerversuch ab Jahrgangsstufe 5

Schutzmaßnahmen

							
Schutzbrille	Schutzhandschuhe	Abzug	Lüftungsmaßnahmen	geschlossenes System	Brandschutzmaßnahmen	Sicherheitswerkbank	Laborkittel
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Weitere Schutzmaßnahmen

Chemikalien

Stoffbezeichnung - ZVG	Anmerkung	Signalwort	Piktogramm	H-Satz	P-Satz	Tätigkeit	Typ
Ethanol 10% - 10420.002		ACHTUNG	 	H226 H319	P210 P240 P403+P233 P305+P351+P338	S4K	Edukt
Sauerstoff, Druckgas - 7080	im Gasbeutel	GEFAHR	 	H270 H280	P220 P244 P403 P370+P376	S4K	Edukt
Acetaldehyd <0,1% in Ethanol - 12760.003	geringe Mengen	GEFAHR	 	H225 H319	P210 P403+P233 P305+P351+P338	S4K	Produkt
Essigsäure 0,1M - 11400.002	geringe Mengen	-				+	Produkt
Wasserstoff - 7010.002	20 mL	GEFAHR		H220	P210 P377 P381 P403	S4K	Produkt

Biostoffe/Organismen

Es werden keine Biostoffe/Organismen verwendet.

Sicherheitshinweise

Persönliche Schutzausrüstung



Eine **Gestellsschutzbrille** ist zu tragen.

Verhalten im Gefahrenfall

Entstehungsbrände: Entstehungsbrände mit Feuerlöscher bekämpfen. Schülerinnen und Schüler halten sicheren Abstand. Können diese nicht sofort gelöscht werden, Raum unverzüglich verlassen und Feuerwehr sowie Schulleitung alarmieren. Personenbrände mit Handbrause oder ggf. Feuerlöscher unverzüglich bekämpfen, hier zählt jede Sekunde!

Entsorgung

Alle Lösungen können in den Abguss entsorgt werden.
Der Katalysator wird abfiltriert und das Filtrat in das Waschwasser gegeben werden.

⇌ Substitution

Gefahrstoffe

Es ist keine weitere Prüfung erforderlich, da keine Gefahrstoffe für das Experiment verwendet werden oder entstehen.

Literatur

keine Angaben

Versuch wird in folgendem Raum durchgeführt:

💬 Weitere Anmerkungen zum Versuch

Eine detaillierte Versuchsanleitung finden Sie unter:
Aufgaben_Material_Photoreformierung_von_Ethanol.pdf (uni-wuppertal.de)

Datum: _____

Unterschrift: _____

9.4. Begleitmaterialien zum Versuch Photoreformierung

Photoreformierung

Wasserstoff aus Ethanol

Arbeitsmaterialien

Waage, Ultraschallbad, großes Reagenzglas (Quarzglas), Becherglas, Magnetrührplatte, Rührfisch (kleine Form), durchbohrter Stopfen, 10-mL-Spritze, 1-mL-Spritze, Kanüle, Zweigegehahn, Stativmaterial, Highpower-LED (365 nm), Gasbeutel mit Septum, Petrischale, Feuerzeug

Chemikalien

Ethanol-Lösung (10 Vol.-%)
TiO₂/Pt-Katalysator
Seifenlösung

Versuchsskizze



Versuchsdurchführung I – Herstellung von Wasserstoffgas

V 1.1 Führen Sie den Versuch entsprechend der Anleitung Schritt für Schritt durch.



1 Wiegen Sie 50 mg des TiO₂/Pt-Katalysators in einem großen Reagenzglas ab.

2 Geben Sie eine Ethanol-Lösung ($c = 1 \text{ mol/L}$) zum Katalysator hinzu und füllen Sie das Reagenzglas bis etwa 2 cm unterhalb des Randes auf.

3 Tauchen Sie das Reagenzglas mit der Suspension für 3 Minuten in ein Ultraschallbad.

4 Geben Sie einen Rührfisch in die Suspension.



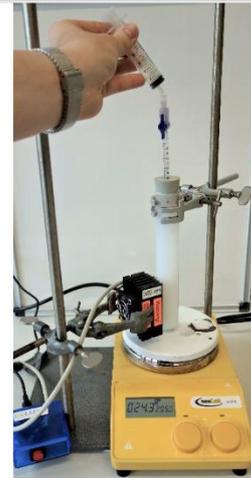
5

Verschließen Sie das Reagenzglas mit einem durchbohrten Stopfen, in den eine 1-mL-Spritze mit aufgesetztem Zweiweghahn gesteckt ist.



6

Spannen Sie das Reagenzglas mit dem befestigten Aufsatz in eine Stativklemme über einer Magnet-rührplatte ein.



7

Setzen Sie eine 10-mL-Spritze auf den Zweiweghahn auf. Der Stempel der Spritze muss nach unten gedrückt sein.



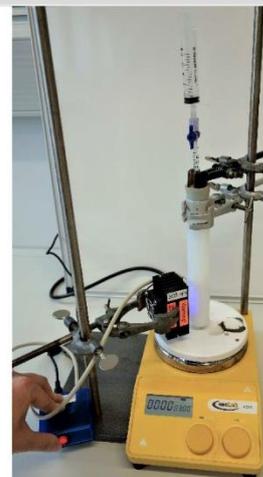
8

Befestigen Sie eine weitere Stativklemme unmittelbar über dem Stopfen, sodass dieser fest auf dem Reagenzglas sitzt.



9

Schalten Sie die Magnet-rührplatte ein (300 U/min).



10

Schalten Sie anschließend die Highpower-LED (365 nm) zur Bestrahlung der Suspension ein. Bestrahlen Sie so lange, bis Sie **mindestens 4 mL Gas** aufgefangen haben.

Seite 2 von 11

A 3.2 Beziehen Sie Stellung zu der Aussage, dass wasserstoffbasierte Antriebe (bspw. in Brennstoffzellenautos) gegenüber Elektroantrieben in Zukunft grundsätzlich bevorzugt werden sollten. Nutzen Sie hierfür Ihre Ergebnisse aus **Aufgabe 3.1**, den Infos „**Wirkungsgrade im Vergleich**“ und „**Wasserstoff im Nah- und Fernverkehr**“ sowie die Informationen, die Sie aus dem **Video** erhalten.

Individuelle Aufgabenstellung

Bestimmte Aspekte sollten jedoch berücksichtigt werden:

- Bereitstellung der Energieträger muss berücksichtigt werden
- Elektroantriebe sind prognostiziert mit geringeren THG-Emissionen verbunden als Brennstoffzellenfahrzeuge
- Wirkungsgrade bei PKW mit Elektroantrieben höher als bei Brennstoffzellenfahrzeugen (aber: Brennstoffzellenfahrzeuge im Vorteil gegenüber klassischen Verbrennern)
- Elektroantriebe mit Vorteilen im Nah- und Individualverkehr
- Brennstoffzellenfahrzeuge mit Vorteilen im Fernverkehr und Gütertransport
- Insgesamt kann nicht auf eine Antriebsform alleine gesetzt werden, eine ausgewogene Mischung ist entscheidend

A 3.3 Vergleichen Sie mithilfe der Materialien auf den folgenden Seiten die Kosten für die Anschaffung und den Unterhalt bei klassischen Verbrennern, Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen. Beziehen Sie Stellung dazu, inwieweit die Energiewende im Individualverkehr für verschiedene Bevölkerungsschichten umsetzbar ist. Geben Sie Vorschläge, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Sorgen der Menschen zu berücksichtigen.

Individuelle Aufgabenstellung

Bestimmte Aspekte sollten jedoch berücksichtigt werden:

- Autobesitz von sozioökonomischen Status abhängig
- Kosten bei E-Autos höher als bei klassischen Verbrennern
- Brennstoffzellenfahrzeuge mit den höchsten Kosten
- Unterhalt mit höheren Kosten verbunden bei Verbrennern und Brennstoffzellenfahrzeugen
- Verkehrswende/Mobilitätskosten mit Sorgen vor allem für Bevölkerungsschichten verbunden, die der Einkommensschwächeren Hälfte angehören
- Vorschläge: *individuell*

Zusatz Diskutieren Sie auf Basis der von Ihnen bearbeiteten Aufgaben und erarbeiteten Informationen, inwieweit Wasserstoff als Energieträger der Zukunft angesehen werden kann und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit Wasserstoff in Verkehr und Industrie aus einer ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Perspektive nachhaltig eingesetzt werden kann.

Individuelle Aufgabenstellung

Bestimmte Aspekte sollten jedoch berücksichtigt werden:

- Herstellungswege des Wasserstoffs müssen berücksichtigt werden
- Bedeutung unterschiedlicher Herstellungswege für die Umwelt und Industrie
- soziale Aspekte berücksichtigen
- Umgestaltung des Verkehrssektors

Auswertung - Gaschromatografie der Gasprobe

Info Gaschromatografie (GC)

Ein analytisches Verfahren, unbekannte Gasproben auf ihre Zusammensetzung zu untersuchen, ist die **Gaschromatografie**. Hierbei wird eine Gasprobe in eine sogenannte **Säule** eingespritzt. Durch die Säule wird ein **Trägergas** (bspw. Stickstoff) geleitet, das die Gasprobe weitertransportiert. Je nach Bestandteilen, aus denen sich die Gasprobe zusammensetzt, verbleiben diese kürzer oder länger in der Säule, da sie unterschiedlich stark mit den Stoffen in der Säule wechselwirken. Am Ende der Säule kann über einen **Detektor** bestimmt werden, wie lange eine oder mehrere Komponenten einer Gasprobe benötigen, um durch die Säule zu gelangen. Werden im Anschluss Gasproben untersucht, bei denen Zusammensetzung und Komponenten bekannt sind, können diese Chromatogramme mit denen der unbekanntes Gasprobe verglichen werden. Die Messungen können anschließend grafisch ausgewertet werden. Über die Größe der Flächen unterhalb der Grafen lassen sich die Gasanteile in einer bekannten Probe bestimmen.

A 1.1 Abb. 2 & 3 zeigen zwei Gaschromatogramme. Es wurden sowohl reines Wasserstoffgas (Vergleichsprobe) als auch eine nach der Bestrahlung entnommene Gasprobe untersucht. Berechnen Sie mithilfe der angegebenen Werte, welcher Anteil an Wasserstoff in der Gasprobe vorliegt.

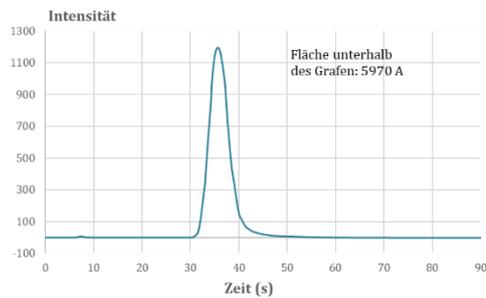


Abbildung 2: Diagramm der GC-Untersuchung von Wasserstoffgas (Vergleichsprobe)

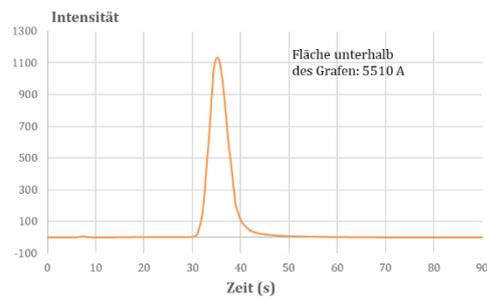


Abbildung 3: Diagramm der GC-Untersuchung der Gasprobe



Auswertung

A 1.2 Lesen Sie zunächst die Info „Photoreformierung“. Ergänzen Sie dann in Abb. 7 die fünf freien Felder mit den entsprechenden Formeln für die Photoreformierung von Ethanol. Benennen Sie zudem, bei welchen Reaktionen es sich um eine Oxidation oder eine Reduktion handelt.

Info Photoreformierung

Photoreformierung bezeichnet einen Prozess, bei dem aus unterschiedlichen Ausgangs-stoffen (Substraten) mithilfe eines **Photokatalysators** Wasserstoff gewonnen werden kann.

Vorgänge am Photokatalysator

Durch einen Photokatalysator (bspw. Titandioxid, TiO_2) wird zunächst Licht absorbiert (Abb. 3). Dabei geht ein Elektron aus dem Valenz- in das Leitungsband über. Es bildet sich ein Elektron-Loch-Paar (Abb. 4). Das Loch im Valenzband wird durch ein Elektron eines Donator-Teilchens gefüllt. Dabei wird der Donator oxidiert. Das Elektron im Leitungsband wird an ein Akzeptor-Teilchen übertragen, welches dadurch reduziert wird (Abb. 5).

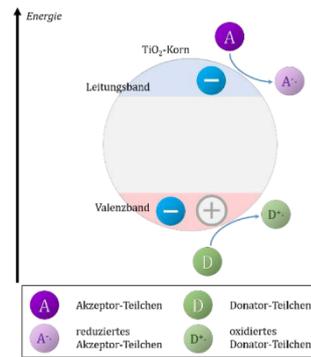
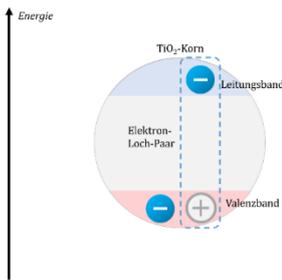
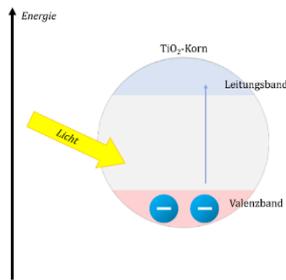


Abbildung 4: Absorption von Licht durch den Photokatalysator

Abbildung 5: Elektron-Loch-Paar

Abbildung 6: Reduktion und Oxidation am Photokatalysator

Einsatz eines Co-Katalysators

Zur Steigerung der Ausbeute von Wasserstoff kann Titandioxid mit geringen Mengen an Platin oder Gold belegt werden. Danach werden die Elektronen vom Leitungsband auf diese Metallpartikel übertragen, um eine vorzeitige Rekombination von Elektron-Loch-Paaren zu verhindern. Die Elektronen werden vom Platinpartikel auf Protonen übertragen. Es entstehen Wasserstoff-Moleküle. Um die entstandenen Löcher im Valenzband zu füllen, eignen sich Substrat-Moleküle, die eine oder mehrere Hydroxy-Gruppen besitzen, besonders gut. Somit können Alkohole, Zucker oder Stärke und sogar Cellulose genutzt werden. Auch Wasser-Moleküle können Elektronen übertragen, wobei Hydroxy-Radikale ($\cdot OH$) und Protonen gebildet werden. Da die Substrate in wässrigen Lösungen vorliegen, findet diese Reaktion ebenfalls in einem geringen Umfang statt.

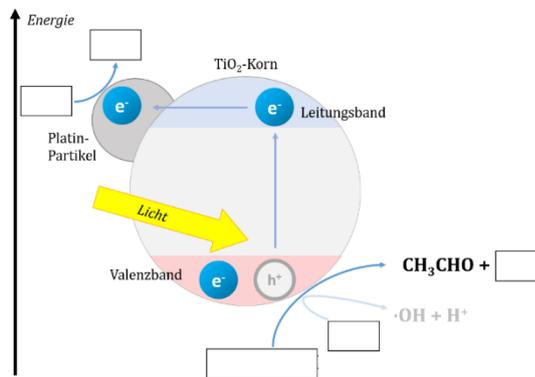


Abbildung 7: Photoreformierung von Ethanol

Wasserstoff – ein CO₂-neutraler Energieträger?

Info Wasserstoff lässt sich über verschiedene Wege industriell herstellen. Dem Wasserstoff wird eine Farbe zugeordnet, je nachdem, wie er produziert wurde. Dabei spielen vor allem die Ausgangsstoffe eine Rolle und mit wie vielen Emissionen an Kohlenstoffdioxid in die Umwelt zu rechnen ist.

A 2.1 Vergleichen Sie tabellarisch die „Farben“ des Wasserstoffs, indem Sie den CO₂-Ausstoß, die eingesetzten Ausgangsstoffe, Herstellungswege und den Einsatz in der Industrie gegenüberstellen.

A 2.2 Begründen Sie, welcher Farbe Sie die Wasserstoffherstellung durch Photoreformierung zuordnen würden.

Grüner Wasserstoff

Hierbei handelt es sich um Wasserstoff, das durch Elektrolyse von Wasser gewonnen wird. Entscheidend ist allerdings bei diesem industriellen Produktionsweg, dass der Strom zur Elektrolyse aus erneuerbaren Energien (Solar oder Wind) gewonnen wird. Ebenfalls hinzugezählt wird die Herstellung von Wasserstoff durch Fermentation von Biomasse und der Nutzung dieser für mikrobielle Brennstoffzellen. Grüner Wasserstoff wird als CO₂-neutral klassifiziert. Allerdings werden die genannten Herstellungswege in der Industrie noch nicht großflächig eingesetzt.

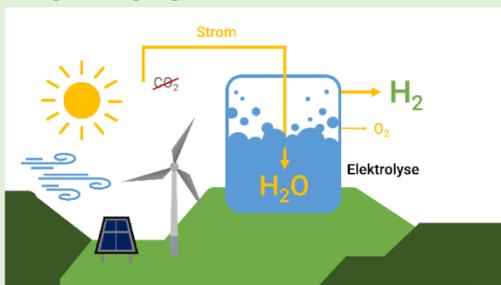


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

Blauer Wasserstoff

Wasserstoff, dessen Erzeugung mit einem CO₂-Abscheidungs- und Speicherverfahren verbunden ist (*Carbon Capture and Storage, CCS*), wird als blauer Wasserstoff bezeichnet. Bei der Herstellung werden vor allem Erdgas oder Biogas durch Dampfreformierung zu Wasserstoffgas und CO₂ umgesetzt. Das entstandene CO₂ gelangt jedoch nicht in die Atmosphäre, sondern wird bspw. in ehemaligen Erdöl- oder Erdgasfeldern unter der Erde gespeichert, wodurch dieser Prozess als CO₂-neutral gilt.

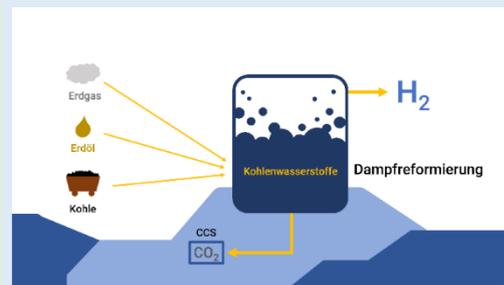


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

Türkiser Wasserstoff

Türkiser Wasserstoff wird durch thermische Spaltung von Methan (Methanpyrolyse) hergestellt. Ausgangsstoff ist Erdgas. Neben Wasserstoff entsteht zudem fester Kohlenstoff. Dieser Kohlenstoff kann anschließend eingelagert werden. Voraussetzung für die CO₂-Neutralität dieses Prozesses ist neben der dauerhaften Speicherung des Kohlenstoffs auch die Energieversorgung des Hochtemperaturreaktors durch Einsatz erneuerbarer Energiequellen. Aktuell wird an diesem Produktionsweg weiter geforscht, um ihn in größerem industriellem Maßstab nutzen zu können.

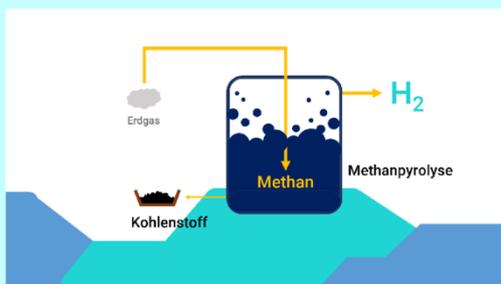


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

Grauer Wasserstoff

Über Dampfreformierung fossiler Energieträger (Erdgas, Erdöl, Kohle) wird aktuell ein Großteil des industriell hergestellten Wasserstoffs gewonnen. Mithilfe eines Katalysators wird bei hohem Druck (15 - 25 bar) und hohen Temperaturen (750 °C - 1000 °C) die Produktion durchgeführt. Dieser Wasserstoff wird als grauer Wasserstoff bezeichnet und ist mit einer großen Menge an CO₂-Emissionen verbunden.

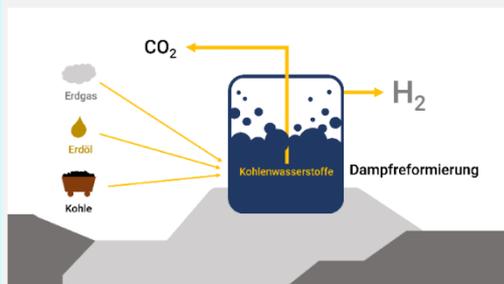


Abbildung nach: <https://www.enbw.com/unternehmen/eco-journal/wasserstoff-farben.html>

Wasserstoff – Energieträger der Zukunft?

Wasserstoff und Mobilität

Seit mehreren Jahren ist der Einsatz von Wasserstoff verstärkt Gegenstand politischer und gesellschaftlicher Diskussionen im Rahmen des Umstiegs von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern. Dabei werden vor allem elektrische und wasserstoffbasierte Antriebe gegenübergestellt. Doch worin liegen überhaupt Vorteile oder Nachteile für die verstärkte Nutzung von Wasserstoff? Und scheint eine Fokussierung auf entweder die eine oder die andere Antriebsvariante im Verkehrssektor sinnvoll?

A 3.1 Diagramme 1 & 2 zeigen die Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb und wasserstoffbasierten Brennstoffzellen in Bezug auf Energieform sowie die Herstellung der Batterien bzw. Brennstoffzellen. Vergleichen Sie die Diagramme 1 & 2 und notieren Sie stichpunktartig die drei Ihrer Meinung nach wichtigsten Unterschiede bei den Treibhausgasemissionen beider Antriebsformen, die für die nächsten beiden Jahrzehnte angenommen werden.

Legende:

FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle, *Brennstoffzellenfahrzeug*

NG: natural gas/Erdgas, H₂ aus Erdgasdampfpreformierung,

Wind: H₂ aus Elektrolyse mit Windstrom

BEV-60kWh: Battery Electric Vehicle, *Elektroauto*

PV: Photovoltaik

Strommix: Strom aus erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Energieträgern

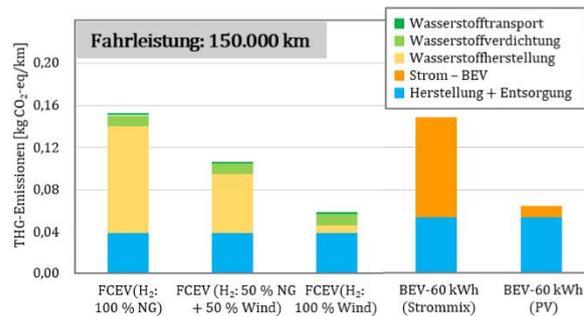


Diagramm 1: Treibhausgasemissionen bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Elektroautos (2020-2030) [1]

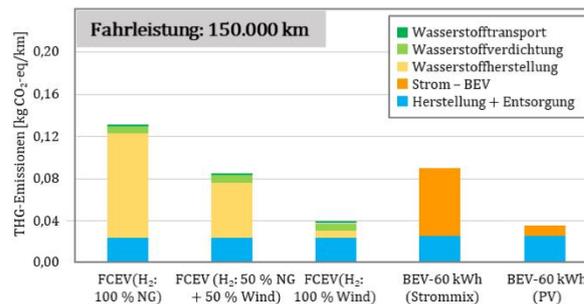


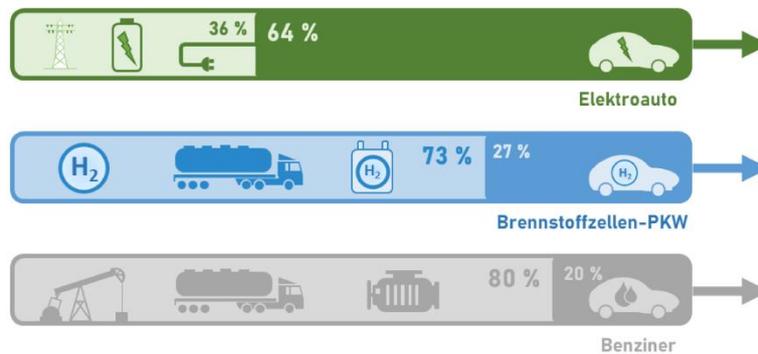
Diagramm 2: Treibhausgasemissionen bei Fahrzeugen mit Brennstoffzellen und Elektroautos (2030-2040) [1]

[1] Abbildung nach: Hebling, C., Sternberg, A., Hank, C.: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Freiburg 2019. https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/news/2019/ISE_Ergebnisse_Studie_Treibhausgasemissionen.pdf, (Zugriff: 12.04.2024).

A 3.2 Beziehen Sie Stellung zu der Aussage, dass wasserstoffbasierte Antriebe (bspw. in Brennstoffzellenautos) gegenüber Elektroantrieben in Zukunft grundsätzlich bevorzugt werden sollten. Nutzen Sie hierfür Ihre Ergebnisse aus **Aufgabe 3.1**, den Infos „**Wirkungsgrade im Vergleich**“ und „**Wasserstoff im Nah- und Fernverkehr**“ sowie die Informationen, die Sie aus dem **Video** erhalten.

Info **Wirkungsgrade im Vergleich**

Die Effizienz von Antrieben lässt sich am besten über ihren Wirkungsgrad vergleichen. Dieser zeigt, wie viel der zugeführten Energie für die eigentliche Fortbewegung des Fahrzeugs eingesetzt wird.



Der Wirkungsgrad zeigt, wie viel der zugeführten Energie bei der Fortbewegung des Fahrzeugs umgesetzt wird. Bei Strom wird von solchem aus erneuerbaren Energien ausgegangen. In der Abbildung wird rechts der Anteil der Energie gezeigt, der tatsächlich zur Fortbewegung genutzt wird, und links der Anteil der Energie, der auf dem Weg von der Energiequelle bis zum Rad (Well-to-Wheel) verloren geht.

Abbildung und Text nach: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Effizienz und Kosten: Lohnt sich der Betrieb eines Elektroautos?, <https://www.bmuv.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/elektromobilitaet/effizienz-und-kosten> (Zugriff: 12.04.24).

Info **Wasserstoff im Nah- und Fernverkehr**

Journalist Jannis Carmesin zum Thema Wasserstoff und Energiewende, Ausschnitt aus dem Artikel „Ist Wasserstoff der Alleskönner für die Energiewende?“ der Plattform Quarks der WDR-Doku-Redaktion:

„[...] Während vor einigen Jahren teilweise noch von einer vollständigen Wasserstoffwirtschaft fantasiert wurde, weiß man mittlerweile: Wegen seiner Effizienzprobleme ist Wasserstoff in vielen Einsatzgebieten auch in Zukunft kaum sinnvoll nutzbar.

Als Faustregel gilt: Wo immer sie möglich ist, lohnt sich eher die direkte Nutzung von Strom. Das gilt nach Meinung der meisten Forschenden zum Beispiel für den Pkw: Um eine Strecke X zurückzulegen, braucht ein Wasserstoffauto mit Brennstoffzelle laut dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung mehr als doppelt so viel Primärenergie wie das E-Auto mit Akku. Nutzt man den Wasserstoff für die Produktion von synthetischem Kraftstoff, um damit Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren anzutreiben, ist sogar etwa die fünffache Menge an Energie nötig.

In anderen Bereichen dürfte Wasserstoff hingegen eine Schlüsselrolle für den Klimaschutz einnehmen; etwa dort, wo eine Nutzung von grünem Direktstrom ökonomisch unsinnig oder technisch unmöglich ist und auch sonst wenige klimafreundliche Alternativen bleiben.

Für große Fahrzeuge, die lange Strecken zurücklegen müssen, könnte Wasserstoff zum Beispiel wichtig werden, weil Akkus ihren Energiebedarf mittelfristig nicht decken werden. Logistikunternehmen können sich beispielsweise kaum erlauben, dass ihre Lkw nach wenigen Hundert Kilometern erst einmal eine Stunde an der Ladesäule verbringen müssen, ehe sie weiterfahren können. Frachtschiffe oder Flugzeuge, die den Atlantik überqueren, haben gar überhaupt keine Lademöglichkeit. Für sie könnte die Nutzung von Wasserstoff beziehungsweise synthetischen Kraftstoffen auf Basis von Wasserstoff die einzige umweltverträgliche Alternative zu fossilen Kraftstoffen sein. [...]“

Jannis Carmesin: Ist Wasserstoff der Alleskönner für die Energiewende?, Quarks, <https://www.quarks.de/technik/energie/was-die-allzweckwaffe-fuer-die-energie-wende-leisten-kann/> (Zugriff: 02.06.22).

Video Wasserstoff vs. Elektromobil (1:51 min)



<https://www.ardmediathek.de/video/quarks/wasserstoffauto-gegen-elektromobil/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWQzYjVINTI5LTMyMjktNDNi1hNzQ4LWM0NGZkNjQwZDk4Yw> (12.04.2024)

Info Brennstoffzellen- und Elektroautos – eine sozial gerechte Verkehrswende?

Neben ökologischen und ökonomischen Blickwinkeln ist eine gesellschaftspolitische Sicht auf die Energiewende notwendig. Hierbei stellt sich unter anderem die Frage, welche soziale Dimension mit der Energiewende im Verkehrssektor einhergeht.

A 3.3 Vergleichen Sie mithilfe der Materialien auf den folgenden Seiten die Kosten für die Anschaffung und den Unterhalt klassischer Verbrenner, Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen. Beziehen Sie Stellung dazu, inwieweit die Energiewende im Individualverkehr für verschiedene Bevölkerungsschichten umsetzbar ist. Geben Sie Vorschläge, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Sorgen der Menschen zu berücksichtigen.

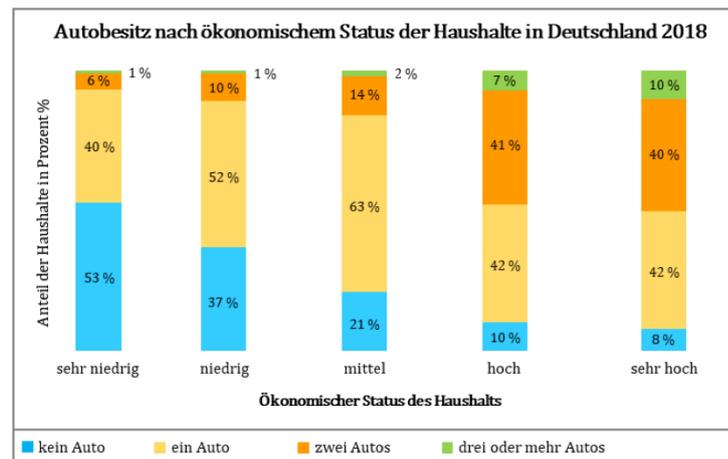


Diagramm 3: Autobesitz in Deutschland nach ökonomischem Status der Haushalte 2018

Quelle: Umweltbundesamt, basierend auf Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BfV): Mobilität in Deutschland - Kurzreport Verkehrsaufkommen - Struktur - Trends 2019, (durchgeführt von: infas, DLR, IVT und infas), S. 11.

Quelle Abbildung nach: Umweltbundesamt: Autobesitz nach ökonomischem Status der Haushalte in Deutschland 2018; <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/nachhaltige-mobilitaet/soziale-aspekte-der-verkehrswende#warum-unser-jetziges-verkehrssystem-weder-nachhaltig-noch-gerecht-ist>, (Zugriff: 12.04.2024).

	Verbrenner (Benzin)	E-Auto	Brennstoff- zellenauto
durchschnittlicher Anschaffungspreis Kleinwagen	14.990 € - 17.910 €	22.750 € - 29.990 € *	- **
durchschnittlicher Anschaffungspreis Mittelklassewagen	31.660 € - 41.940 €	35.790 € - 47.900 € *	65.990 € - 77.300 €

* Förderprämien für Elektroautos von bis zu 6570 Euro sind vom Preis abgezogen

** Stand April 2024 gibt es keine in Deutschland zugelassenen Kleinwagenmodelle mit Brennstoffzellen

Tabelle 1: Kosten der Anschaffung von Verbrennern (Benzin), Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen im Vergleich

Quelle: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-elektroautos/> (Zugriff: 12.04.2024), <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-mittelklasse-autos/> (Zugriff: 12.04.2024), <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-nexo/> (Zugriff: 12.04.2024), <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/toyota/toyota-mirai/> (Zugriff: 12.04.2024), <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/auto-kaufen-verkaufen/autokosten/guenstigste-kleinstwagen-autokosten/>, (Zugriff: 12.04.2024).

	Kleinwagen/Kompaktklasse	Mittel-/Oberklasse
Super E5	11,07	13,93
Super E10	10,74	13,51
Diesel	8,21	9,08
Strom	5,26	5,37
Wasserstoff	-	11,08

Tabelle 2: Energiekostenvergleich für Pkw in €/100 km (Stand: Dez. 2022).

Quelle: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/2021-08-pkw-energiekostenvergleich.html>, (Zugriff: 04.01.2024).

Stellen die Mobilitätskosten für Ihren Haushalt eine Belastung dar?



Antwortkategorien:

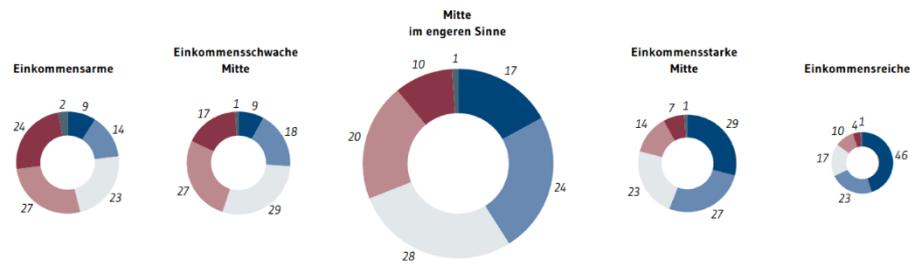
■ überhaupt keine finanzielle Belastung (1) ■ (2) ■ (3) ■ (4) ■ (5) ■ (6) ■ sehr hohe finanzielle Belastung (7) ■ weiß nicht/keine Angabe

Basis: 2021: n = 5.965 | Datenquelle: IASS | Angaben in Prozent | Abweichungen von 100 Prozent rundungsbedingt

Diagramm 4: Sorgen der Bevölkerung (2021) (1)

Quelle: Wolf, Ingo; Fischer, Anne-Kathrin; Huttarsch, Jean-Henri (Herausgegeben von: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021, Potsdam 2021, S. 49; online unter: https://ariadneprojekt.de/media/2021/08/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2021.pdf, (27.03.2024)..

Wie besorgt sind Sie, falls überhaupt, dass künftig die alltäglichen Mobilitätskosten für Ihren Haushalt zu hoch werden könnten?



Antwortkategorien:
 ■ überhaupt nicht besorgt (1) ■ (2) ■ (3) ■ (4) ■ sehr besorgt (5) ■ weiß nicht/keine Angabe

Basis: 2021; n = 5.965 | Datenquelle: IASS | Angaben in Prozent | Abweichungen von 100 Prozent rundungsbedingt

Diagramm 5: Sorgen der Bevölkerung (2021) (2)

Quelle: Wolf, Ingo; Fischer, Anne-Kathrin; Huttarsch, Jean-Henri (Herausgegeben von: Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)): Soziales Nachhaltigkeitsbarometer der Energie- und Verkehrswende 2021, Potsdam 2021, S. 49; online unter: https://ariadneprojekt.de/media/2021/08/Soziales_Nachhaltigkeitsbarometer_2021.pdf, (27.03.2024)...

Zusatz Diskutieren Sie auf Basis der von Ihnen bearbeiteten Aufgaben und erarbeiteten Informationen, inwieweit Wasserstoff als Energieträger der Zukunft angesehen werden kann und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit Wasserstoff in Verkehr und Industrie aus einer ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Perspektive nachhaltig eingesetzt werden kann.

Nutzen Sie hierfür auch die folgenden Informationen:

Info **Wasserstoff als Weg zur CO₂-Senkung?**
 Durch die Umstellung auf erneuerbare Energien kann es gelingen, die energiebedingten Treibhausgasemissionen im Bereich der industriellen Produktion vollständig zu vermeiden. Für den Klimaschutz müssen Industrieprozesse jedoch nicht nur vollständig auf erneuerbare Energieträger umgestellt, sondern es muss auch ein Großteil des industriellen Anlagenparks auf treibhausgasarme Produktionsverfahren umgebaut und weiterentwickelt werden, um auch die rohstoff- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen möglichst weitgehend zu mindern. Für einen effizienten Einsatz von Energie und natürlichen Ressourcen muss wie in den anderen Anwendungsbereichen (Verkehr, Gebäude) überall, wo es technisch möglich ist, erneuerbarer Strom direkt genutzt werden. Wasserstoff sieht das Umweltbundesamt vor allem in der Stahl- und Chemieindustrie. [...]
 Für die Eisen- und Stahlerzeugung können die CO₂-Emissionen der Hochofenroute praktisch vollständig vermieden werden, wenn eine Umstellung auf gasbasierte Direktreduktionsverfahren erfolgt. Diese kommen bereits zum Einsatz unter Nutzung von Erdgas. Perspektivisch können sie mit Wasserstoff aus erneuerbaren Energien betrieben werden.

Quelle: Umwelt Bundesamt (UBA): Wasserstoff – Schlüssel im künftigen Energiesystem, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/wasserstoff-schluesel-im-kuenftigen-energiesystem#Industrie> (Zugriff: 02.06.22).

Video **Grüner Stahl (5:17 min)**



<https://www.ardmediathek.de/video/quarks/gruener-stahl/wdr/Y3JpZDovL3dkci5kZS9CZWl0cmFnLWl5YTE5MzIxLWl0MjQ0NGZlNS1hZTM0LWl0M2OWU1NWU3Mzg3Yw>

9.5. Erwartungshorizont zum Begleitmaterial

Photoreformierung

Wasserstoff aus Ethanol - *Erwartungshorizont*

Auswertung

A 1.1 Abb. 2 & 3 zeigen zwei Gaschromatogramme. Es wurden sowohl reines Wasserstoffgas (Vergleichsprobe) als auch eine nach der Bestrahlung entnommene Gasprobe untersucht. Berechnen Sie mithilfe der angegebenen Werte, welcher Anteil an Wasserstoff in der Gasprobe vorliegt.

Der Flächenanteil beträgt 92,3 %. Damit liegt ein Anteil an Wasserstoff in der Probe von 92,3 % vor.

A 1.3 Lesen Sie zunächst die Info „Photoreformierung“. Ergänzen Sie dann in Abb. 7 die fünf freien Felder mit den entsprechenden Formeln für die Photoreformierung von Ethanol. Benennen Sie zudem, bei welchen Reaktionen es sich um eine Oxidation oder eine Reduktion handelt.

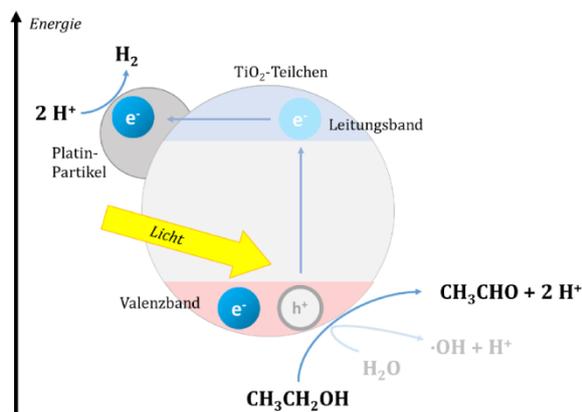


Abbildung 7: Photoreformierung von Ethanol

Oxidation:

Ethanol wird zu Ethanal oxidiert

Wasser wird oxidiert

Reduktion:

Protonen werden zu Wasserstoff-Molekülen reduziert

Wasserstoff – ein CO₂-neutraler Energieträger?

A 2.1 Vergleichen Sie tabellarisch die „Farben“ des Wasserstoffs, indem Sie den CO₂-Ausstoß, die eingesetzten Ausgangsstoffe, Herstellungsweg und Einsatz in der Industrie gegenüberstellen.

	„Farben des Wasserstoffs“ <small>Auswahl der vier am häufigsten genannten Farbvarianten im Vergleich</small>			
	grün	grau	blau	türkis
Herstellungsweg	Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien	Dampfreformierung Kohlevergasung	Dampfreformierung mit einem Kohlenstoffdioxid-Abscheidungs- und Speicherverfahren (CCS)	Methanpyrolyse
Kohlenstoffdioxid-Emissionen <small>(pro t Wasserstoff)</small>	keine	hoch <small>Dampfreformierung 10,8 t Kohlevergasung 25,6 t</small>	keine <small>Voraussetzung: Strom für die Prozesse aus erneuerbaren Energien, dauerhafte Lagerung des Kohlenstoffdioxids</small>	keine <small>Voraussetzung: Strom für die Prozesse aus erneuerbaren Energien, dauerhafte Lagerung des festen Kohlenstoffs</small>
Ausgangsstoff(e)	Wasser	fossile Energieträger <small>(Kohle, Erdöl, Erdgas)</small>	fossile Energieträger <small>(Kohle, Erdöl, Erdgas/Biogas)</small>	fossile Energieträger <small>(Erdgas)</small>
Produkte	Wasserstoff Sauerstoff	Wasserstoff Kohlenstoffdioxid	Wasserstoff Kohlenstoffdioxid	Wasserstoff Kohlenstoff
Einsatz in der Industrie	selten angewandt <small>ca. 2 % der Wasserstoffproduktion in Europa</small>	häufig angewandt <small>ca. 40 % der Wasserstoffproduktion in Deutschland*</small>	selten angewandt	selten angewandt

A 2.2 Begründen Sie, welcher Farbe Sie die Wasserstoffherstellung durch Photoreformierung zuordnen würden.

Die Herstellung von Wasserstoff mittels Photoreformierung ließe sich dem *grünen Wasserstoff* zuordnen. Allerdings müssen hierfür als *Voraussetzung* gelten, dass entweder Sonnenlicht direkt genutzt wird oder genutzte Lichtquellen mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Zudem muss auch auf die eingesetzten Substrate geachtet werden, aus welchen Quellen diese gewonnen werden.

Wasserstoff – Energieträger der Zukunft?

A 3.1 Diagramme 1 & 2 zeigen die Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen mit Elektroantrieb und wasserstoffbasierten Brennstoffzellen in Bezug auf Energieform sowie die Herstellung der Batterien bzw. Brennstoffzellen. Vergleichen Sie die Diagramme 1 & 2 und notieren Sie stichpunktartig die drei Ihrer Meinung nach wichtigsten Unterschiede bei den Treibhausgasemissionen beider Antriebsformen, die für die nächsten beiden Jahrzehnte angenommen werden.

Unterschiede bei den Treibhausgasemissionen zwischen Brennstoffzellenfahrzeugen und Elektroautos in den kommenden Jahrzehnten (Beispiele):

- Aktuelle besitzen E-Autos und Brennstoffzellenfahrzeuge ähnliche THG-Emissionen, wenn H₂ aus Erdgas gewonnen wird bzw. ein Strommix für die E-Autos genutzt wird.
- Leicht niedrigere THG-Emissionen liegen bei Brennstoffzellenfahrzeugen vor, wenn Strom aus erneuerbaren Energien für die H₂-Produktion genutzt werden. Die leicht höheren THG-Emissionen liegen beim E-Auto an der Herstellung und Entsorgung.
- Unterschiede für das Jahrzehnt 2030-2040 deutlich geringer zwischen E-Autos und Brennstoffzellenfahrzeugen
- Herstellungs- und entsorgungsbedingte Emissionen gleichen sich an.
- E-Autos bei Einsatz von Strommix mit deutlich geringeren THG-Emissionen als Brennstoffzellenfahrzeugen, die mit H₂ aus Erdgas betrieben werden

A 3.2 Beziehen Sie Stellung zu der Aussage, dass wasserstoffbasierte Antriebe (bspw. in Brennstoffzellenautos) gegenüber Elektroantrieben in Zukunft grundsätzlich bevorzugt werden sollten. Nutzen Sie hierfür Ihre Ergebnisse aus **Aufgabe 3.1**, den Infos „**Wirkungsgrade im Vergleich**“ und „**Wasserstoff im Nah- und Fernverkehr**“ sowie die Informationen, die Sie aus dem **Video** erhalten.

Individuelle Aufgabenstellung

Bestimmte Aspekte sollten jedoch berücksichtigt werden:

- Bereitstellung der Energieträger muss berücksichtigt werden
- Elektroantriebe sind prognostiziert mit geringeren THG-Emissionen verbunden als Brennstoffzellenfahrzeuge
- Wirkungsgrade bei PKW mit Elektroantrieben höher als bei Brennstoffzellenfahrzeugen (aber: Brennstoffzellenfahrzeuge im Vorteil gegenüber klassischen Verbrennern)
- Elektroantriebe mit Vorteilen im Nah- und Individualverkehr
- Brennstoffzellenfahrzeuge mit Vorteilen im Fernverkehr und Gütertransport
- Insgesamt kann nicht auf eine Antriebsform alleine gesetzt werden, eine ausgewogene Mischung ist entscheidend

A 3.3 Vergleichen Sie mithilfe der Materialien auf den folgenden Seiten die Kosten für die Anschaffung und den Unterhalt bei klassischen Verbrennern, Elektroautos und Brennstoffzellenfahrzeugen. Beziehen Sie Stellung dazu, inwieweit die Energiewende im Individualverkehr für verschiedene Bevölkerungsschichten umsetzbar ist. Geben Sie Vorschläge, welche Maßnahmen ergriffen werden können, um die Sorgen der Menschen zu berücksichtigen.

Individuelle Aufgabenstellung

Bestimmte Aspekte sollten jedoch berücksichtigt werden:

- Autobesitz von sozioökonomischen Status abhängig
- Kosten bei E-Autos höher als bei klassischen Verbrennern
- Brennstoffzellenfahrzeuge mit den höchsten Kosten
- Unterhalt mit höheren Kosten verbunden bei Verbrennern und Brennstoffzellenfahrzeugen
- Verkehrswende/Mobilitätskosten mit Sorgen vor allem für Bevölkerungsschichten verbunden, die der Einkommensschwächeren Hälfte angehören
- Vorschläge: *individuell*

Zusatz Diskutieren Sie auf Basis der von Ihnen bearbeiteten Aufgaben und erarbeiteten Informationen, inwieweit Wasserstoff als Energieträger der Zukunft angesehen werden kann und welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit Wasserstoff in Verkehr und Industrie aus einer ökologischen, wirtschaftlichen und sozialen Perspektive nachhaltig eingesetzt werden kann.

Individuelle Aufgabenstellung

Bestimmte Aspekte sollten jedoch berücksichtigt werden:

- Herstellungswege des Wasserstoffs müssen berücksichtigt werden
- Bedeutung unterschiedlicher Herstellungswege für die Umwelt und Industrie
- soziale Aspekte berücksichtigen
- Umgestaltung des Verkehrssektors

