

# Brennstoffzell-Systeme mit Fokus auf biologischen Brennstoffzellen:

## Entwicklung und Optimierung von schulgeeigneten Experimenten, Konzepten und Medien

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Titels
Doktor der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat)

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

von Rebecca Grandrath
geb. in Braunschweig

Wuppertal 2021

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20210720-101049-4
[http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20210720-101049-4]

DOI: 10.25926/60fq-9c04
[https://doi.org/10.25926/60fq-9c04]

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit von April 2017 bis März 2021 im Arbeitskreis Didaktik der Chemie an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen sowie der Bergischen Universität Wuppertal jeweils unter der Leitung von Frau Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde.

| | |
|---|---|
| **Erste Gutachterin:** | **Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde** |
| **Zweiter Gutachter:** | **Prof. Dr. Michael W. Tausch** |
| **Tag der mündlichen Prüfung:** | **22.06.2021** |

# Eidesstattliche Erklärung

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 gekennzeichnet. Weiterhin erkläre ich, dass die Dissertation weder in der gegenwärtigen noch einer anderen Fassung einem anderen Fachbereich einer wissenschaftlichen Hochschule vorgelegen hat.

Wuppertal, den 11.03.2021 Rebecca Grandrath

# Danksagung

An erster Stelle gilt meiner Doktormutter ***Prof. Dr. Claudia Bohrmann-Linde*** Dank für die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Dissertation und die herzliche Aufnahme in Ihre beiden Arbeitskreise. Darüber hinaus danke ich ihr für die sehr gute Betreuung und konstruktiven Austausch.
Herrn ***Prof. Dr. Michael W. Tausch*** danke ich zunächst für eine interessante und passionierte Vermittlung photochemischer und fachdidaktischer Inhalte während des Lehramtsstudiums sowie für die Übernahme eines Zweitgutachtens.

Den Mitarbeitenden im Arbeitskreis Bohrmann-Linde - zunächst in Tübingen, dann in Wuppertal - danke ich für die nette Aufnahme in die Arbeitsgruppe. Insbesondere möchte ich ***Bettina Grau*** für ein Stück Geborgenheit im sonst eher verhalten auf Zugezogene reagierenden Schwabenland danken. Allen Sammlern in Tübingen und Wuppertal vielen Dank für die Versorgung mit Eierkartons! ***Ingrid Reisewitz-Swertz*** danke ich für die Unterstützung während der Lehrkräftefortbildungen.
Weiterhin gilt mein Dank meiner Büronachbarin ***Dr. Diana Zeller***, die mit ihrer herzlichen Art und jeder Menge kulinarischen Köstlichkeiten zu motivieren weiß, und, den Arbeitsalltag in vieler Hinsicht versüßt.

Im Zusammenhang mit dem Kooperationsprojekt mit der Universität Hohenheim gilt mein Dank ***Fridhelm Büchele*** für die filmischen Beratungen im Vorfeld und den Verleih der Filmausrüstung.
***Dr. Padma Priya Ravi*** und ***Dr. ing. Anastasia Oskina*** danke ich für ihre Bereitschaft, vor laufender Kamera Einblicke in ihren jeweiligen persönlichen Werdegang und Forschungsprojekte zu geben, sowie den angenehmen, spannenden gemeinsamen Projekttag in Hohenheim.

Weiterhin gilt mein Dank all denen, die ein praktisches Erproben meiner Lernarrangements ermöglicht haben: An der Junior Uni Wuppertal als außerschulischem Lernort zu dozieren war eine sehr bereichernde Erfahrung - was insbesondere durch ***Dr. Sarah Mertens*** und ***Dr. Stefan Hellhake*** koordiniert wurde. Ein großer Dank gilt den Lehrkräften und Lernenden, die an verschiedenen Lernarrangements teilgenommen und durch ihre Rückmeldungen maßgeblich zur iterativen Optimierung beigetragen haben.

In besonderem Maße danke ich meinen Freunden, die längst Wahl-Familie sind:
***Dr. Alexandra Gotthardt*** für das stets offene Ohr und die vielen „positiven Vibes“ ; ***Anne Toepfer*** für Rückhalt und Zugriff auf die eigene Bibliothek;
***Peer Leske*** für schonungslos ehrlichen Beistand und Beratung; ***Antonia van Betteray*** für die laufende Abenteuerlust und Alltagsausfluchten, die herzliche Unterstützung und offenen Gespräche!

Auch danke ich meinen Geschwistern ***Lukas Zückert*** und ***Ilka Baars*** für den Rückhalt, die technische und emotionale Unterstützung.
Meine liebe Oma ***Else*** hat mich durch ihren trockenen Humor, die direkte Art, ihre Liebe und Zuversicht geprägt und stets ermutigt. Ich wünschte, sie würde erleben, dass „das Buch“ nun fertig ist.

Schließlich gilt mein Dank meiner Schwiegerfamilie und insbesondere meinem Mann ***Daniel Grandrath***. Ich danke dir für die Liebe und Geborgenheit, dass du ein sicheres Wir - mit vierbeiniger Erweiterung erst durch Skye und jetzt durch Frieda - schaffst und mich in allen Lebenslagen unterstützt. Aber auch!

## Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| **ADP** | Adenosindiphosphat |
| **AFB** | Anforderungsbereich |
| **AFC** | Alkaline fuel cell; dt. Alkalische Brennstoffzelle |
| **ATP** | Adenosintriphosphat |
| **BFC** | Biological fuel cell; dt. Biologische Brennstoffzelle |
| **BMBF** | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| **BNE** | Bildung für nachhaltige Entwicklung |
| **CNTs** | Carbon Nanotubes |
| **DET** | Direkter Elektronentransfer |
| **DMFC** | Direct methanol fuel cell; dt. Direkt-methanolische Brennstoffzelle |
| **EET** | Extrazellulärer Elektronentransfer |
| **EFC** | Enzymatic fuel cell; dt. Enzymatische Brennstoffzelle |
| **FC** | Fuel cell; dt. Brennstofffzelle |
| **FCC** | Food Chemical Codex |
| **GK** | Grundkurs |
| **GYOD** | Get your own device |
| **LK** | Leistungskurs |
| **MB** | Methylenblau |
| **MET** | Mediierter Elektronentransfer |
| **MFC** | Microbial fuel cell; dt. Mikrobielle Brennstoffzelle |
| **MINT** | Mathematik-Informatik-Naturwissenschaften-Technik |
| **NADH** | Nicotinamidadenindinukleotid |
| **NE** | Nachhaltige Entwicklung |
| **NR** | Neutralrot |
| **NRW** | Nordrhein-Westfalen |
| **OER** | Open educational ressource |
| **PAR** | Participative action research; dt. Partizipative Aktionsforschung |
| **PEMFC** | Proton Exchange Membran Fuel Cell |
| **SDG** | Sustainable Developement goals; dt. Nachhaltigkeitsziele |
| **Sek. I** | Sekundarstufe I |
| **Sek. II** | Sekundarstufe II |
| **UN** | United Nations; dt. Vereinte Nationen |

# Inhaltsverzeichnis


**1. Einleitung** **1**

1.1. Thematische Hinführung . . . . . 1

1.1.1. Eindrücke vom Wissenstand Studierender zum Thema Brennstoffzelle . . . . . 3

1.1.2. Eindrücke einer Befragung von Chemie-Lehrkräften . . . . . 4

1.2. Zielsetzung der Arbeit . . . . . 6

1.3. Aufbau der Arbeit . . . . . 6

**2. Grundlagen zu Brennstoffzellen** **9**

2.1. Funktionsweise von Brennstoffzellen . . . . . 9

2.1.1. Kenngrößen zur Charakterisierung von Brennstoffzellsystemen 10

2.2. Ausbildung von Elektrodenpotentialen . . . . . 12

**3. Brennstoffzelltypen** **15**

3.1. Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen . . . . . 15

3.2. Alkalische Brennstoffzellen . . . . . 17

3.3. Direkt-Alkoholische Brennstoffzellen . . . . . 19

3.4. Biologische Brennstoffzellen . . . . . 24

3.4.1. Bioenergiekonversion . . . . . 25

3.5. Mikrobielle Brennstoffzellen . . . . . 29

3.5.1. Elektronenübertrag auf Anode . . . . . 29

3.5.1.1. Direkter Elektronentransport . . . . . 30

3.5.1.2. Elektronentransport über Nanowires . . . . . 31

3.5.1.3. Mediierter Elektronentransport . . . . . 31

3.5.2. Exogene Redox-Mediatoren . . . . . 31

3.5.3. In MFC eingesetzte Mikroorganismen . . . . . 32

3.5.4. Anwendungsgebiete . . . . . 33

3.5.5. Bestehende Herausforderungen . . . . . 33

3.6. Enzymatische Brennstoffzellen . . . . . 34

3.6.1. Anwendungsgebiete . . . . . 35

3.6.2. Bestehende Herausforderungen . . . . . 35

**4. Eigene Untersuchungen und Ergebnisse** **37**
4.1. Alkalische Brennstoffzelle . . . . . 37
4.1.1. Variation der Elektrolyt-Konzentration . . . . . 39
4.1.2. Variation der Elektroden . . . . . 41
4.1.3. Variation der Zellgeometrie . . . . . 44
4.1.4. Zwischenfazit zum Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle 46
4.2. Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien . . . . . 47
4.2.1. Ansetzen der Elektrolyt-Lösung mit Kochsalz . . . . . 47
4.2.1.1. Variation der Elektroden und Einwaagen . . . . . 48
4.2.2. Ansetzen der Elektrolyt-Lösung mit Backpulver . . . . . 49
4.2.2.1. Variation der Einwaage . . . . . 50
4.2.2.2. Variation der Elektroden . . . . . 51
4.2.3. Ansetzen der Elektrolyt-Lösung mit Natron . . . . . 52
4.2.3.1. Variation der Einwaage . . . . . 52
4.2.3.2. Variation der Elektroden . . . . . 53
4.2.4. Leitungswasser als Elektrolyt-Lösung . . . . . 54
4.2.5. Zwischenfazit zur Modell-Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien 55
4.3. Direkt-Alkoholische Brennstoffzelle . . . . . 56
4.3.1. Variation des Brennstoffes . . . . . 57
4.3.2. Variation der Elektrolyt-Konzentration . . . . . 59
4.3.3. Variation der Halbzellseparation . . . . . 60
4.3.4. Variation der Luftzufuhr . . . . . 62
4.3.5. Verwendung von Platinelektroden . . . . . 65
4.3.6. Variation der Elektrolyt-Lösung . . . . . 65
4.3.7. Zwischenfazit zum Modellversuch zur DAFC . . . . . 67
4.4. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Bäckerhefe . . . . . 69
4.4.1. Stoffwechsel der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* . . . . . 70
4.4.2. Redox-Aktivität von Bäckerhefe . . . . . 72
4.4.2.1. Erprobung verschiedener Redox-Indikatoren . . . . . 72
4.4.2.2. Vergleichender Einsatz von Frisch- und Trockenhefe . 75
4.4.2.3. Temperaturabhängigkeit der Redox-Aktivität . . . . 76
4.4.3. Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau . . . . . 77
4.4.3.1. Versuchsanordnung nach Silveira u. a. [91] . . . . . 79
4.4.3.2. Einfluss exogener Redox-Mediatoren . . . . . 81
4.4.3.3. Variation der Elektrolyt-Brücke . . . . . 83
4.4.3.4. Variation der Elektrolyt-Lösung in der Brücke . . . . 84
4.4.3.5. Variation der Elektroden . . . . . 85

4.4.3.6. Variation der Lösung im Kathodenraum . . . . . 88
4.4.3.7. Variation des Glucose-Gehaltes der Lösungen im Anoden- und Kathodenraum . . . . . 90
4.4.3.8. Veränderung des pH-Wertes im Anodenraum . . . . 92
4.4.3.9. Variation des Substrates . . . . . 93
4.4.3.10. Einfluss des Lufteintrags in die Kathodenhalbzelle . . 94
4.4.3.11. Zwischenfazit zur Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau . . . . . 96
4.4.4. Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau . . . . . 97
4.4.4.1. Variation der Halbzellfassung . . . . . 97
4.4.4.2. Versuchsanordnung nach Bennetto [81] . . . . . 99
4.4.4.3. Variation des Substrats . . . . . 102
4.4.4.4. Kopplung mit dem Mikrocontroller *Arduino* . . . . . 103
4.4.4.5. Zwischenfazit zur Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau . . . . . 106
4.4.5. Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-Aufbau . . . . . 107
4.4.5.1. Variation der Elektroden . . . . . 107
4.4.5.2. Variation des Aufbaus . . . . . 109
4.4.5.3. Zwischenfazit zur Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-aufbau . . . . . 110
4.5. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Milchsäure-Bakterien . . . . . 111
4.5.1. Variation des Substrats . . . . . 113
4.5.2. Variation der Einwaage an Milchsäure-Kulturen-Präparat . . . 115
4.5.3. Variation des Tensids . . . . . 117
4.5.4. Variation der Elektrodenflächen . . . . . 118
4.5.5. Variation der Elektrodenbeschichtung . . . . . 119
4.5.6. Variation des Reservoirs . . . . . 122
4.5.7. Zwischenfazit zu mikrobiellen Brennstoffzellen mit Milchsäure-Kulturen-Präparat . . . . . 124
4.6. Enzymatische Brennstoffzelle mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase . . . 126
4.6.1. Funktionsweise des enzymatischen Systems . . . . . 127
4.6.2. Vergleich der Lang- und Kurzversion nach Ge u. a. [98] . . . . 128
4.6.3. Variation der Elektrodenbeschichtung . . . . . 130
4.6.4. Variation des Zusammenbaus . . . . . 131
4.6.5. Anzahl der Auftragszyklen . . . . . 133
4.6.6. Notwendigkeit der Tensidzugabe . . . . . 134
4.6.7. Notwendigkeit der Laccase . . . . . 134

4.6.8. Variation der Elektrodenflächen . . . 135
4.6.9. Zwischenfazit zur enzymatischen Brennstoffzelle mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase . . . 136
4.7. Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase . . . 138
4.7.1. Aufbau und Wirkungsweise des Enzyms Lactase . . . 139
4.7.2. Nachweis der Aktivität von Lactase-Darreichungsformen . . . 142
4.7.3. EFC mit Lactase im Stapelaufbau . . . 147
4.7.3.1. Variation der Zellfixierung . . . 147
4.7.3.2. Variation der Einwaage des Enzym-Präparats . . . 148
4.7.3.3. Verwendung thermisch behandelter Enzym-Präparate 149
4.7.3.4. Variation des Tensids . . . 150
4.7.3.5. Vergleichender Einsatz von destilliertem Wasser und Leitungswasser . . . 151
4.7.3.6. Einsatz verschiedener Elektrodenmaterialien . . . 152
4.7.3.7. Zwischenfazit zur EFC mit Lactase im Stapelaufbau 154
4.7.4. EFC mit Lactase(-Präparat) im Zwei-Topf-Aufbau . . . 155
4.7.4.1. Betrieb des Zwei-Topf-Aufbaus . . . 156
4.7.4.2. Monitoring des pH-Wertes während der $\beta$-Galactosidase-Aktivität . . . 158
4.7.4.3. Monitoring des Sauerstoffgehalts in der Lösung des Kathodenraums . . . 158
4.7.4.4. Effekt des Einleitens von Umgebungsluft in den Kathodenraum . . . 159
4.7.5. Zwischenfazit zur enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase . 161

**5. Didaktische Betrachtungen 163**
5.1. Bildung für Nachhaltige Entwicklung . . . 163
5.1.1. Begriffserläuterungen . . . 163
5.1.2. Strukturelle Anlage von Bildung Nachhaltiger Entwicklung . . 164
5.2. Perspektive MINT . . . 166
5.3. Digitalisierung . . . 168
5.4. Didaktische Standortbestimmung . . . 169
5.4.1. Brennstoffzellen in den Lehrplänen der Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen . . . 170
5.4.2. Frequenzanalyse der bundesweiten Verankerung des Themas Brennstoffzelle in den Lehrplänen der Sek. II an Gymnasien . 172
5.4.3. Brennstoffzellen in Schulbüchern für das Fach Chemie in Nordrhein-Westfalen . . . 173

5.4.4. Brennstoffzellen in der fachdidaktischen Literatur . . . . . 176

**6. Übersicht und Einblick in entwickelte Materialien 179**

6.1. Videos . . . . . 179
6.1.1. Interviewsequenzen an der Universität Hohenheim . . . . . 181
6.1.1.1. Vorüberlegungen und Planungen . . . . . 181
6.1.1.2. Gestaltung der Videos . . . . . 183
6.1.2. Mikrobielle Brennstoffzellen - Kurzportrait - . . . . . 185
6.1.3. Videos zu Schulversuchen der Hefe-Brennstoffzelle . . . . . 186
6.2. Analoge Materialien . . . . . 187
6.2.1. Aufbau des Skripts zu *Brennstoffzellen weitergedacht!* für Lernende der Sekundarstufe II . . . . . 188
6.2.2. Aufbau des Skriptes zur Lehrkräftefortbildung . . . . . 189
6.3. Entwickelte E-Books . . . . . 191

**7. Entwickelte Lernarrangements 195**

7.1. Methodisch-didaktische Anmerkungen . . . . . 195
7.2. Anmerkungen zur didaktischen Begleitforschung . . . . . 197
7.2.1. Fragebögen für Schülerinnen und Schüler . . . . . 198
7.2.2. Fragebogen für Lehrkräfte . . . . . 201
7.3. *Brennstoffzellen weitergedacht!* . . . . . 203
7.3.1. Ziele . . . . . 203
7.3.1.1. Angestrebte fachliche Teilkompetenzen . . . . . 203
7.3.1.2. Angestrebte methodische Teilkompetenzen . . . . . 204
7.3.1.3. Angestrebte personale und soziale Teilkompetenzen . 205
7.3.2. Notwendiges Vorwissen . . . . . 205
7.3.3. Medien und Materialien . . . . . 206
7.3.3.1. Experimente . . . . . 206
7.3.3.2. Digitale Ergänzungen . . . . . 207
7.3.4. Aufbau und Inhalte des Lernarrangements . . . . . 208
7.3.5. Situation der Teilerprobung . . . . . 212
7.3.5.1. Vorstellung des Lernortes . . . . . 212
7.3.6. Anpassung an die Situation der Teil-Erprobung . . . . . 213
7.3.7. Evaluation der Teilerprobung . . . . . 213
7.3.7.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 213
7.3.7.2. Persönliches Resultat der Teilnehmenden . . . . . 214
7.3.7.3. Anmerkungen zum Kursverlauf und resultierende Impulse . . . . . 214

7.3.8. Erprobungssituation . . . 215
7.3.8.1. Platzierung und Beschreibung des Lernarrangements 215
7.3.8.2. Charakterisierung der erwarteten Zielgruppe . . . 215
7.3.9. Anpassungen an die Erprobungssituation und bestehende Herausforderungen . . . 215
7.3.10. Evaluation der Erprobung . . . 216
7.3.10.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . 216
7.3.10.2. Motivation zur Projektkursteilnahme . . . 216
7.3.10.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne . . 217
7.3.10.4. Vorwissen und Wissen unmittelbar nach Kursende im Vergleich . . . 218
7.3.10.5. Feedback zum Lernarrangement . . . 218
7.3.11. Fazit und Impulse aus der Evaluation . . . 220
7.4. *Alleskönner Brennstoffzellen?!* . . . 222
7.4.1. Ziele . . . 222
7.4.1.1. Angestrebte fachliche Teilkompetenzen . . . 222
7.4.2. Notwendiges Vorwissen . . . 223
7.4.3. Medien und Materialien . . . 223
7.4.3.1. Experimente . . . 224
7.4.4. Aufbau und Inhalte . . . 225
7.4.5. Erprobungssituation . . . 228
7.4.5.1. Platzierung und Beschreibung des Lernarrangements 228
7.4.5.2. Charakterisierung der erwarteten Zielgruppe . . . 228
7.4.6. Anpassung an die Erprobungssituation und bestehende Herausforderungen . . . 228
7.4.7. Evaluation der Erprobung . . . 228
7.4.7.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . 228
7.4.7.2. Motivation zur Projektkursteilnahme . . . 229
7.4.7.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne . . 229
7.4.7.4. Vorwissen und Wissen unmittelbar nach Kursende im Vergleich . . . 229
7.4.7.5. Feedback zum Lernarrangement . . . 231
7.4.8. Fazit und Bemerkungen zu der Evaluation . . . 232
7.5. Exkurse zu biologischen Brennstoffzellen . . . 233
7.5.1. Ziele . . . 233
7.5.1.1. Angestrebte fachliche Teilkompetenzen . . . 233

7.5.2. Exkurs zur biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I234
7.5.2.1. Notwendiges Vorwissen . . . 234
7.5.2.2. Medien und Materialien . . . 235
7.5.2.3. Experimente . . . 235
7.5.2.4. Aufbau und Inhalte . . . 236
7.5.2.5. Erprobungssituation . . . 237
7.5.2.6. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung . . . 238
7.5.3. Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II243
7.5.3.1. Notwendiges Vorwissen . . . 243
7.5.3.2. Medien und Materialien . . . 243
7.5.3.3. Experimente . . . 243
7.5.3.4. Aufbau und Inhalte . . . 244
7.5.3.5. Erprobungssituation . . . 245
7.5.3.6. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung . . . 245
7.5.4. Schlussbemerkungen zu den Exkursen zu biologischen Brennstoffzellen . . . 252
7.6. Lehrkräftefortbildung . . . 253
7.6.1. Ziele und Verlauf der Fortbildung . . . 253
7.6.2. Materialien und Experimente . . . 254
7.6.3. Evaluation der Erprobungen . . . 255
7.6.3.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . 255
7.6.3.2. Eindrücke von den Experimenten . . . 256
7.6.3.3. Eindrücke vom Material . . . 258
7.6.3.4. Persönliches Resultat . . . 259
7.6.4. Anmerkungen und Ausblick . . . 260

**8. Zusammenfassung** **261**

**9. Literatur** **267**

**10. Abbildungsverzeichnis** **287**

**11. Tabellenverzeichnis** **295**

**Anhang** **300**

**A. Glossar** **301**

**B. Experimentalteil** **303**
B.1. Geräte . . . 303

B.2. Chemikalien und sonstige Komponenten . . . . . 304
B.3. Experimentieranweisungen . . . . . 307
B.3.1. Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle . . . . . 307
B.3.1.1. Aufbau in der Ein-Topf-Zellgeometrie . . . . . 307
B.3.1.2. Aufbau in der Zwei-Topf-Zellgeometrie . . . . . 307
B.3.2. Modellversuche zur Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien . . 308
B.3.2.1. Aufbau in der Ein-Topf-Zellgeometrie . . . . . 308
B.3.3. Modellversuch zur Direkt-alkoholischen Brennstoffzelle . . . . 308
B.3.3.1. Präparation der Schwammtücher . . . . . 308
B.3.4. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Bäckerhefe . . . . . 308
B.3.4.1. Redox-Aktivität von Bäckerhefe . . . . . 308
B.3.4.2. Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau . . . . . 308
B.3.4.2.1. Versuchsanordnung nach Silveira u. a. [91]: . 308
B.3.4.2.2. Einfluss exogener Redox-Mediatoren: . . . . 309
B.3.4.2.3. Variation der Elektrolyt-Brücke: . . . . . 309
B.3.4.2.4. Variation der Elektrolyt-Lösung in der Brücke:309
B.3.4.2.5. Variation der Elektroden: . . . . . 310
B.3.4.2.6. Variation der Lösung im Kathodenraum: . . 310
B.3.4.2.7. Variation des Glucose-Gehaltes der Lösungen im Anoden- und Kathodenraum: . . . . 310
B.3.4.2.8. Veränderung des pH-Wertes im Anodenraum:310
B.3.4.2.9. Variation des Substrats: . . . . . 311
B.3.4.2.10. Einfluss des Lufteintrags in die Kathodenhalbzelle: . . . . . 311
B.3.4.3. Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau . . . . . 311
B.3.4.3.1. Variation der Halbzellfassung: . . . . . 311
B.3.4.3.2. Versuchsanordnung nach Bennetto [81]: . . . 311
B.3.4.3.3. Variation des Substrats: . . . . . 312
B.3.4.3.4. Kopplung mit dem Mikrocontroller *Arduino*: 312
B.3.4.4. Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-Aufbau . . . . . 312
B.3.4.4.1. Variation der Elektroden: . . . . . 312
B.3.4.4.2. Variation des Aufbaus: . . . . . 312
B.3.5. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Milchsäure-Bakterien . . . . . 313
B.3.6. Enzymatische Brennstoffzelle mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase314
B.3.6.1. Aufbau nach Ge u. a. [98] . . . . . 314
B.3.7. Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase . . . . . 314
B.3.7.1. Nachweis der Stoffwechsel-Aktivität von Lactase: . . 314

B.3.7.2. Vorgehen zur Aufnahme von Absorptionsspektren: . 314
B.3.7.3. Grundlegender Aufbau der Stapelvariante: . . . . . 315
B.3.7.4. Grundlegender Aufbau der Zwei-Topf-Anordnung: . . 315

**C. Übersicht des digitalen Anhangs 317**

**D. Brennstoffzellen in den Lehrplänen des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II 319**

**E. Items der Schülerfragebögen zur Motivation und Reflexion 321**

**F. Ergänzungen zu den Lernarrangements 323**
F.1. Ergänzungen zu *Brennstoffzellen weitergedacht!* . . . . . 323
F.1.1. Verlaufspläne der Einheiten . . . . . 323
F.1.2. Evaluation der Teilerprobung . . . . . 326
F.1.2.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 326
F.1.2.2. Persönliches Resultat der Teilnehmenden . . . . . 327
F.1.3. Evaluation der Erprobung . . . . . 328
F.1.3.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 328
F.1.3.2. Motivation zur Projektkursteilnahme . . . . . 329
F.1.3.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne . . 330
F.1.3.4. Feedback zum Lernarrangement . . . . . 333
F.2. Ergänzungen zu *Alleskönner Brennstoffzellen?!* . . . . . 334
F.2.1. Verlaufspläne der Einheiten . . . . . 334
F.2.2. Evaluation der Erprobung . . . . . 337
F.2.2.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 337
F.2.2.2. Motivation zur Projektkursteilnahme . . . . . 339
F.2.2.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne . . 340
F.2.2.4. Feedback zum Lernarrangement . . . . . 341
F.3. Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I . . . . 342
F.3.1. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung . . . . . 342
F.3.1.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 342
F.3.1.2. Motivation zur Teilnahme am Exkurs . . . . . 343
F.3.1.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne . . 344
F.3.1.4. Feedback zum Lernarrangement durch die Lernenden 346
F.3.1.5. Feedback zum Lernarrangement durch die Lehrkraft 346
F.4. Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II . . . 349
F.4.1. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung . . . . . 349
F.4.1.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 349

F.4.1.2. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne . . 350
F.4.1.3. Feedback durch die Lernenden . . . . . 353
F.5. Ergänzungen zur Lehrkräftefortbildung . . . . . 354
F.5.1. Evaluation der Erprobungen . . . . . 354
F.5.1.1. Charakterisierung der Stichprobe . . . . . 354
F.5.1.2. Eindrücke von den Experimenten . . . . . 355
F.5.1.3. Eindrücke vom Material . . . . . 357
F.5.1.4. Persönliches Resultat . . . . . 358

# 1. Einleitung

## 1.1. Thematische Hinführung

Der globale Energiegebrauch steigt Jahr für Jahr stetig an. Im Jahr 2018 wurden im weltweiten Durchschnitt 2.9 % mehr Primärenergieträger verbraucht als im Vorjahr. Der einst prognostizierte Zuwachs von 1.5 % pro Jahr wurde demnach beinahe verdoppelt. Dabei können China, Indien und den USA zusammen Zweidrittel der Erhöhung des Energieverbrauches zugeschrieben werden.[1] Zudem war 2018 die weltweit im Zusammenhang mit der Energieversorgung freigesetzte Kohlenstoffdioxid-Emission 2 % höher als im Vorjahr, was einem Anstieg der Emissionen um 0.6 Gigatonnen entsprach.[1] Bislang basiert die Energieversorgung hauptsächlich auf der Nutzung von fossilen Energieträgern. So wurden 2018 täglich etwa 99843000 Barrel (etwa 16 000 000 $m^3$) des Hauptenergieträgers Erdöl verbraucht. Der Vorrat an fossilen Energieträgern allgemein wird sich in naher Zukunft erschöpfen, wie in Tabelle 1.1 auszugsweise dargelegt ist. Die *reserve-to-production-Ratio* (r/p-Ratio) als Quotient der bestehenden Reserven und des jährlichen Verbrauches gibt an, für wie viele Jahre die Reserven bei gleichbleibender Nutzung ausreichen.[2] In Deutschland wird

| **Fossiler Energieträger** | **r/p-Ratio Europa** | **r/p-Ratio Deutschland** |
|---|---|---|
| Erdöl | 11.6 | 0 |
| Erdgas | 14.2 | 4.1 |
| Kohle | 244 | 268 |

Tabelle 1.1: r/p-Ratio verschiedener fossiler Energieträger in Jahren bezogen auf Europa allgemein und speziell auf Deutschland.

bereits mehr Erdöl verbraucht als Ressourcen vorhanden sind. Auch die Vorräte an Erdgas sind beinahe ausgeschöpft. Wenngleich mittelfristig ausreichend Kohle vorhanden ist, sollte kurzfristig eine (ausschließliche) Nutzung regenerativer Energieträger erfolgen. Neben dem begrenzten Vorkommen geht die Nutzung der aufgeführten fossilen Energieträger mit einer hohen Kohlenstoffdioxid-Emission einher. Insbesondere Braunkohlekraftwerke setzen neben der Emission weiterer Schadstoffe wie Stickoxiden, Quecksilber und Arsen auch enorme Mengen an Kohlenstoffdioxid frei.[3] Da

Kohlenstoffdioxid ein Treibhausgas ist und als solches den Klimawandel vorantreibt, müssen die Emissionen verringert werden.[3]

Bereits im 19. Jahrhundert spiegelte sich in Jules Vernes Roman „Die geheimnisvolle Insel“ der Gedanke wider, dass zukünftig ein anderer Rohstoff als Kohle verbrannt würde. Die fiktive Figur Smith benannte darin Wasser als die „Kohle der Zukunft“.
Doch zu Beginn des 21. Jahrhunderts hat sich die Vision der Figur Smith noch nicht bewahrheitet, wenn auch dahingehende Entwicklungen bestehen:
In einer Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle wird die chemische Energie des Wasserstoffs bei der Reaktion mit Sauerstoff in elektrische Energie überführt. Somit kann Wasserstoff als „Quelle“ von elektrischer Energie verstanden werden, die wiederum in Wärme oder Lichtenergie überführt werden kann.
Da der weltweite Bedarf an elektrischer Energie – nicht zuletzt durch die voranschreitende Digitalisierung – zunimmt, kommt dem Energiewandler Brennstoffzelle in der Energiewende eine besondere Bedeutung zu.[1,3]
Klimaschutz und Nachhaltigkeit[1] sind als globale Herausforderung erkannt worden: Im Jahr 2015 formulierten die Vereinten Nationen die Agenda 2030, in der 17 Ziele für Nachhaltige Entwicklung (englisch: Sustainable development goals, SDG), festgelegt worden sind (vgl. Abb. 1.1). Die Ziele mit globaler Gültigkeit sind sowohl in ökologischen, gesellschaftlichen, sozialen und bildungspolitischen Bereichen angesiedelt:[4]
Das Ziel 7 adressiert den Zugang zu moderner und sauberer Energie für jeden. Das




Abbildung 1.1: Symbole der 17 Nachhaltigkeitsziele.[5]

[1] „Nachhaltigkeit“ wird in der vorliegenden Arbeit integrativ verstanden. Eine Erläuterung folgt in Kapitel 5.1.1.

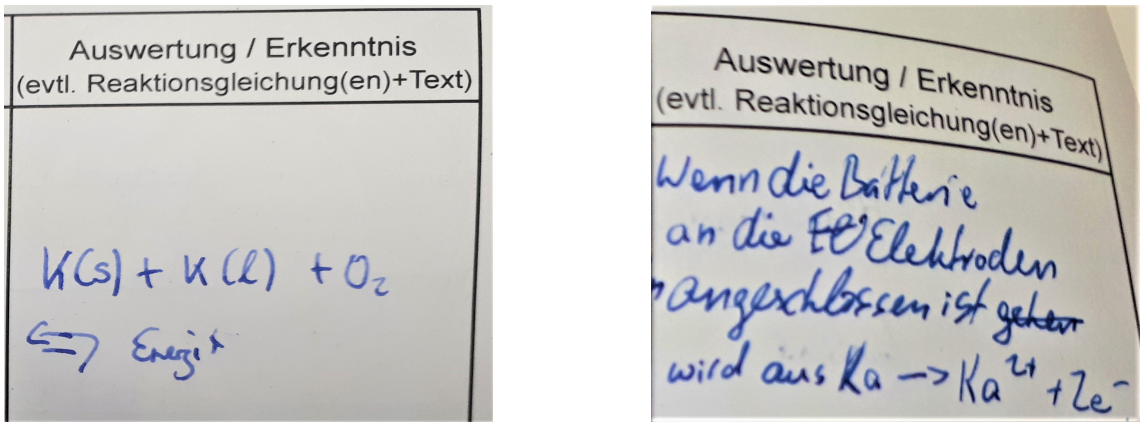
erfordert beispielsweise die signifikante Erhöhung der Nutzung regenerativer Energieträger am weltweiten Energiemix sowie den globalen Aufbau von Energienetzen.[4] Im Ziel 13 werden ökologische und bildungspolitische Aspekte vereint: Es sollen umgehend Maßnahmen zur Eindämmung des Klimawandels getroffen werden. Neben der Einbeziehung von Klimaschutzmaßnahmen in Politik und Planung auf allen Ebenen, beinhaltet das Ziel auch die Forderung nach Aufklärung der Bevölkerung über den Klimawandel und Möglichkeiten zur Abschwächung.[4] Die konkreten Maßnahmen zum Erreichen der Ziele für Nachhaltige Entwicklung sind auf nationaler Ebene formuliert worden.[6,7] Eine wichtige Rolle bei der Vermittlung von Wissen zum Klimawandel kommt der Institution Schule und somit den Lehrkräften als Bildungsmultiplikatoren zu.[7,8] Folglich sollte die Vermittlung von Wissen zum Klimaschutz und einhergehenden technischen Innovationen - wie etwa Brennstoffzellen - verstärkt Einzug in die Lehramtsausbildung in verschiedenen Stadien halten.
Beispielhaft wird hier ein Status quo vom Wissenstand von Studierenden[2] des Grundschullehramtes sowie die Befragung aktiver Lehrpersonen an MINT-EC-Schulen jeweils zum Thema Brennstoffzellen vorgestellt.

### 1.1.1. Eindrücke vom Wissenstand Studierender zum Thema Brennstoffzelle

In einer Vorlesung für Studierende des Grundschullehramtes mit naturwissenschaftlicher Ausrichtung im Bachelor wurde ein Modellversuch[3] zur alkalischen Brennstoffzelle[10] demonstriert und inhaltlich sowie didaktisch besprochen. In Anlehnung an ein klassisches Protokoll[11] wurde in der zur Veranstaltung gehörigen Klausur die Versuchsbeschreibung inklusive Skizze, Substanznamen und Durchführung vorgegeben, während die Beobachtung sowie Auswertung zu ergänzen waren.
Alle 64 Prüflinge füllten sowohl Beobachtung als auch Auswertung aus. In der Beobachtung nannten etwa 91 % eine Gasentwicklung, 89 % die Bewegung des Propellers. Lediglich 73 % gaben den in der Durchführung explizit vorgegebenen Zweischritt (1. Elektrolyse und 2. Betrieb der Brennstoffzelle) wieder.
Die Hälfte der Studierenden stellte den Zweischritt in der Auswertung dar. 80 % der Prüflinge führten eine Reaktionsgleichung an. Allerdings nur etwa die Hälfte von ihnen die Zutreffende. Oftmals wurden eigentlich unbeteiligte Stoffe als Reaktanden

[2] In dieser Arbeit werden sofern möglich, geschlechtsneutrale Bezeichnungen gewählt. Andernfalls wird aufgrund der besseren Lesbarkeit meist das generische Maskulinum verwendet, das jedoch geschlechtsneutral zu verstehen ist.
[3] In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe *Versuch* und *Experiment* in Anlehnung an Nerdel [9] synonym verwendet.

angenommen, etwa das Kaliumhydroxid. So hieß es beispielsweise: „Kaliumhydroxid wird mithilfe von elektrischer Energie gespalten“. In einem Fall fand sich auch eine nicht ausgeglichene Gleichung mit herausfordernder Zuordnung von Aggregatzuständen bei gleichzeitiger Vermischung von Wort und Reaktionsgleichung (siehe Abb. 1.2(a)). In einem anderen Fall wurde sogar ein nicht-existentes Elementsymbol angeführt (siehe Abb. 1.2(b)). Dreiviertel der Prüflinge schrieb, dass es sich um




(a) Eindruck 1 (b) Eindruck 2

Abbildung 1.2: Beispielhafte Eindrücke vom Wissenstand Studierender zur alkalischen Brennstoffzelle.

Prozesse unter Beteiligung von Wasserstoff und Sauerstoff handelte. Etwa die Hälfte ordnete die Stoffe den ablaufenden Prozessen richtig zu. Ähnlich verhielt es sich mit den Begrifflichkeiten Anode und Kathode (bzw. Minus- und Pluspol): Die Hälfte der Studierenden führte den Begriff an, 35 % verwendeten die Begriffe korrekt. Schlussendlich benannten 10 % die beteiligten Energieformen korrekt.
Dieser Einblick legt einen sehr heterogenen Wissenstand in diesem Abschnitt des Studiums nahe. Neben grundsätzlichen fachlichen Unsicherheiten (vgl. Abb. 1.2) wurde deutlich, dass der explizite Wissenstand zu diesem Versuch noch nicht bei allen der (hier betrachteten) Studierenden auf dem Niveau ist, dass sie diesen Modellversuch souverän im Unterricht einbinden könnten.

### 1.1.2. Eindrücke einer Befragung von Chemie-Lehrkräften

Im Sinne eines partizipativen Ansatzes wurde anhand von Fragebögen erhoben, ob und welche Bedarfe aktive Chemie-Lehrkräfte an MINT-EC-Schulen hinsichtlich Weiterbildungen oder Materialien zum Thema *Brennstoffzellen* sehen.[12] An der Umfrage

nahmen 53 Lehrkräfte teil. 50 von ihnen unterrichten in Nordrhein-Westfalen (NRW). Alle hielten Brennstoffzellen für ein zukunftsrelevantes Thema, aber nur 35 % von ihnen fühlten sich hinreichend über aktuelle Entwicklungen in diesem Bereich informiert. Nur wenige Brennstoffzelltypen werden in ihrem Unterricht thematisiert, wobei der Schwerpunkt deutlich auf den Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen liegt: Eine

| | Wasserstoff BZ | Methanol BZ | Ethanol BZ | Festoxid BZ | Alkalische BZ | Glucose BZ | Methan BZ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n *absolut* | 53 | 9 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Anteil [%] | 100 | 17 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 |

Tabelle 1.2: Von den Lehrkräften im Chemieunterricht thematisierte Brennstoffzelltypen. *BZ steht für Brennstoffzelle.*

mögliche Erklärung ist, dass dieser Brennstoffzelltyp zumindest für den Leistungskurs Chemie in NRW explizit im Kernlehrplan vorgegeben ist. 64 % der Befragten gaben an – je nach verfügbarer Zeit – das Thema Brennstoffzellen sowohl theoretisch als auch praktisch aufzugreifen. Die überwiegende Mehrheit der Lehrkräfte (89 %) nutzt im Falle eines Experiments kommerziell erhältliche Bausätze.
Einhergehend gaben 86 % an, Bedarf an didaktischen Konzepten und Materialien zu haben. Die häufigsten Angaben zu dieser offenen Frage waren Versuchsanleitungen, ergänzendes Material zu Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen und auch Material zu anderen Brennstoffzelltypen. In einer weiteren offenen Frage wurden zunehmend digitale Formate, wie editierbare Schülerarbeitsblätter, Animationen und Videos, sowie Versuchsanweisungen zu lowcost Aufbauten präferiert. 85 % der Lehrkräfte bekundeten Interesse an einer entsprechenden Lehrerfortbildung, 83 % an dem Besuch eines Schülerlabortages.

Anhand der skizzierten Beispiele lässt sich die Notwendigkeit der stärkeren Verankerung des Themas Brennstoffzellen in verschiedene Stadien der Lehramtsausbildung und -weiterbildung sowie die Aktualität der Thematik für die curriculare Innovationsforschung ableiten. Die Angaben zu präferierten Formaten wurden als Impuls bei der Konzeption und Erstellung von Materialien im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt.

## 1.2. Zielsetzung der Arbeit

Es ergaben sich für die vorliegende Arbeit mehrere Zielsetzungen:

1. Aus der Vielzahl existenter Brennstoffzellsysteme sind diese auszuwählen, die zum einen in Technik und womöglich medialem Alltag von Lernenden präsent sind oder wahrscheinlich von wachsender Bedeutung und zum anderen zur experiment-basierten Erschließung im schulischen Unterricht geeignet sind.

2. Zu den gewählten Brennstoffzelltypen sind Versuche (weiter-)zuentwickeln, die didaktisch prägnant und wissenschaftlich konsistent sind und an fachliche Inhalte des Chemieunterrichts anknüpfen. Dabei werden die Versuche nach aktuellem wissenschaftlichem Stand erschlossen.

3. Die (weiter-)entwickelten Experimente sind didaktisch aufzubereiten: Für Lernende der Sekundarstufe I und II werden geeignete Lernarrangements zum Themenkomplex Brennstoffzelle erarbeitet, jeweils einmal aus Sicht verschiedener MINT-Disziplinen und einmal aus dem Blickwinkel der Chemie.

4. Weiterhin ist eine Lehrkräftefortbildung zum Thema Brennstoffzellen zu gestalten, da Lehrkräfte als Multiplikatoren unerlässlich für die Implementation innovativer Themen oder Herangehensweisen in den Unterricht sind.

5. Es sind unterstützende analoge sowie digitale Formate zur Ausgestaltung der Lernarrangements zu entwickeln, etwa Skripte, Videos und E-Books.

6. Die vormals genannten Konzepte und Materialien sind – sofern organisatorisch möglich - in der Praxis zu erproben und aufgrund der gezielt einzuholenden schriftlichen Rückmeldung der jeweiligen Teilnehmenden iterativ zu optimieren.

## 1.3. Aufbau der Arbeit

Um dem vorgestellten Aufgabenspektrum gerecht zu werden, ist die Ausarbeitung in zwei große Sinnabschnitte unterteilt: Einen fachlich biochemischen und einen didaktischen Teil.
Im erst genannten Bereich werden zunächst die fachlichen Grundlagen gelegt, wobei aufgrund der Intention der Dissertation nur auf für die Entwicklung der Schulversuche und zugehörigen Materialien relevanten Fachinhalte eingegangen wird. Dem schließt sich eine Darstellung der umfangreichen eigenen Untersuchungen und Erkenntnisse zu verschiedenen Brennstoffzelltypen an. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den biologischen Brennstoffzellen.

Im zweiten Teil werden die fachdidaktischen Grundlagen zu den Themen MINT, BNE und Digitalisierung gelegt und um eine didaktische Standortbestimmung ergänzt. Nachfolgend werden entwickelte Materialien in den Fokus genommen: Die zu den Einheiten entwickelten Begleitmaterialien in Print- und Digitalformaten werden anhand ausgewählter Aspekte beleuchtet, bevor unabhängig einsetzbare Videos zur Einführung in die Thematik *Mikrobielle Brennstoffzellen* und zum Aufbau der Hefe-Brennstoffzellen in verschiedenen Zellgeometrien vorgestellt werden. Anschließend werden in Kooperation mit der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim entstandene Videos zur aktuellen Forschung an mikrobiellen Brennstoffzellen sowie zum Werdegang zweier Forscherinnen dargelegt.

Schließlich werden entwickelte und durchgeführte Lernarrangements für Lernende der Sekundarstufe I und II sowie für Lehrkräfte anhand ihres Konzepts und Eindrücken aus der didaktischen Begleitforschung vorgestellt.

# 2. Grundlagen zu Brennstoffzellen

## 2.1. Funktionsweise von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen sind galvanische Elemente, in denen die chemische Energie eines zufließenden Brennstoffes kontinuierlich direkt in elektrische Energie und zu geringen Anteilen in Wärmeenergie umgewandelt wird. Diese elektrochemischen Energiewandler sind meist als Zwei-Kammer-Systeme aufgebaut und in Anoden- sowie Kathodenkammer unterteilt (vgl. Abb. 2.1), um die Oxidations- und Reduktionsreaktion räumlich voneinander zu trennen.

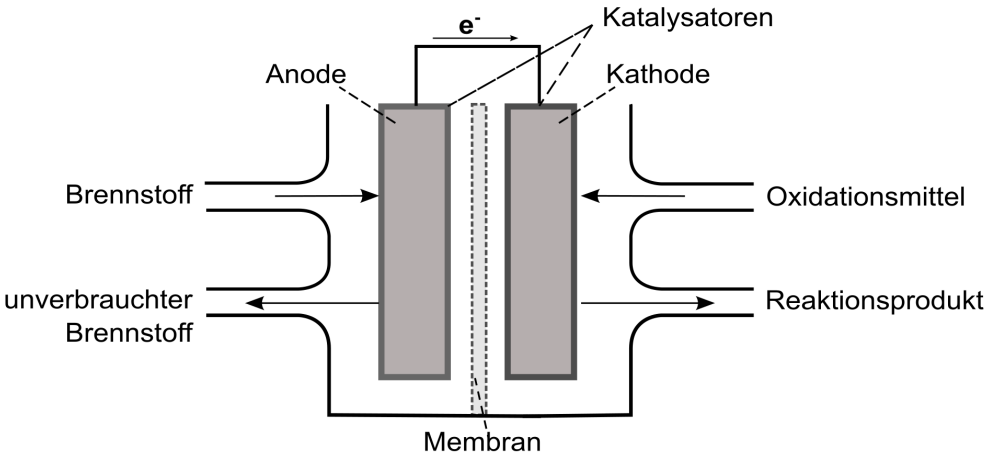



Abbildung 2.1: Allgemeiner Aufbau von Brennstoffzellen.

Dazu wird in die Anodenkammer kontinuierlich Brennstoff eingebracht, der an der Anode oxidiert wird. Während entstehende Protonen durch die Membran diffundieren, werden die freiwerdenden Elektronen auf die Anode übertragen. Diese werden in einem externen Stromkreis nutzbar, bevor sie an der Kathode ein ebenso kontinuierlich zugeführtes Oxidationsmittel reduzieren. An Anode und Kathode sind jeweils geeignete Katalysatoren zur Senkung der Aktivierungsenergie beziehungsweise der Aktivierungsüberspannung aufgetragen. Unverbrauchter Brennstoff wird anodenseitig, das Reaktionsprodukt kathodenseitig abgeführt.[13]

### 2.1.1. Kenngrößen zur Charakterisierung von Brennstoffzellsystemen

Jede selbsttätig ablaufende Zellreaktion eignet sich für den Einsatz in einer Brennstoffzelle. Zur Beurteilung der Freiwilligkeit einer Reaktion wird zunächst die Leerlaufspannung oder auch die Enthalpie betrachtet. Unter Leerlaufspannung wird die Differenz der Normalpotentiale verstanden:

$$\Delta E^0 = E^0_{Kathode} - E^0_{Anode} \tag{2.1}$$

mit:

| | |
|---|---|
| $\Delta E^0$ | Leerlaufspannung (reversible Zellspannung) [V] |
| $E^0_{Kathode}$ | Normalpotential der Kathode [V] |
| $E^0_{Anode}$ | Normalpotential der Anode [V] |

Die Normalpotentiale sind ein Maß für die Tendenz der Komponenten, in wässrigen Lösungen Ionen zu bilden. Der Zahlenwert hat unter Standardbedingungen bei einer Temperatur von 25 °C und einem Druck von 101325 Pa Gültigkeit. Ist der errechnete Wert für die Leerlaufspannung $\Delta E^0$ positiv, laufen die Elektrodenreaktionen selbsttätig ab. Anhand der Leerlaufspannung kann die GIBBSsche freie Reaktionsenthalpie als Nutzenergie pro Mol Brennstoff bestimmt werden:

$$\Delta G^0 = -zF\Delta E^0 \tag{2.2}$$

mit:

| | |
|---|---|
| $\Delta G^0$ | GIBBSsche freie Reaktionsenthalpie $[\frac{kJ}{mol}]$ |
| $z$ | Zahl der übertragenen Elektronen |
| $F$ | Faraday-Konstante, 96 485 $\frac{C}{mol}$ |

Durch Reihenschaltung mehrerer Brennstoffzellen wird eine höhere Spannung erreicht. Ihr Wert entspricht der Summe aus der Anzahl der Zellen und der Einzelzellspannung. Da die Zellen zur Spannungssteigerung gestapelt werden, spricht man von *Stacks* (vgl. Abb. 2.2). Eine wichtige Funktion kommt darin den Bipolarplatten zu, die neben der Separation der Einzelzellen die Gasverteilung und Ableitung des erzeugten elektrischen Stroms gewährleisten.[14]

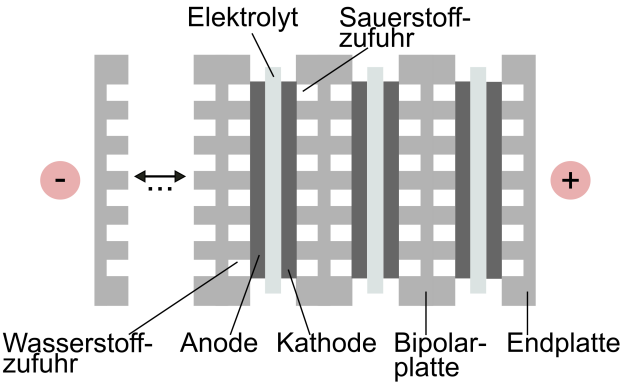



Abbildung 2.2: Schematische Darstellung eines Stacks. Eigene Abbildung angelehnt an Pehnt [14, S. 48].

Die reale Zellspannung unter Stromeinspeisung in den äußeren Leiterkreis ist geringer als die Leerlaufspannung. Es gilt der Zusammenhang, dass die reale Zellspannung umso mehr zurückgeht, je mehr Strom fließt. Die Ursache liegt in den Ohm´schen Verlusten im Elektrolyten und der Elektrode. Diese Widerstände werden zum Innenwiderstand $R_i$ zusammengefasst. Dieser Innenwiderstand ist nicht konstant, sondern hängt vom fließenden Strom ab. Spannungsverluste aufgrund von Elektrodenreaktionen entsprechen der *Überspannung* $\eta$:

$$\eta = U_I - U_0 \tag{2.3}$$

mit:

| | |
|---|---|
| $\eta$ | Überspannung [V] |
| $U_I$ | Reale Zellspannung (Klemmspannung) [V] |
| $U_0$ $(bzw.\Delta E^0)$ | Reversible Zellspannung (bzw. Leerlaufspannung) [V] |

Der Begriff Überspannung bezeichnet folglich die Abweichung des Elektrodenpotentials bei Stromfluss vom reversiblen Ruhepotential einer Elektrode. Ursächlich hierfür sind langsame Elektrodenvorgänge, die wie Widerstände wirken und den Ladungstransport limitieren. Um kinetische Hemmungen zu überwinden, muss ein höheres Elektrodenpotential anliegen als das theoretisch ausreichende Gleichgewichtspotential, damit eine intendierte Elektrodenreaktion abläuft. Die Überspannung $\eta$ ist abhängig von Elektrodenmaterial, der Art des Elektrolyten sowie seiner Konzentration, vom pH-Wert und von elektroosmotischen Strömungen in der Lösung. Sie steigt mit zunehmender Temperatur und Stromdichte, sinkt dagegen mit zunehmender Elektrodenoberfläche.

Neben der Zellspannung werden auch die elektrische Leistung sowie der Wirkungsgrad eines Brennstoffzellsystems als Kenngröße angeführt. Die elektrische Momentanleistung P wird dabei als Produkt der Zellspannung und Stromstärke in der Einheit Watt ($W = V \cdot A$) bestimmt:

$$P = U \cdot I \tag{2.4}$$

Aufgrund der Handhabbarkeit in dieser Arbeit, wird ausschließlich der Spannungswirkungsgrad $\eta_U$ von Brennstoffzellen als Quotient der tatsächlichen und der reversiblen Zellspannung betrachtet:[13]

$$\eta_U = \frac{tatsächliche\ Zellspannung\ (U_I)}{reversible\ Zellspannung\ (U_0)} \tag{2.5}$$

## 2.2. Ausbildung von Elektrodenpotentialen

Die in der Elektrolyt-Lösung befindlichen Ionen richten sich so aus, dass sie sich der entgegengesetzt geladenen Elektrodenoberfläche möglichst weit annähern. Es resultiert die Ausrichtung der Raumladung in zwei parallelen Schichten (Abb. 2.3). Nach Helmholtz wird diese als starre Doppelschicht bezeichnet. Die *äußere Helmholtz-Fläche* beschreibt die Ebene durch die lösungsseitigen Ladungsschwerpunkte. Tatsächlich nimmt auch die Wärmebewegung Einfluss auf die Struktur der elektrolytischen Doppelschicht. Da nach Gouy-Chapman mit zunehmendem Abstand zur Elektrode eine schwächer werdende - *diffuse* - Raumladung vorliegt, kann die unmittelbar an der Elektrode ausgebildete Schicht dennoch kontrastierend als *starr* bezeichnet werden.[15] Zusätzlich können Ionen sowie Moleküle mit und ohne Dipol-Charakter an der Elektrodenoberfläche über Van-der-Waals- oder Coulomb-Wechselwirkungen adsorbieren. Dabei ist erst nach partiellem Abstreifen der Solvathülle die Adsorption eines Ions möglich. Je schwächer die Solvathülle, desto stärker die Adsorptionskräfte. Die Ebene der starren Doppelschicht entlang der Ladungsschwerpunkte adsorbierter Ladungen wird als *innere Helmholtz-Fläche* bezeichnet.
Der Aufbau der beschriebenen elektrolytischen Doppelschicht ist in Abbildung 2.3 exemplarisch für eine wässrige Elektrolyt-Lösung dargestellt. An der Phasengrenze von Elektrode und Elektrolyt entsteht infolge der Ausbildung einer elektrolytischen Doppelschicht eine Potentialdifferenz.
Die Differenz zwischen den an Anode und Kathode ausgebildeten Potentialen ergibt das Zellpotential.[15]

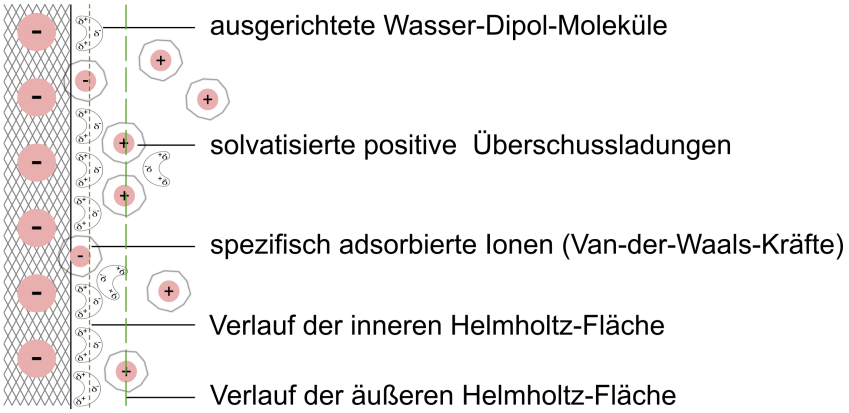



Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau einer komplexen elektrolytischen Doppelschicht. Eigene Abbildung angelehnt an Hamann und Vielstich [15, S. 124].

Soll eine gegenteilige Zellreaktion durch Elektrolyse herbeigeführt werden, muss mindestens eine dem Zellpotential entsprechende Zersetzungsspannung angelegt werden. Durch Überspannungen muss in der Praxis meist eine höhere Spannung aufgebracht werden. Diese Abweichung des Elektrodenpotentials bei Stromfluss wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, etwa die Geschwindigkeit des Ladungsdurchtritts durch die Phasengrenzen, das Elektrodenmaterial sowie Diffusions- und Reaktionshemmungen.[15]

# 3. Brennstoffzelltypen

Durch die vielen in Brennstoffzellen umsetzbaren Reaktionen ergibt sich ein enormes Spektrum verschiedener Brennstoffzelltypen. Die Systeme können nach Betriebstemperatur in Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen unterteilt werden. Dabei ist die Nomenklatur von Brennstoffzelltypen nicht einheitlich, sie orientiert sich meist am Elektrolyten oder Katalysator.

Nachfolgend werden nur Niedertemperatursysteme angeführt, die in Bildungseinrichtungen von Lernenden experimentell erschlossen werden können und im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung sind. Vorangestellt sind die Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen, die anhand von kommerziell erhältlichen Bausätzen im Schülerversuch genutzt werden können, bevor mit den alkalischen, alkoholischen, mikrobiellen sowie enzymatischen Brennstoffzellen solche Typen beleuchtet werden, zu denen im weiteren Verlauf dieser Arbeit lowcost Versuche vorgestellt und charakterisiert werden.

## 3.1. Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen

Brennstoffzellen deren Zwei-Kammer-Systeme durch eine protonenleitende Polymermembran getrennt sind, werden als Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (**P**rotone **E**xchange **M**embrane **F**uel **C**ell, PEMFC) bezeichnet [1]. Neben der Funktion als Separator wirkt die Polymermembran auch als nicht korrosiver Elektrolyt und Katalysatorträger. Perfluorierte oder sulfonierte Polymere in Schichtdicken von 50-150 $\mu$m finden Anwendung als Membran. Die genaue Auswahl richtet sich nach dem pH-Wert des Mediums und den zu transportierenden Ionen. Die Polymere nehmen Wasser auf, sodass die Leitfähigkeit erhöht wird. Durch elektrostatische Abstoßung der Sulfonat-Reste sowie hydrophobe Wechselwirkungen von Wasser und dem Fluorkohlenstoffgerüst entstehen als *ionische Cluster* bezeichnete kugelartige Hohlräume. Diese sind über ein Kanalsystem miteinander verbunden. Solvatisierte Kationen können sich gut durch die Kanäle bewegen. In den Membranen erfolgt

[1] Auch die synonyme Benennung als *Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen* ist geläufig.

der Ladungstransport durch solvatisierte Protonen in Säuren oder Natrium-Ionen in Natronlauge. Klassischerweise werden in saurem Medium Membranen aus Nafion® eingesetzt. Diese Persulfonat-Membran weist eine Leitfähigkeit äquivalent zur Schwefelsäure der Konzentration 1 $\frac{mol}{L}$ auf, wobei der Strom komplett über hydratisierte Protonen übertragen wird.[13] Die Protonen wandern durch die etwa 4 nm breiten Cluster (auch: *inverse Micellen*) von einer ortsfesten Sulfonsäure-Gruppe zur nächsten und passieren die etwa 1 nm breiten Kanäle der Nafion®-Membran, vgl. Abb. 3.1. Der Durchmesser eines Protons beträgt etwa 1.7 fm.[16]

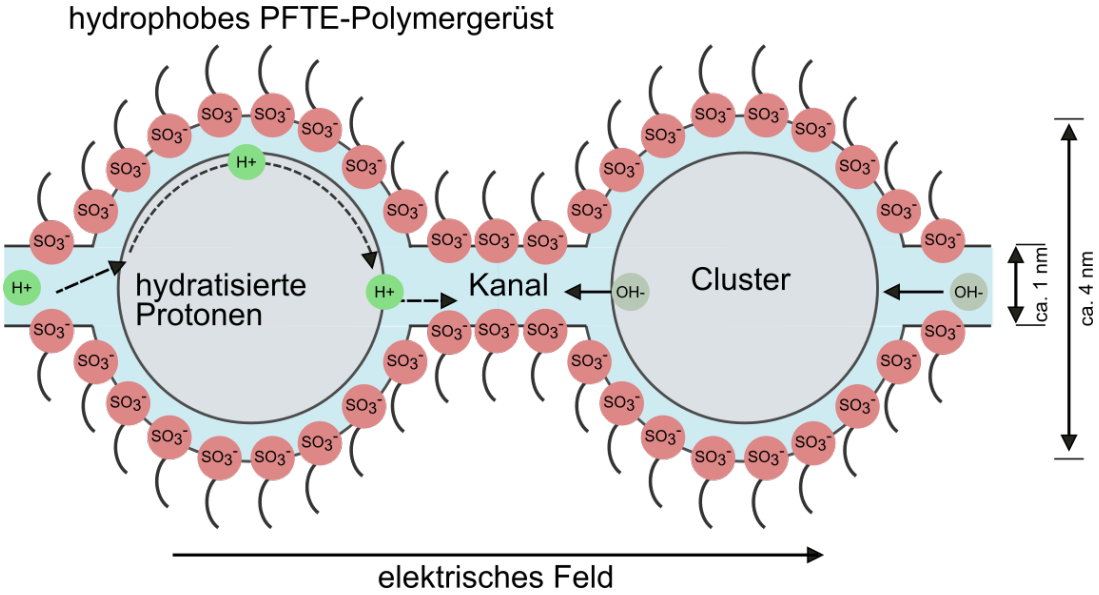



Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Nafion®-Membran. Eigene Darstellung, adaptiert nach Holze [17].

Fallen Polymerelektrolyt-Membranen trocken, bilden sich darin Risse. Auch bei lokaler Überhitzung kann es zur Bildung von *hot spots* kommen, an denen die Funktion der Membran durch Trockenheitsrisse aufgehoben wird.[13] Da ab einer Temperatur von 90 °C die Sulfonsäure-Gruppen zerstört werden, beträgt die Betriebstemperatur von PEMFC gewöhnlich zwischen 60 - 70 °C.[13] Zusätzlich zur gewählten Polymerelektrolytmembran wird die Leitfähigkeit somit auch durch die Wassersättigung und Temperatur beeinflusst.[18]

Meist wird als Brennstoff anodisch Wasserstoff zugeführt, als Oxidationsmittel kathodisch Sauerstoff. Als Produkt entsteht Wasser (siehe Gleichung 3.1), das kontinuierlich abgeführt wird. Die Sauerstoffreduktionsreaktion an der Kathode verläuft an Edelmetallkatalysatoren direkt über einen Vier-Elektronenprozess oder an anderen Katalysatoren indirekt über zwei Zwei-Elektronenprozesse mit Wasserstoffperoxid als Zwischenprodukt.[13,18]

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & 2\,H_2 \rightleftharpoons 4\,H^+ + 4\,e^- \\ \\ \text{Kathode} & O_2 + 4\,e^- \rightleftharpoons 2\,O^{2-} \\ & 2\,O^{2-} + 4\,H^+ \rightleftharpoons 2\,H_2O \\ \hline & O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \rightleftharpoons 2\,H_2O \end{array} \tag{3.1}$$

$$2\,H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2\,H_2O$$

Neben Wasserstoff werden auch andere Brennstoffe, etwa Methanol (Kapitel 3.3), in PEMFC umgesetzt. PEMFC kommen als stationäre und mobile Varianten zum Einsatz. Stationäre Brennstoffzellsysteme werden beispielsweise zur Hausenergieversorgung genutzt.[19] Mobile Varianten dienen sowohl zur Stromversorgung von Computern, Musikgeräten, Mobiltelefonen und Kameras, als auch zum Antrieb von Fahrzeugen. Es werden bereits Brennstoffzellkonzepte in Gabelstaplern, Personen- und Lastkraftwagen, Bussen, Traktoren und Schienenfahrzeugen umgesetzt.[18] Für diese portablen Anwendungen der PEMFC wird Wasserstoff in Druckgaspatronen oder Metallhydridspeichern beziehungsweise Methanol in Vorratsbehältern mitgeführt.[13]

## 3.2. Alkalische Brennstoffzellen

Als alkalische Brennstoffzellen (***A**lkaline **F**uel **C**ell*, *AFC*) werden Niedertemperaturbrennstoffzellen bezeichnet, in denen als Elektrolyt eine wässrige Lauge verwendet wird. Zumeist werden die AFC bei einer Temperatur zwischen 20-90 °C mit Kalilauge, w = 30 %, betrieben. Die Gasdiffusionselektroden bestehen aus mit Raney-Nickel beschichtetem Nickel [2]. Ladungsträger sind Hydroxid-Ionen. Als Brennstoff wird meist Wasserstoff und als Oxidationsmittel Sauerstoff zugeführt. Die Gase gelangen durch die Gasdiffusionselektroden in den Elektrolyten, wo durch die räumliche Trennung der Gase eine „gezähmte“ Knallgasreaktion stattfindet:

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & 2\,H_2 + 4\,OH^- \rightleftharpoons 4\,H_2O + 4\,e^- \\ \\ \text{Kathode} & O_2 + 2\,H_2O + 4\,e^- \rightleftharpoons 4\,OH^- \end{array} \tag{3.2}$$

$$2\,H_2 + O_2 \rightleftharpoons 2\,H_2O$$

[2] Unter *Raney-Nickel* versteht man einen festen, feinkörnigen Katalysator aus einer Aluminium-Nickel-Legierung.

Dabei verläuft die Wasserstoffoxidation in alkalischer Lösung in mehreren Teilschritten, die in Abb. 3.2 skizziert sind. Die Dreiphasengrenze aus Gasraum, Elektrode und Elektrolyt stellt den Reaktionsraum dar.

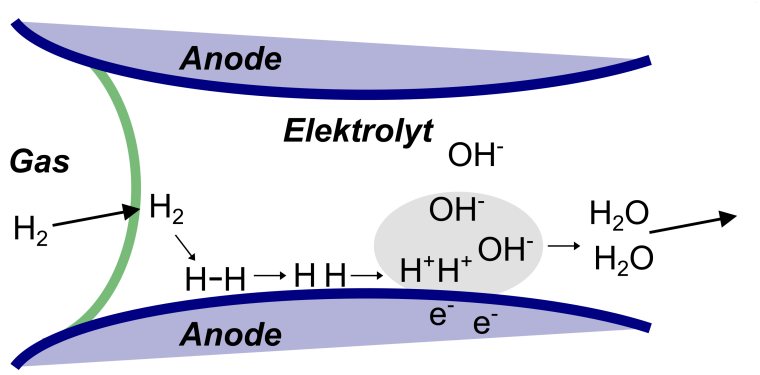



Abbildung 3.2: Wasserstoffoxidation an der Dreiphasengrenze. Eigene Darstellung, adaptiert nach Kurzweil und Schmid [13].

Zunächst diffundiert molekularer Wasserstoff über Poren der Anode in die Elektrolytschicht und adsorbiert dort molekular an elektroaktiven Oberflächenplätzen der Anode.

$$H_2(g) \longrightarrow H_2(aq) \longrightarrow H_2(ad) \tag{3.3}$$

Schließlich dissoziieren Wasserstoff-Moleküle zu jeweils zwei Wasserstoff-Atomen. Es bilden sich oxidativ Protonen, die mit den im Elektrolyt enthaltenen Hydroxid-Ionen zu Wasser-Molekülen rekombinieren. Die entstehenden Wasser-Moleküle werden in den Elektrolyten desorbiert.
Der Verlauf der Sauerstoffreduktion im Alkalischen ist nicht vollständig aufgeklärt.[20] Es werden pro Molekül Sauerstoff vier Elektronen von der Kathode übertragen. Diese Reaktion ist komplex und der wahrscheinliche Verlauf von dem Elektrodenmaterial, Elektrodenpotential und Medium abhängig. Die Überspannung ist jedoch geringer als im Sauren, sodass im Vergleich eine höhere Effizienz erreicht werden kann.[20,21]

Obwohl die Zellspannung technischer AFC kleiner als 1 V ist, liefert die AFC im Reingasbetrieb mit 60-70 % den höchsten Wirkungsgrad aller Brennstoffzellsysteme, im Betrieb mit Luft ist die PEMFC-Technik überlegen.[13] Das in der Umgebungsluft vorkommende Kohlenstoffdioxid reagiert mit der Kalilauge zu Wasser und Kaliumcarbonat:

$$2\,KOH\ (aq) + CO_2\ (aq) \longrightarrow K_2CO_3\ (s) + H_2O\ (l) \tag{3.4}$$

Das Kaliumcarbonat setzt die Gasdiffusionselektroden zu, sodass es zum Leistungsabfall der AFC kommt.
Aufgrund des hohen Wirkungsgrades bei niedriger Arbeitstemperatur, der kostengünstigen Katalysatoren und der schnellen Sauerstoffreduktion im alkalischen Elektrolyten finden die 1902 erstmals erwähnten AFC vielfältige stationäre und mobile Anwendungsbereiche: Neben Kleinanlagen zur Hausenergieversorgung werden AFC auch in der Antriebstechnik in der Raumfahrt sowie für U-Boote genutzt. In der Raumfahrt ist insbesondere die geringe Masse der Zellen und mitgeführten Treibstoffe wichtig, der finanzielle Aufwand ist von geringerer Bedeutung. Bereits seit den 1950er Jahren werden Brennstoffzellen für den Einsatz in der Raumfahrt genutzt und optimiert. Die bemannten Mondflüge der APOLLO-Mission in den Jahren 1960-1965 führten beispielsweise 3 AFC-Stacks aus je 31 Einzelzellen mit sich, die inklusive Tanks 810 kg wogen. Sie erbrachten eine Leistung von 500 kWh, für die es sonst 10-12 t Bleibatterien oder 4 t Silber-Zink-Leichtakkumulatoren gebraucht hätte. In der Antriebstechnik von U-Booten sind Brennstoffzellen von militärischem Vorteil, da ihr Betrieb nicht mit Wärmeentwicklung verbunden ist und sie für die IR-Detektoren anderer Schiffe nicht sichtbar sind.[13]

## 3.3. Direkt-Alkoholische Brennstoffzellen

In Direkt-Alkoholischen-Brennstoffzellen (***D**irect **A**lcohol **F**uel **C**ells, DAFC*) wird die chemische Energie eines als Brennstoff genutzten Alkohols in elektrische Energie und Wärmeenergie überführt.[22] Grundsätzlich eignet sich sowohl ein saures als auch alkalisches Medium für die Zellreaktion. Ein alkalisches Medium wird jedoch aus mehreren Gründen favorisiert: Durch eine bessere Reaktionskinetik der Anoden- und Kathodenreaktion ist die Verwendung anderer Katalysatoren als Platin möglich, die tolerant gegenüber Alkoholen sind.[23] Bislang gebräuchliche Katalysatoren sind Platin-Ruthenium-Legierungen.[14] Insgesamt ist das alkalische Medium weniger korrosiv als das saure, sodass eine größere Vielfalt an Materialien für die Konstruktion der Brennstoffzellen genutzt werden kann.[23] An der Anode findet die Oxidation von Alkohol, an der Kathode die Reduktion von Sauerstoff statt,[23] wie in Gleichung 3.5

für den einfachsten Alkohol Methanol in alkalischem Medium aufgeführt ist:

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & \mathrm{CH_3OH + 6\,OH^- \longrightarrow CO_2 + 5\,H_2O + 6\,e^-} \\ \text{Kathode} & \mathrm{\tfrac{3}{2}\,O_2 + 3\,H_2O + 6\,e^- \longrightarrow 6\,OH^-} \\ \hline & \mathrm{CH_3OH + \tfrac{3}{2}\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O} \end{array} \tag{3.5}$$

DAFC sind meist als PEMFC ohne Elektrolyten konstruiert. Die Halbzellseparation erfolgt über eine Ionenaustauschermembran, wie etwa Nafion®.[13] In der Elektrodenreaktion einer methanolischen PEMFC wird Wasser verbraucht (vgl. Gleichung 3.6), sodass der Zelle kein reines Methanol zugeführt wird. Gebräuchlich sind Methanol-Wasser-Gemische einer Methanol-Konzentration von 1-2 $\frac{mol}{L}$ und eine Betriebstemperatur von 85 °C.[13]

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & \mathrm{CH_3OH + H_2O \longrightarrow CO_2 + 6\,H^+ + 6\,e^-} \\ \text{Kathode} & \mathrm{\tfrac{3}{2}\,O_2 + 6\,H^+ + 6\,e^- \longrightarrow 3\,H_2O} \\ \hline & \mathrm{CH_3OH + \tfrac{3}{2}\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O} \end{array} \tag{3.6}$$

Neben dem beschriebenen Einsatz in direkten Brennstoffzellen, wird Methanol auch in indirekten Brennstoffzellen genutzt, in denen aus Methanol zunächst der Brennstoff Wasserstoff gewonnen wird.[13] Zwar ist Methanol deutlich inaktiver als Wasserstoff, gilt aber dennoch als der elektrochemisch aktivste bekannte organische Brennstoff.[13] Der farblosen Flüssigkeit Methanol wird das Potential zugesprochen, zukünftig eine führende Rolle als Treibstoff oder Energierohstoff zu übernehmen.[24,25]
Aus den in Gleichung 3.5 und 3.6 aufgeführten Anodengleichungen geht hervor, dass pro Molekül Methanol sechs Elektronen auf die Anode übertragen werden. Der Mechanismus der Oxidation von Methanol im Alkalischen ist noch nicht vollständig aufgeklärt.[23] Dennoch ist bekannt, dass der Elektronen-Übertrag nicht in einem Reaktionsschritt erfolgt. Bestehende Erkenntnisse zum Mechanismus auf einem Platinkatalysator sind in Abbildung 3.3 zusammengeführt: Ausgehend von der Adsorption von Methanol-Molekülen an der Katalysatoroberfläche über das Sauerstoff-Atom ergeben sich verschiedene Reaktionswege. Neben Kohlenstoffdioxid entstehen als Nebenprodukte auch Formaldehyd (**6**,**7**) und Formiat-Ionen (**9**). Da während der Methanoloxidation hauptsächlich absorbiertes Kohlenstoffmonooxid auf

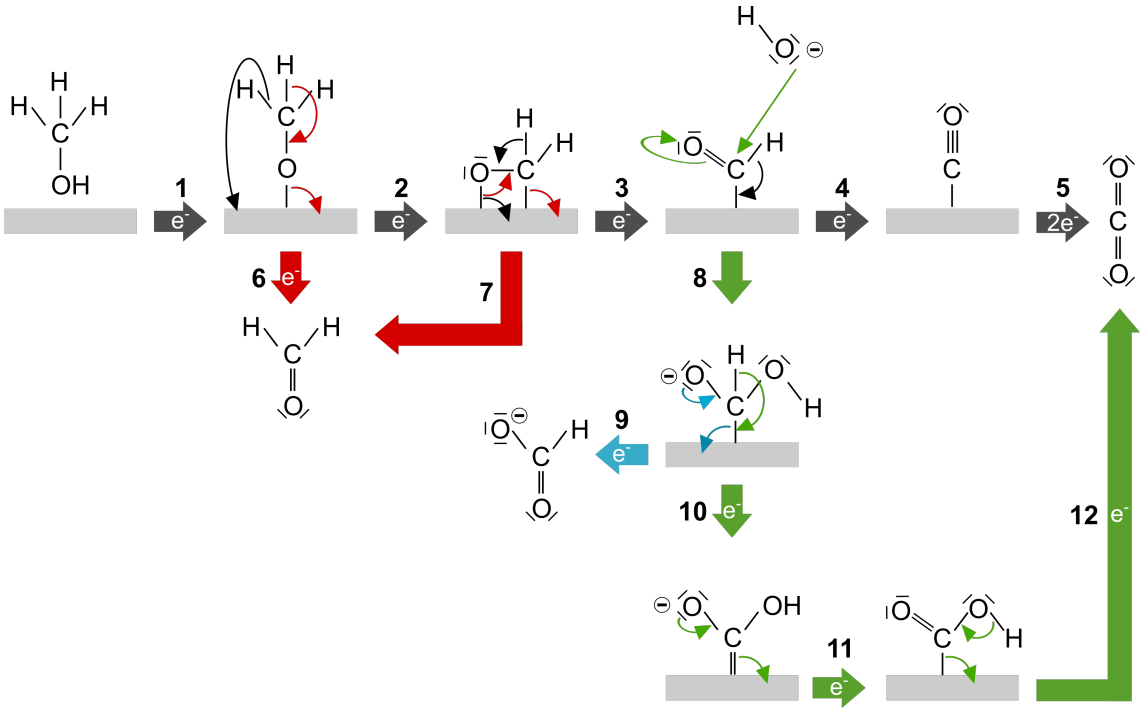



Abbildung 3.3: Mechanismen der Methanoloxidation im Alkalischen. Adaptiert nach Jurzinsky [23, S. 10].

der Katalysatoroberfläche nachweisbar ist, wird die Oxidation des Methanols zu Kohlenstoffdioxid als dominierender Reaktionsweg ausgewiesen (**1**-**5**).
An der Katalysatoroberfläche adsorbierte Hydroxid-Spezies dehydrieren die ebenfalls adsorbierten Methanol-Moleküle zu Methanal-Molekülen, siehe Gleichung 3.7. Da beide Komponenten adsorbiert vorliegen müssen, wird der Vorgang nach Gilman [26] als *reactant pair*-Mechanismus beschrieben.

$$R_{ads}OH + OH_{ads} \longrightarrow R{=}O + H_2O \tag{3.7}$$

Die oxidative Entfernung des adsorbierten Kohlenstoffmonooxids nach dem Langmuir-Hinshelwood-Mechanismus ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt:

$$CO_{ads} + 2\,OH_{ads} \longrightarrow CO_2 + H_2O \tag{3.8}$$

Auch in diesem Fall müssen die Edukte in geeignetem stöchiometrischem Verhältnis die Plätze des Katalysators besetzen, um dort zum Produkt reagieren zu können. Bei Überschreiten eines gewissen Kohlenstoffmonooxidpartialdruckes kommt die Reaktion zum Erliegen, da alle Plätze der Katalysatoroberfläche mit Kohlenstoffmonooxid besetzt sind. Linear gebundenes Kohlenstoffmonoxid gilt daher als wichtigstes Katalysatorgift.[13,23] Diese schleichende Vergiftung des Katalysators durch entstehen-

de Neben- und Zwischenprodukte der Methanoloxidation stellt ein bislang ungelöstes Problem dar.[13]

Neben Methanol können auch höherwertige Alkohole in DAFC eingesetzt werden. Ihre Oxidation verläuft wesentlich komplexer, da sich zusätzliche Reaktionspfade ergeben. Um Alkohole effizient zu nutzen, ist die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung aufzubrechen. Bisher konnte für Ethanol, den einfachsten C2-Alkohol, nur eine geringe Kohlenstoffdioxid-Stromeffizienz erreicht werden.[23,27]
In der ethanolischen DAFC läuft die Oxidation über Acetaldehyd-Moleküle zu adsorbierten Acetyl-Radikalen und schließlich Kohlenstoffdioxid-Molekülen ab. Als Nebenprodukte entstehen Methan und Essigsäure.[13] Die Zellreaktionen können vereinfacht wie folgt beschrieben werden:

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & \mathrm{CH_3CH_2OH + 12\,OH^- \longrightarrow 2\,CO_2 + 9\,H_2O + 12\,e^-} \\ \text{Kathode} & \mathrm{3\,O_2 + 6\,H_2O + 12\,e^- \longrightarrow 12\,OH^-} \end{array} \tag{3.9}$$

$$\mathrm{CH_3CH_2OH + 3\,O_2 \longrightarrow 2\,CO_2 + 3\,H_2O}$$

In DAFC kommt es durch Adsorption von Alkohol-Molekülen an der Membran, Diffusion durch die Membran und anschließende Desorption zum Alkoholübertritt in den Kathodenraum. Ursächlich hierfür kann neben dem Gradienten der Alkoholkonzentrationen zwischen den beiden Halbzellen auch die Konvektion aufgrund unterschiedlicher Drücke sein.[28] Dieser auch als *Crossover* bezeichnete Effekt wird oft effizienzmindernd.[13] Im konkreten Falle des Methanols bewirkt er neben einer parasitären Methanoloxidation an der Kathode sowohl eine Depolarisation der Elektrode als auch ein Mischpotential, was sich an der verringerten messbaren Spannung zeigt. Es kommt zur großflächigen Absorption des Katalysatorgiftes Kohlenstoffmonooxid. Während der Methanoloxidation werden Sauerstoff verbraucht und Wasser gebildet. Die entstehenden Volumina an Wasser verhindern ein Nachströmen von Sauerstoff in den Kathodenraum, sodass die Zellreaktion vollständig zum Erliegen kommt, da die Oberflächenplätze des Katalysators mit Kohlenstoffmonooxid fehlbesetzt sind.[28] Dem Crossover wirkt im alkalischen Medium die elektroosmotische Strömung von Hydroxid-Ionen von der Kathode zur Anode entgegen.[23]
Dieser Crossover-Diffusionseffekt ist bei Ethanol deutlich geringer ausgeprägt.[29] Ethanol ist elektrochemisch weniger aktiv als Methanol, aber aufgrund des geringeren Gefährdungspotentials eher schulgeeignet.

In Tabelle 3.1 sind thermodynamische Daten bisher genannter Brennstoffe vergleichend aufgeführt. Es wird daraus deutlich, dass die erwartbare Zellspannung in Abhängigkeit des Brennstoffes von Wasserstoff über Methanol zu Ethanol abnimmt, wenngleich die Anzahl bei vollständiger Oxidation übertragbarer Elektronen zunimmt:

| **Brennstoff** | $n_{e-}$ | $\Delta H_0^R[\frac{kJ}{mol}]$ | $\Delta G_0^R[\frac{kJ}{mol}]$ | $E^0$ [V] |
|---|---|---|---|---|
| Wasserstoff | 2 | -286 | -238 | 1.23 |
| Methanol | 6 | -727 | -703 | 1.21 |
| Ethanol | 12 | -1386 | -1343 | 1.15 |

Tabelle 3.1: Thermodynamische Daten der Brennstoffe Wasserstoff, Methanol und Ethanol. Daten aus Jurzinsky [23, S. 4] entnommen.

Bislang kommen methanolische DAFC vereinzelt als Antriebstechnik im Individualverkehr vor. Eine vielversprechende Perspektive stellt der Ersatz von Batterien durch methanolische DAFC dar. Die Laufzeit dieser portablen Energiewandler ließe sich durch Nachfüllen von Methanol verlängern.[13]

## 3.4. Biologische Brennstoffzellen

In biologischen Brennstoffzellen (***B**iological **F**uel **C**ells, BFC*) werden an der Anode *Biokatalysatoren* genutzt, um organische Substrate zu oxidieren und die freiwerdenden Elektronen in einem externen Stromkreis nutzbar zu machen[3]. Der allgemeine Aufbau einer BFC ist in Abbildung 3.4 dargestellt:

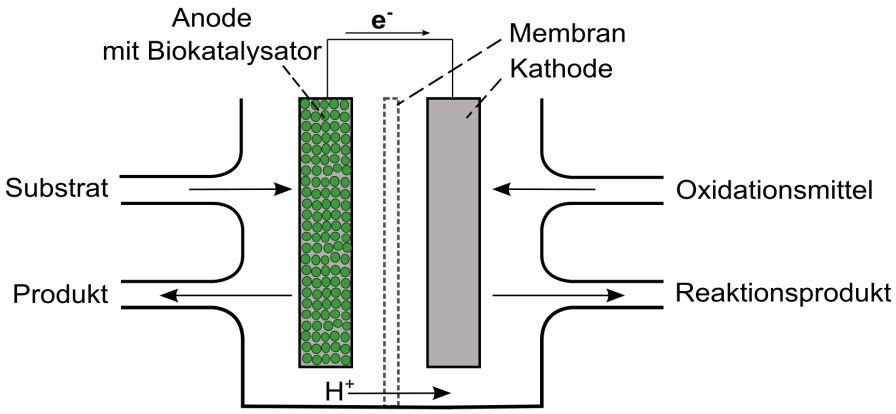



Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau biologischer Brennstoffzellen.

BFC sind meist am Zwei-Kammer-Aufbau orientiert, bei der Anoden- und Kathodenraum durch eine Membran getrennt sind. An der Anode findet die Oxidation des in diesem Kontext als *Substrat* bezeichneten kontinuierlich zugeführten Brennstoffes statt. Oxidationsprodukte dieses Substrats werden anodenseitig abgeführt. Kathodenseitig werden ein Oxidationsmittel - oft Luftsauerstoff - zugeführt und das Reaktionsprodukt abgeführt. Auch kathodenseitig können Biokatalysatoren zum Einsatz kommen. Die Biokatalysatoren liegen entweder immobilisiert an der Elektrodenoberfläche oder diffus im Elektrodenraum vor.
Die biologischen Brennstoffzellen werden je nach eingesetztem Biokatalysator in mikrobielle Brennstoffzellen (***M**icrobial **F**uel **C**ell, MFC*) beziehungsweise enzymatische Brennstoffzellen (***E**nzymatic **F**uel **C**ell, EFC*) unterteilt:
MFC können verschiedene komplexe Substrate vollständig oxidieren und sind meist weniger anfällig für Vergiftungen beziehungsweise den Verlust der Aktivität unter normalen Betriebsbedingungen.
In EFC hingegen werden durch das Schlüssel-Schloss-Prinzip von Enzym-Substrat-Komplexen nur wenige Oxidations- beziehungsweise Reduktionsprozesse spezifischer

[3]Bisweilen werden auch Systeme, in denen die Umwandlung eines primären in einen sekundären Brennstoffe durch Biokatalysatoren der Nutzung dieses sekundären Brennstoffes in geläufigen Brennstoffzellsystemen vorgeschaltet ist, als „indirekte biologische Brennstoffzellen“ betitelt.[30] Im Rahmen dieser Arbeit sind jedoch nur die beschriebenen **direkten** biologischen Brennstoffzellen von Relevanz.

Substrate in einem engen Temperaturbereich katalysiert - was je nach Anwendungsbereich durchaus vorteilhaft sein kann.[30]

Nach einem Überblick von Bioenergiekonversion im Allgemeinen werden nachfolgend zunächst die MFC und anschließend die EFC auch unter Angabe typischer Anwendungsbereiche vorgestellt. Ein detailliertes Erläutern der im Rahmen der Arbeit untersuchten Systeme erfolgt in Kapitel 4, in dem die eigenen Untersuchungen dargelegt werden.

### 3.4.1. Bioenergiekonversion

Während photoautotrophe Organismen unter dem Einfluss von Sonnenlicht organische Verbindungen aufbauen,[31] benötigen chemoorganoheterotrophe Organismen diese Nährstoffe sowohl als Elektronendonatoren zur Energiegewinnung als auch zum Aufbau von Biomasse.[32] Im Stoffwechsel (*Metabolismus*) werden diese Nährstoffe in miteinander vernetzten Reaktionen auf- oder abgebaut. Dabei beschreibt der Begriff *Katabolismus* die Stoffwechselwege, bei denen Brennstoffe unter Freisetzung von nutzbarer Energie abgebaut werden (vgl. 3.10)[4]:

$$\text{Brennstoffe} \xrightarrow{\text{Katabolismus}} \text{Kohlenstoffdioxid} + \text{Wasser} + \text{nutzbare Energie} \tag{3.10}$$

Aus einzelnen Reaktionen setzen sich Stoffwechselwege zusammen, deren Einzelreaktionen durch enzymatische Katalysen spezifisch sind und deren Abfolge durch eine Kopplung von Einzelreaktionen zum Stoffwechselweg thermodynamisch begünstigt wird, sodass die freie Enthalpie insgesamt negativ ist. Thermodynamisch ungünstige Reaktionen können durch Koppeln mit einer begünstigten Reaktion - etwa der Hydrolyse von Adenosintriphosphat (ATP) - ermöglicht werden.[31] Das Nucleotid ATP besteht aus Adenin, Ribose und einer Triphosphateinheit (Abb. 3.5).

[4] Anabole Prozesse, bei denen unter Energieaufwand organische Verbindungen aufgebaut werden, sind im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant.

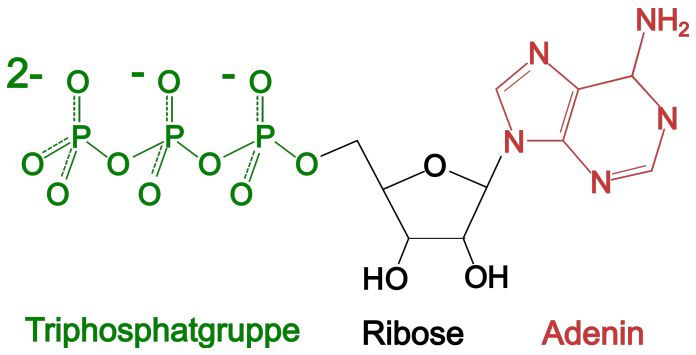



Abbildung 3.5: Strukturformel von ATP.

Da diese Triphosphateinheit zwei Phosphorsäureanhydridbindungen enthält, ist ATP sehr energiereich. Wird ATP zu Adenosindiphosphat (ADP) und Orthophosphat (Pi) beziehungsweise Adenosinmonophosphat (AMP) und Pyrophosphat (PPi) hydrolysiert, nimmt die freie Enthalpie deutlich negative Werte an:

$$\begin{aligned} \mathrm{ATP} + \mathrm{H_2O} &\rightleftharpoons \mathrm{ADP} + \mathrm{Pi} \qquad \Delta G^0 = -30 \tfrac{kJ}{mol} \\ \mathrm{ATP} + \mathrm{H_2O} &\rightleftharpoons \mathrm{AMP} + \mathrm{PPi} \qquad \Delta G^0 = -45 \tfrac{kJ}{mol} \end{aligned} \tag{3.11}$$

ATP stellt lediglich den Enthalpie-Donator, nicht aber eine Speicherform von Energie dar. ATP wird ständig aus ADP regeneriert. Die meisten katabolischen Reaktionen setzen die nutzbare Energie in Form von ATP frei, das als Donator freier Enthalpie bei Prozessen wie der Bewegung, dem aktiven Transport, Biosynthesen oder zur Signalverstärkung wirkt. Die Hydrolyse und Regeneration von ATP sind reversibel, sodass sich insgesamt eine zyklische Reaktionsfolge ergibt (vgl. Abb. 3.6).

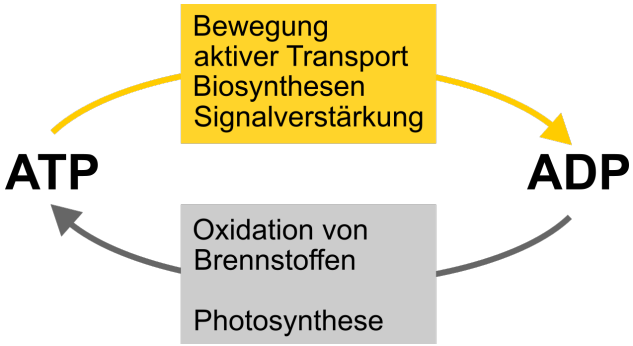



Abbildung 3.6: ATP-ADP-Zyklus. Darstellung adaptiert nach Berg u. a. [31].

Mithilfe des Elektronencarriers Nicotinamidadenindinucleotid ($NAD^+$) kann die ATP-Synthese mit Kohlenstoffoxidation verbunden werden - wie in Abbildung 3.7 beispielhaft für die Oxidation des Glucose-Metaboliten Glycerinaldehyd-3-phosphat dargestellt. Zunächst entsteht durch die Oxidation des Aldehyds ein Acylphosphat

und die freiwerdenden Elektronen gehen auf $NAD^+$ über (**1**)).
Die Hydrolyse des entstandenen 1,3-Bisphosphoglycerats zu 3-Phosphoglycerinsäure wird an die ATP-Synthese gekoppelt (**2**)). Der Elektronencarrier $NAD^+$ wird auch als

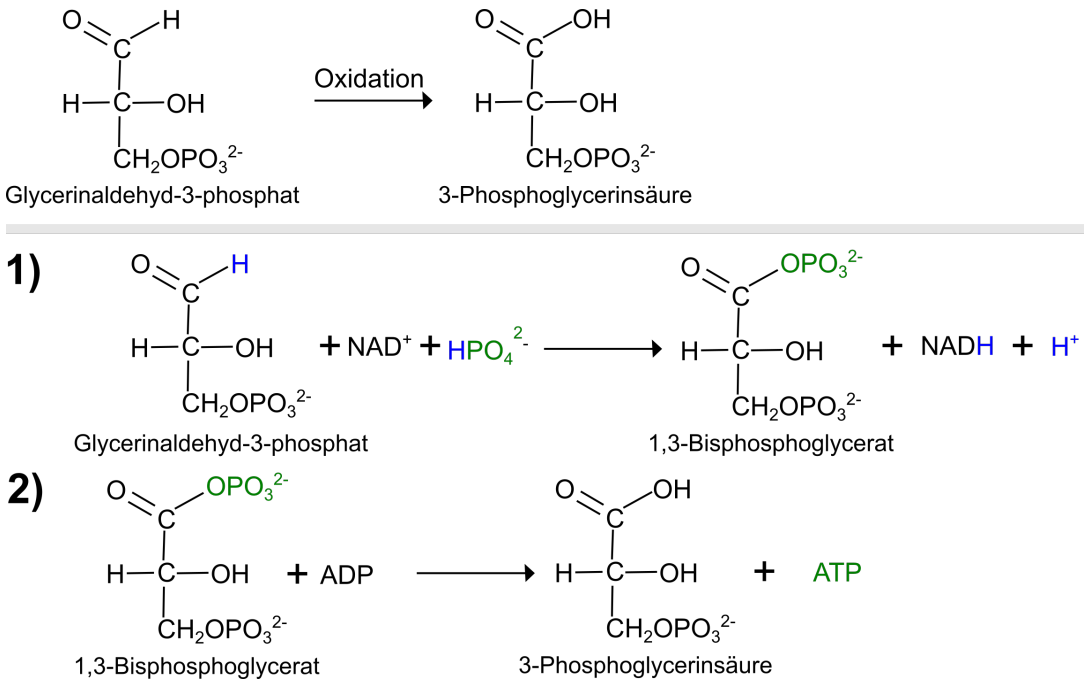



Abbildung 3.7: Beispielhafte Kopplung einer Kohlenstoffoxidation mit der ATP-Synthese.

Reduktionsäquivalent bezeichnet und dient fast ausschließlich der Synthese von ATP. Bei der Oxidation eines Substrates nimmt der Nicotinamid-Ring ein Proton und zwei Elektronen auf (vgl. die reaktive Stelle in Abb. 3.8). Das zweite freiwerdende Proton geht in Lösung.

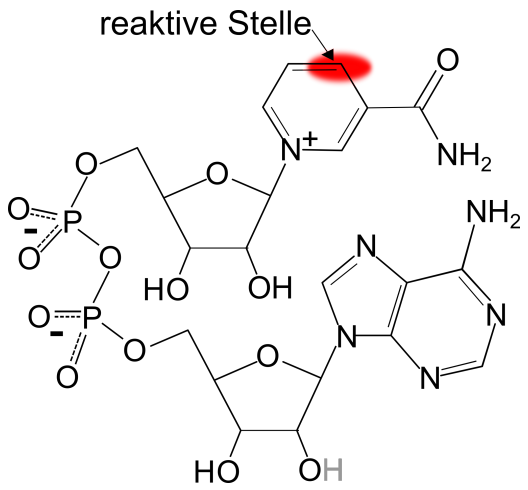



Abbildung 3.8: Oxidierte Form des Elektronencarriers $NAD^+$.

Abhängig von der Verfügbarkeit externer Oxidationsmittel beschreiten chemoorganoheterotrophe Organismen unterschiedliche Reaktionspfade: Bei Anwesenheit von Sauerstoff - unter aeroben Bedingungen - findet die Atmung statt. Dieser Reaktionspfad geht mit dem höchst möglichen Energiegewinn (freie Enthalpie) nach Kaskaden von Redox-Reaktionen einher. Unter anaeroben Bedingungen steht kein Sauerstoff zur Verfügung, sodass zur Energiegewinnung Gärung betrieben wird. Bei diesem Stoffwechselweg der Disproportionierung werden Teile der organischen Substrate oxidiert und andere reduziert. Auf diese Weise können nur etwa 7-8 % der in Glucose enthaltenen Energie den Mikroorganismen zugänglich gemacht werden.[33]

## 3.5. Mikrobielle Brennstoffzellen

Bereits im Jahr 1911 postulierte Potter [34], dass alle mit chemischen Reaktionen einhergehenden physiologischen Prozesse einen Elektronen-Austausch-Prozess beinhalten. Diese Aussage belegte er mit dem ersten MFC-Aufbau, in dem mithilfe von Hefe als Biokatalysator Glucose vergoren und Spannungen von bis zu 0.5 V gemessen wurden.[34]
Aufgrund der recht geringen gemessenen Stromstärken waren MFC in der Forschung zunächst von mäßigen Interesse, bis die NASA zur bemannten Raumfahrt MFC entwickeln wollte, die aus menschlichen Ausscheidungen elektrischen Strom gewinnen können. Der konkurrierend entwickelten Photovoltaik wurde jedoch der Vorzug gewährt, da sie die Anforderungen der Raumfahrt kurzfristig besser erfüllen konnte.[35]
Die Vorteile des Einsatzes von MFC sind dennoch nicht von der Hand zu weisen, weswegen sie seit der Jahrtausendwende verstärkt in den Fokus der Forschung rücken: Haushalts- und Industrieabwässer sind ein komplexes Gemisch organischer und anorganischer Verbindungen. Während klassische Elektrokatalysatoren in einem solchen Milieu beispielsweise durch Schwefelwasserstoff vergiftet werden, sind Mikroorganismen als Biokatalysatoren in der Lage, Substrate aus Abfällen und Abwässern oxidativ zu katabolysieren und freigesetzte Elektronen auf eine Elektrode zu übertragen. Dabei wird folglich Abwasser-Aufreinigung mit Gewinn von Nutzenergie gekoppelt.[35] Während sonst in FC unter eng definierten Bedingungen niedrig molekulare Brennstoffe wie Wasserstoff und Methanol umgesetzt werden,[35] werden MFC je nach Biokatalysator überwiegend bei annähernd neutralen pH-Werten im Bereich von sechs bis acht, atmosphärischen Drücken und Temperaturen zwischen 4-37 °C betrieben.[36]

So divers wie die Mikroorganismen der Umwelt, so vielfältig sind die potentiellen Substrat-Mikroorganismus-Kombinationen zum Einsatz in MFC und damit die Möglichkeiten des Elektronenübertrages auf die Anode.[35]

### 3.5.1. Elektronenübertrag auf Anode

Die Art des **e**xtrazellulären **E**lektronen**t**ransfers (*EET*) auf die Anode hat entscheidenden Einfluss auf die Leistung einer MFC. Der Übergang des Elektrons von der Zelle des Mikroorganismus auf die Elektrode stellt das verbindende Element zwischen Mikrobiologie und Elektrochemie dar.[33] Bislang konnten verschiedene EET-Mechanismen ermittelt beziehungsweise vorgeschlagen werden: Der **d**irekte **E**lektronen**t**ransfer (*DET*) über transmembrale Redox-Proteine (Abb. 3.9a)), der

über bakterielle Protein-Nanowires ablaufende Elektronentransport (Abb. 3.9b)) und der über zelleigene beziehungsweise künstlich zugesetzte Mediatoren realisierte Elektronentransport (***M****ediierter* ***E****lektronen****t****ransport, MET*) (Abb. 3.9c)).[37] Diese Transportmechanismen werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

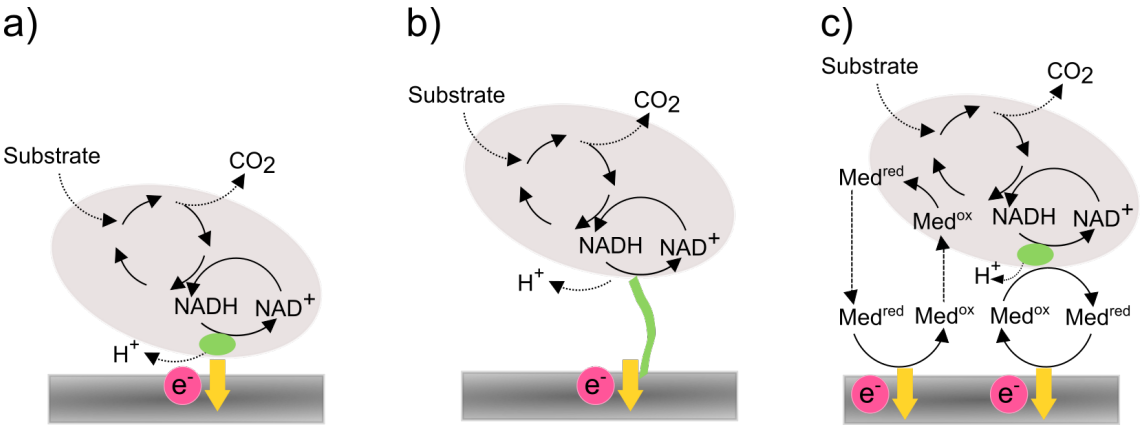



Abbildung 3.9: Schematische Darstellung der Mechanismen extrazellulären Elektronentransportes. Adaptiert nach Schröder [33] und Agler-Rosenbaum u. a. [37].

#### 3.5.1.1. Direkter Elektronentransport

Im Zuge des DET werden Elektronen aus dem Zellinneren über multiple Häm-Einheiten transmembraler Redox-Proteine - wie etwa Cytochrome - auf eine Elektrode übertragen. Diese Übertragung ist nur dann möglich, wenn sich die Elektrode in unmittelbarer Nähe der Zellmembran befindet.[37] Für Mikroorganismen der Gattung *Geobacter* ist der Mechanismus bereits detaillierter beschrieben: An der inneren Zellmembran wird der Elektroneneinfluss in die Membran durch eine enzymatische Reduktion der Eisen(III)-Kationen in den Hämen der Cytochrome initiiert. Der Transport durch das Periplasma erfolgt durch eine Kaskade von Elektronenübergängen zwischen periplasmatischen Cytochromen. Die Cytochrome an der äußeren Zellmembran wirken schließlich als Reduktionsmittel, indem sie die extrazellulären Metall-Ionen (der Elektrode) reduzieren. Im letzten Schritt erfolgt ein Elektronenausfluss aus der Membran beziehungsweise des gesamten zellulären Raums. Auf diese Weise ist es Bakterien der Gattung *Geobacter* möglich, pro Bakterium $5 \cdot 10^5$ Elektronen pro Sekunde freizusetzen.[38] Für die Gattung *Shewanella* wurden membranständige Flavine als Co-Faktoren der Cytochrome als erste endogene extrazelluläre Elektronenshuttles identifiziert: Entzog man dem Mikrofilm die Flavine, sank die Elektronenübertragungsrate auf die Elektrode um 70 %.[39,40]
Innerhalb eines Biofilms ist es methanbildenden Mikroorganismen möglich, über

endogene Elektronenshuttles wie etwa Wasserstoff und Formiat Elektronen zwischen Bakterien verschiedener Stämme und Gattungen zu transportieren.[39] Dies kann als Indiz dafür gesehen werden, dass ein DET an die Elektrode über mehrere Bakterienschichten möglich ist.

#### 3.5.1.2. Elektronentransport über Nanowires

Einigen Mikroorganismen ist es möglich, als *Nanowires* bezeichnete Pili-Strukturen auszubilden. Über diese Strukturen werden Elektronen intrazellulären Ursprungs durch Biofilme beziehungsweise zu angrenzenden Oberflächen transportiert. Die am Zellkörper verankerten Nanowires einiger *Geobacter*- und *Shewanella*-Biofilme verfügen über annähernd metallische Leitfähigkeit.[37,39] Die Nanowires von *Geobacter sulfurreducens* erreichen Durchmesser von 3-5 nm und eine Länge von bis zu 20 mm. Der genaue Mechanismus des Elektronentransfers ist bislang nicht eindeutig beschrieben und mutmaßlich abhängig von der jeweiligen Spezies. Es wird jedoch postuliert, dass der Elektronentransport aus einer einzelnen Zelle entlang eines Netzwerkes an Cytochromen der äußeren Zellmembranen, extrazelluläre Polymerstrukturen und Nanowires abläuft.[39]

#### 3.5.1.3. Mediierter Elektronentransport

Durch die Lösung kann der Elektronentransport in Form von reduzierten Spezies erfolgen, sodass ein direkter Kontakt von Mikroorganismus und Elektrode obsolet ist.[37] Diese Spezies ist ein gelöstes und somit in Lösung mobiles Redox-Shuttle (auch: *Mediator*).[33] Es wird zwischen *endogenen* und *exogenen Redox-Shuttles* unterschieden, die den Elektronentransport mediieren: Während *endogene Shuttles* von dem Mikroorganismus selbst gebildet und freigesetzt werden, bezeichnet der Ausdruck *exogene Shuttles* solche Mediatoren, die zur Steigerung der Übertragungsrate dem System von außen zugefügt werden[5]. Mediatoren sind über mehrere Redox-Zyklen stabil.[39]

### 3.5.2. Exogene Redox-Mediatoren

In mikrobiellen Brennstoffzellen können exogene Redox-Mediatoren eingesetzt werden, um den Elektronentransfer aus den Mikroben zur Anode zu verbessern. Diese Mediatoren wirken als Elektronenshuttle, in dem sie mit Substanzen aus dem katabolischen Stoffwechsel interagieren und Elektronen aus dem intrazellulärem Raum in

[5] Der in der Literatur oft verwendete Ausdruck „mediatorless microbial fuel cell“ meint tatsächlich nur, dass keine synthetischen Mediatoren eingesetzt wurden. Nicht immer bedeutet es, dass der Elektronentransport ohne endogene Mediatoren verläuft.[33]

den extrazellulären Bereich der Anode transportieren. Der Redox-Mediator ist auf die Mikroben-Spezies beziehungsweise den Biofilm spezifisch abzustimmen. Grundsätzlich gelten mehrere Anforderungen für Redox-Mediatoren:[41]

- elektrochemische Aktivität
- keine Toxizität gegenüber den verwendeten Mikroorganismen
- Zellmembrangängigkeit
- geeignetes Redox-Potential für den angedachten Elektronentransfer
- Löslichkeit und Stabilität im verwendeten Medium
- schnelle Kinetik bei der Elektronenübertragung auf die Anode

Derzeit werden verschiedene Redox-Mediatoren in MFC eingesetzt und deren Einfluss auf Zellleistung und den Stoffwechsel der Mikroorganismen untersucht. In Tabelle 3.2 ist eine Auswahl in MFC verwendeter Redox-Mediatoren angeführt.[41]

| **Substanzklasse** | **Redox-Mediator** | **Redox-Potential E [V]** |
|---|---|---|
| Phenazine | Neutralrot | -0.290 |
| | Safranin | -0.29 |
| Phenotiazine | Methlyenblau | -0.055 |
| | Toluidinblau | 0.03 |
| | Thionin | 0.06 |
| | Phenothiazinon | 0.13 |
| Quinone | 2-Hydroxy-1,4-naphthoquinon | -0.14 |

Tabelle 3.2: Auswahl in MFC eingesetzter exogener Redox-Mediatoren.

### 3.5.3. In MFC eingesetzte Mikroorganismen

In vielen Anwendungen werden anstelle von Reinkulturen nicht charakterisierte mikrobielle Mischkulturen für mikrobielle Brennstoffzellen genutzt, da mit Biofilmen gemischter Bakterienkulturen höhere Stromdichten erreicht werden können.[42,43] Unter geeigneten Bedingungen siedeln sich Mischkulturen selbsttätig nur durch das Potential einer Anode zu elektrokatalytisch aktiven Biofilmen an.[35] In den Biofilmen werden Mikroorganismen unterschiedlicher Funktionalitäten benötigt: So zerwirken hydrolysierende Mikroorganismen organische Substrate in organische Säuren, die

wiederum elektroaktiven Mikroorganismen als Grundlage zur Stromfreisetzung dienen. Auch das Vorkommen von Mikroben, die die Leitfähigkeit des Biofilms durch Ausbilden von Protein-Nanowires erhöhen, begünstigen höhere Stromdichten.[37] Häufig werden Mikroorganismen der Gattungen *Geobacter* und *Shewanella* gezielt in Biofilme eingebracht und deren Funktionen untersucht.[44] Jedoch wurde die Fähigkeit, Elektronen abzugeben oder aufzunehmen, für viele weitere Organismen beschrieben.[37]

### 3.5.4. Anwendungsgebiete

Mikrobielle Brennstoffzellen werden bislang hauptsächlich in stationären Anwendungen genutzt, um mithilfe der Stoffwechselaktivität der Mikroben Abwasser aufzureinigen und gleichzeitig Strom zu generieren. Aufgrund der Vielzahl möglicher Biofilme, ist das Einsatzspektrum entsprechend divers: Mikrobielle Brennstoffzellen werden in Haushalts-, Industrie- und Tierhaltungsabwässern eingesetzt. Neben kommunalen Abwässern[45–47] kann auch der Belebtschlamm selbst als Substrat genutzt werden.[48] Weiterhin können etwa Melasse-Abwässer[45,49] und auch das Sicker-Wasser aus Deponien,[50] mit Ölsand belastetes Prozesswasser[51] sowie Abwässer der Tierhaltung[45,52] zur Stromgewinnung herangezogen werden.
Im mobilen Bereich wurden bislang wenige Anwendungen realisiert: Neben einem Roboter, dessen Energieversorgung über eine MFC mit dem Biokatalysator *Escherichia coli* im künstlichen Magen gewährleistet ist,[53,54] sind mit Urin als Substrat-Lösung betriebene Geräte bekannt, die etwa zum Aufladen von (Handy-)Akkus genutzt werden können.[55,56]

### 3.5.5. Bestehende Herausforderungen

Insgesamt betrachtet, ist die Technologie der mikrobiellen Brennstoffzellen noch im Entstehen begriffen, sodass zahlreiche Optimierungs- und Variationsmöglichkeiten ausstehen.[54] Im Bereich der Abwasserreinigung besteht beispielsweise eine Herausforderung darin, eine Hochskalierung vorzunehmen und die bislang häufig zur Sauerstoffreduktion genutzte Platin-Kathode durch kostengünstige Materialien zu substituieren.[46] Bereits jetzt ist jedoch der Einsatz von MFC gegenüber dem gewöhnlichen Belebtschlammverfahren gemessen an Betriebskosten und Stromgewinn auch wirtschaftlich vorteilhafter.[57] Bei Betrachtung der Energieeffizienz wird der Entwicklungsbedarf von in der Abwasserreinigung genutzten MFC deutlich: Aufgrund der bislang geringen Leistungsdichten von MFC sind Betriebsdauern von minimal 2.7 Jahren am Beispiel der Sediment-MFC notwendig, um einen Energiebetrag zu

generieren, der der zur Konstruktion und etwa zum Betrieb von Pumpen genutzten Energie entspricht (*Energy Payback Time*).[58]
Neben der Veränderung von Zellgeometrien, Oberflächenbeschaffenheiten, Substraten und exogenen Mediatoren wird gegenwärtig auch die gezielte Genmanipulation von Mikroorganismen als Biokatalysatoren zur Verbesserung des Elektronentransfers als die Elektrode als Maßnahme zur Leistungssteigerung von MFC erforscht.[59]

## 3.6. Enzymatische Brennstoffzellen

Enzymatische Brennstoffzellen sind bioelektrische Aufbauten, in denen Enzyme an mindestens einer Elektrode zur Katalyse der Umwandlung von chemischer in elektrische Energie genutzt werden. Mit der Vorstellung der ersten EFC von Yahiro u. a. [60] im Jahr 1964 wurde der grundlegende Aufbau sowie die Funktionsweise definiert (Abb. 3.10).

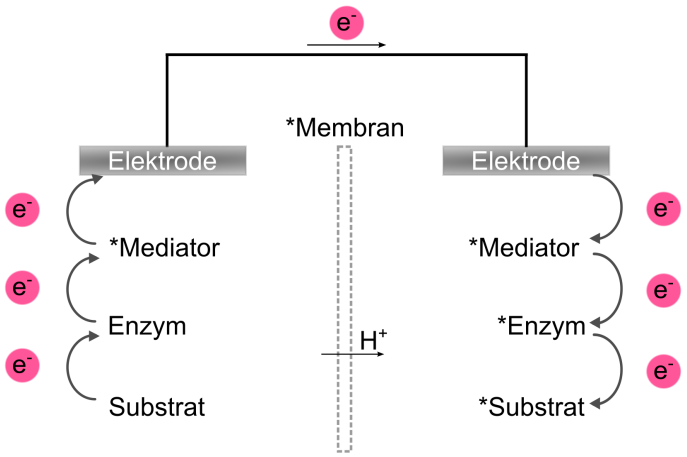



Abbildung 3.10: Funktionsschema einer enzymatischen Brennstoffzelle. *Mit * gekennzeichnete Komponenten sind optional.* Eigene Darstellung angelehnt an Rasmussen u. a. [61].

Durch die von Enzymen katalysierte Oxidation eines Substrats gehen Elektronen vom Substrat auf das Enzym über. Der Elektronentransfer auf die Anode erfolgt entweder direkt (DET) oder durch einen Mediator (MET).[62,63] Da die an Anode beziehungsweise Kathode eingesetzten Enzyme gemäß des Schlüssel-Schloss-Prinzipes substratspezifisch arbeiten, ist eine Membran nicht unbedingt notwendig, sofern die Enzyme entsprechend immobilisiert vorliegen.[61,64,65] An der Anode werden häufig

Dehydrogenasen wie etwa $\beta$-Glucoseoxidase und kathodenseitig Laccase eingesetzt.[61] Enzyme stellen allgemein die Katalysatoren biologischer Systeme dar. Sie sind spezifisch hinsichtlich der katalysierten Reaktionstypen und der Substrate. Meist katalysiert ein Enzym eine spezielle oder wenige sehr ähnliche Reaktionstypen.[31] Angepasst an diese Spezifität ergeben sich Anwendungsbereiche, wie nachfolgend aufgegriffen wird.

### 3.6.1. Anwendungsgebiete

Enzymatische Brennstoffzellen werden mit zwei unterschiedlichen Intentionen eingesetzt: Zur Biosensorik und mobilen Stromgeneration.
Als *Biosensoren* werden an dieser Stelle analytische Geräte verstanden, die Enzyme zur Detektion beziehungsweise auch Quantifizierung spezieller Stoffe nutzen. Sie werden sowohl zur Qualitätskontrolle von Lebensmitteln, Überwachung industrieller Prozesse und Schadstoffe als auch zu biomedizinischen Analysen genutzt.[65]
Glucose-Sensoren zum Monitoring des Blutzucker-Spiegels von Diabetiker stellen ein Hauptanwendungsgebiet im Bereich der Medizin dar. So werden beispielsweise in Gebieten mit unzureichender medizinischer Infrastruktur EFC aus lowcost Materialien zum Monitoring des Blutzucker-Spiegels genutzt.[66] Daneben werden derzeit *in vitro* Geräte erprobt, die perspektivisch *in vivo* den Blutzucker-Spiegel kontinuierlich überwachen sollen.[67] Seitdem im Jahr 2003 erstmalig eine EFC in einer Weintraube als lebendigem Organismus betrieben werden konnte,[68] rücken die Bestrebungen von implantierbaren Biosensoren und Stromgeneratoren vermehrt in den Fokus. Auch die Integration von EFC zum Monitoring in Kontaktlinsen und Pflaster wird untersucht. Dieser Anwendungsbereich befindet sich aktuell im Tierversuchsstadium.[61,69]

### 3.6.2. Bestehende Herausforderungen

Bislang weisen EFC recht geringe Leistungsdichten auf, sind hinsichtlich der Stabilität und somit der Betriebsdauer noch nicht optimiert. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden interdisziplinäre Ansätze verfolgt: Seitens der Biotechnologie wird versucht, durch Enzym-Engineering und die Wahl extremophiler Enzyme die Leistung zu steigern, während von der Materialwissenschaft die Anpassung von Elektroden-Oberflächen an Enzym-Spezifika intendiert werden.[61] Weiterhin wird versucht, den Sauerstoffgehalt an der Kathode zu erhöhen.[70]

# 4. Eigene Untersuchungen und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die eigenen Untersuchungen und Ergebnisse zu Schulversuchen verschiedener Brennstoffzelltypen vorgestellt. Zunächst werden Versuche zu den etablierten Brennstoffzelltypen wie der alkalischen Brennstoffzelle (Kapitel 4.1) und direkt-alkoholischen Brennstoffzelle (Kapitel 4.3) charakterisiert, ehe Untersuchungen zu schulgeeigneten biologischen Brennstoffzellen als innovative Systeme beleuchtet werden: Neben mikrobiellen Brennstoffzellen mit der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* in Kapitel 4.4 beziehungsweise Milchsäure-Kulturen als Biokatalysatoren (Kap. 4.5) werden auch enzymatische Brennstoffzellsysteme mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase in Abschnitt 4.6 sowie abschließend in Kapitel 4.7 mit der als Lactase bekannten $\beta$-Galactosidase erläutert.

Die jeweiligen genauen Versuchsdurchführungen sowie die Angabe der verwendeten Geräte, Materialien und Chemikalien sind in Anhang B hinterlegt.

## 4.1. Alkalische Brennstoffzelle

Der Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle nach Tausch u. a. [10] erfolgt in einem Zwei-Schritt: Im ersten Schritt werden durch Elektrolyse die zum Betrieb der Brennstoffzelle benötigten Reaktionsgase Wasserstoff und Sauerstoff generiert, bevor im zweiten Schritt der Betrieb des so entstandenen galvanischen Elements erfolgt (vgl. Abb. 4.1). Das theoretisch erreichbare Zellpotential unter Standardbedingungen kann unter Berücksichtigung der GIBBSchen freien Reaktionsenthalpie für Produktwasser, $\Delta G^0$ = -237.13 $\frac{kJ}{mol}$, berechnet werden:[13]

$$E^0 = \Delta E^0 = -\frac{\Delta G^0}{2 \cdot F} = 1.23\ V \tag{4.1}$$

Dieser Modellversuch wurde hinsichtlich der Elektrolyt-Konzentration und Art des Elektrodenmaterials verändert. Die Intention der Versuchsreihe bestand darin, eine

Variante zu identifizieren,

- deren Elektrolyt-Konzentration zur Minimierung davon ausgehender Gefährdung gering ist.
- die eine Ruheklemmspannung[1] nahe am Erwartungswert von 1.23 V aufweist.
- bei der die Bildung (und Rückbildung) der Gasblasen an den Elektroden in den jeweiligen Versuchsschritten gut ersichtlich ist.
- deren Stromstärke dazu ausreicht, kurzfristig einen Motor für niedrige Stromstärken zu betreiben.

Zur Elektrolyse wurde für 30 s beziehungsweise 60 s mithilfe einer Zink-Kohle-Flachbatterie eine Spannung von 4.5 V angelegt (Abb. 4.1, 1. Schritt). Zur Beschreibung der jeweiligen Varianten wurde jeweils zunächst die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 180 s mit dem Messwerterfassungssystem „Pocket Cassy“ dreifach bestimmt. Im Anschluss wurde ein Motor für niedrige Stromstärken angeschlossen und überprüft, ob beziehungsweise wie lange er betrieben werden kann (Abb. 4.1, 2. Schritt).

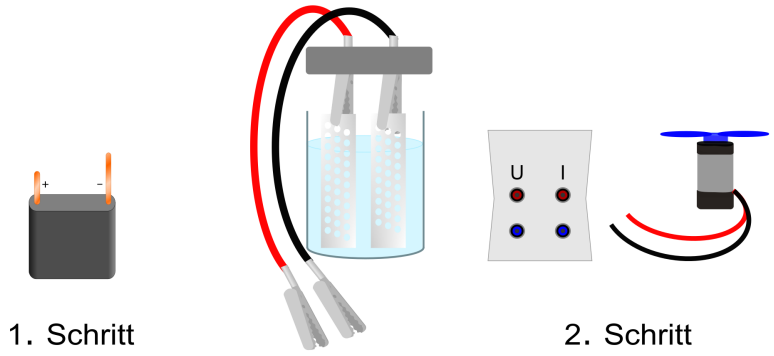



Abbildung 4.1: Aufbau des Modellversuchs zur alkalischen Brennstoffzelle.

Die erhaltenen Messwerte für die Stromstärke lagen unterhalb des Messbereiches des Pocket Cassy, sodass keine entsprechenden Messreihen aufgenommen wurden.
Zur Wahrung der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit wurden Maßnahmen getroffen: Es wurden jeweils 40 mL des Elektrolyten in einem 50 mL-Becherglas vorlegt. Die gleiche Schaumstoffelektrodenhalterung, deren Löcher einen Abstand von 1.5 cm aufweisen, wurde für alle Messungen genutzt. Für die Messungen unter

[1] Unter dem Begriff *Ruheklemmspannung* wird in dieser Arbeit die messbare Spannung einer Brennstoffzelle ohne Betrieb eines Verbrauchers verstanden. Die Begriffe *Spannung* und *Ruheklemmspannung* werden synonym verwendet.

Beteiligung von Rasierscherfolien wurden dieselben Exemplare verwendet[2]. Weiterhin kamen die gleichen Kabel bei allen Messungen mit demselben Messgerät zum Einsatz.

### 4.1.1. Variation der Elektrolyt-Konzentration

In der Vorschrift nach Tausch u. a. [10] ist als Elektrolyt-Lösung eine Kalilauge der Konzentration von $c = 0.1\frac{mol}{L}$ vorgesehen. Der Aufbau wurde mit verschiedenen Konzentrationen zwischen $c = 0.01\frac{mol}{L}$ und $c = 1.0\frac{mol}{L}$ vermessen. In jedem Fall ist die Elektrolyt-Lösung stark alkalisch.
Hinsichtlich der messbaren Spannung während des Betriebs der Brennstoffzelle (2. Schritt) wurde der Trend deutlich, dass diese antiproportional zur Konzentration war (vgl. Abb. 4.2). Die niedrigste gewählte Elektrolyt-Konzentration ($c = 0.01\frac{mol}{L}$) wies eine dem Erwartungswert von 1.2 V entsprechende Ruheklemmspannung auf, die gegenüber den Vergleichsmessungen langsamer abnahm.

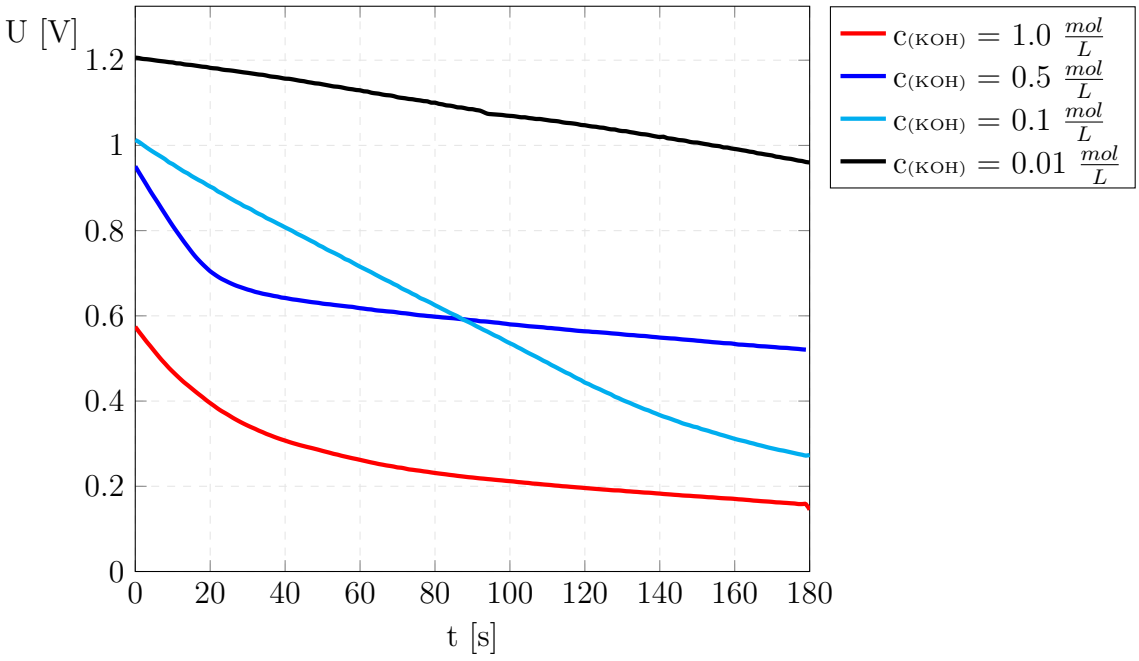



Abbildung 4.2: Spannung bei Betrieb der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Konzentration der Kalilauge.

Die beobachteten Trends lassen sich möglicherweise darüber erklären, dass mit abnehmender Elektrolyt-Konzentration während der Elektrolyse augenscheinlich Gasblasen kleineren Durchmessers gebildet werden und die Gasbildungsrate pro

[2] Bei den verwendeten Rasierscherfolien der Marke Braun handelt es sich um platinierte Nickelnetze, die als lowcost Platinkatalysatoren genutzt werden können.[10,71]

Zeiteinheit niedriger ist. Diese kleineren Gasblasen scheinen eher an der netzartigen Oberfläche der Rasierscherfolien zu verbleiben. Je höher die Elektrolyt-Konzentration war, desto heftiger war die während der Elektrolyse beobachtbare Gasbildung: Bei den Konzentrationen von 0.5 $\frac{mol}{L}$ und 1.0 $\frac{mol}{L}$ stiegen große Teile der an den Scherfolien gebildeten Gasblasen unmittelbar an die Flüssigkeitsoberfläche auf und entwichen in den Gasraum über der Flüssigkeit (vgl. Abb. 4.3), sodass sie für den eigentlichen Betrieb der Modell-Brennstoffzelle nicht mehr zur Verfügung standen.



(a) Ansicht von schräg oben

(b) Seitliche Ansicht

Abbildung 4.3: Beispielhafte Eindrücke vom Schäumungsverhalten der Kalilauge der Konzentration 1.0 $\frac{mol}{L}$ während der Elektrolyse.

Die spezifische Leitfähigkeit $\kappa$ starker Elektrolyte wie Natriumhydroxid ist eine Funktion der Konzentration. Sie nimmt zunächst mit der Konzentration zu und weist unter Standardbedingungen bei etwa 5 $\frac{mol}{L}$ ein Maximum auf. Dieser Zusammenhang gilt auch für Kaliumhydroxid, da die Hydroxid-Ionen in Lösung maßgeblich für die Leitfähigkeit sind.[15] Daraus lässt sich ableiten, dass die Kalilauge der Konzentration von 1.0 $\frac{mol}{L}$ die höchste spezifische Leitfähigkeit der vermessenen Auswahl aufweist, was zu einer höheren Gasbildung pro Zeiteinheit führt. Da in dem Aufbau des Modellversuchs weder Bereiche zum Auffangen entstehender Gasvolumina noch eine Halbzelltrennung vorgesehen ist, kann es neben dem Entweichen der Gase aus der Flüssigkeit auch durch Diffusion zur unkontrollierten Reaktion von Sauerstoff und Wasserstoff sowie einer Mischpotentialbildung kommen, sodass eine Ruheklemmspannung deutlich unter dem Erwartungswert messbar ist. Diese Effekte traten auch bei einer auf 30 s verkürzten Elektrolysezeit auf. Aufgrund der im Anschluss an die Elektrolyse einsetzenden Reaktion von Sauerstoff und Wasserstoff unter Verbrauch der zuvor gebildeten Gasvolumina, nimmt in allen vermessenen Varianten die Spannung im Verlauf der Zeit ab. Auch für messbare Stromstärken ist eine rasche

Abnahme zu erwarten, da die geringen in der Elektrolyt-Lösung gelösten Mengen an Reaktionsgasen schnell verbraucht sind.
Den Messungen nach erschien Kalilauge der Konzentration von 0.01 $\frac{mol}{L}$ am geeignetsten. Dort war die Gasbildung während der Elektrolyse jedoch kaum erkennbar und die Stromstärke beim Betrieb der Brennstoffzelle zu gering, um einen Motor anzutreiben. Die zweithöchsten Spannungswerte wurden mit einer Elektrolyt-Konzentration von 0.1 $\frac{mol}{L}$ erreicht. Bei dieser Konzentration war eine deutliche Gasbildung während der Elektrolyse und Rückgang der Gasblasen bei Betrieb der Brennstoffzelle zu erkennen. Die Stromstärke während des Betriebs reichte aus, um den Motor mindestens 10 s zu betreiben. Die Leistung des Systems konnte nicht ermittelt werden, da die zur Verfügung stehenden Messgeräte nicht hinreichend sensibel sind.
Folglich stellte sich die Elektrolyt-Konzentration von 0.1 $\frac{mol}{L}$ wie sie auch bei Tausch u. a. [10] vorgeschlagen ist, auch im Rahmen dieser Untersuchungen als bester Kompromiss hinsichtlich der angelegten Kriterien heraus.

### 4.1.2. Variation der Elektroden

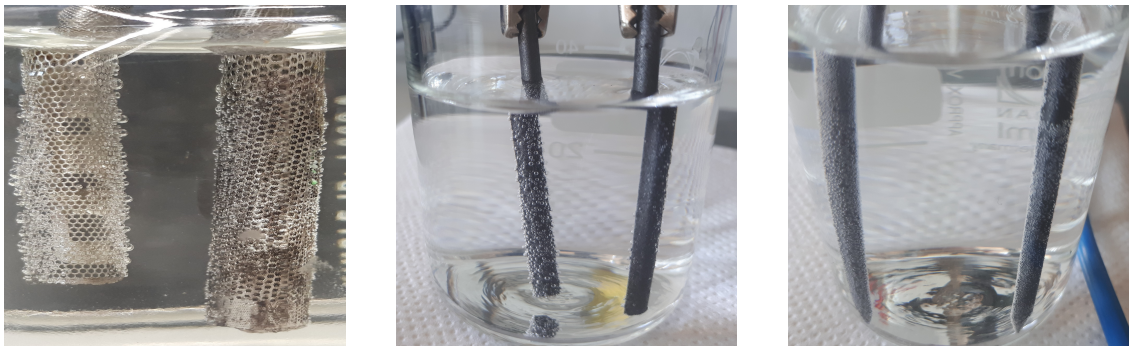
Von einzelnen Lehrkräften wurde im mündlichen Austausch während der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Lehrkräftefortbildungen gespiegelt, dass es zu aufwendig sei, Scherfolien im Klassensatz bereitzustellen. Daher wurde nach einer möglichst alltagsnahen und ähnlich funktionellen Alternative gesucht, die in großer Stückzahl kostengünstig zu erwerben und wiederverwendbar ist.
Aufgrund dieser Überlegungen schied Platin als Material aus. Wenngleich die Überpotentiale an Platin geringer sind als an Graphit (Tab. 4.1), wurden Graphitstäbe und Bleistiftminen untersucht.

| **Gas** | **Elektrode** | **Überspannung [V]** |
|---|---|---|
| Wasserstoff | Platin | $< 0.01$ |
| | Graphit | * 0.47 |
| Sauerstoff | Platin | 0.50 |
| | Graphit | 0.53 |

Tabelle 4.1: Überspannungen zur Abscheidung von Wasserstoff und Sauerstoff an Platin und Graphit bei einer Stromdichte von 1 $\frac{mA}{cm^2}$ in alkalischem Medium, * in saurem Medium. Daten aus Hamann und Vielstich [15, S. 430, 431] entnommen.

Sowohl Graphitstäbe als auch Bleistiftminen sind alltagsnahe beziehungsweise

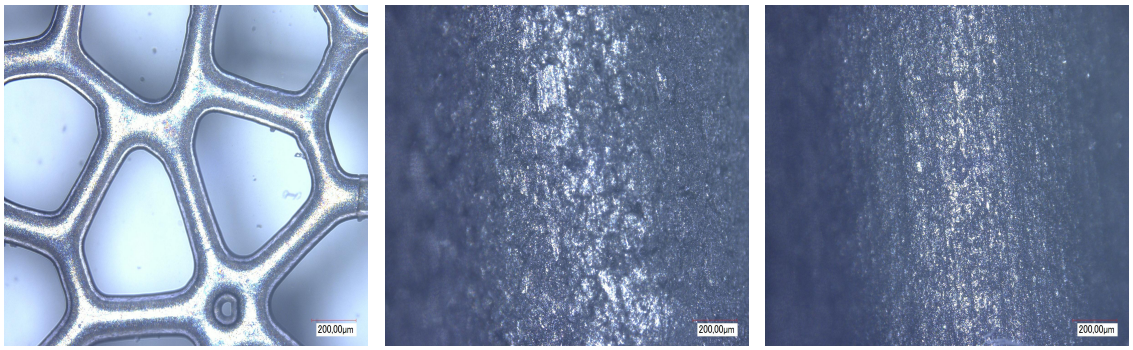
schultypische Materialien, die inert gegenüber der ablaufenden Reaktion und somit wiederverwendbar sind. Bleistiftminen werden aus einem Graphit-Ton-Gemisch gefertigt, deren Mischungsverhältnis je nach Härtegrad variiert. Je weicher die Mine, desto höher der Graphitanteil. An dieser Stelle wurden mittelharte HB-Bleistiftminen verwendet, die zum universellen Einsatz ausgewiesen und somit gut im Handel erhältlich sind. Gegenüber denen mit höherem Graphitanteil sind sie weniger bruchanfällig. Da Bleistiftminen oberflächlich mit Wachs oder Palmöl imprägniert sind,[72] wurden diese vor dem Einsatz als Elektroden in der Modell-Brennstoffzelle mit Schmirgelpapier angeraut.
Die gewählten Elektroden unterscheiden sich beispielsweise hinsichtlich des Materials, der Oberfläche und der Oberflächenbeschaffenheit. Durch ihre zylindrische Form sind die Oberflächen der Graphitstäbe und Bleistiftminen deutlich geringer als die der Scherfolien. Mit der größeren Oberfläche nimmt die Überspannung ab.[13] Es ist anzunehmen, dass die Oberflächenbeschaffenheit der jeweiligen Elektrodenkomponente Einfluss auf die Adsorption der Reaktionsgase während der Elektrolyse, die räumliche Ausdehnung der Dreiphasengrenze und somit die Zellspannung bei Betrieb der Brennstoffzelle hat. Makroskopisch lässt sich ausmachen, dass bei gleicher Elektrolyt-Konzentration und Elektrolysezeit die Größe der adsorbierten Gasblasen an den Elektrodenkomponenten, sowie deren Anzahl und Volumina von den Scherfolien über die Graphitstäbe zu den Bleistiftminen abnehmen (Abb. 4.4).



(a) an Scherfolien (b) an Graphitstäben (c) an Bleistiftminen

Abbildung 4.4: Makroskopische Ansichten der Adsorption von Gasblasen an Elektrodenoberflächen während der Elektrolyse.

Mikroskopisch werden Unterschiede in der Oberflächenbeschaffenheit bestätigt (Abb. 4.5). Neben der bereits makroskopisch ersichtlichen Netzstruktur der Scherfolien wird deutlich, dass die Oberfläche des Graphitstabs verglichen mit der der Bleistiftmine unregelmäßigere Vertiefungen aufweist. Derartige Vertiefungen erhöhen zwar die Oberfläche, bieten aber auch Raum zur Adsorption größerer Gasblasen. Trotz ähnlichem Elektrodenmaterial scheint dieses die Ruheklemmspannung herab-



(a) Scherfolie (b) Graphitstab (c) Bleistiftmine

Abbildung 4.5: Mikroskopische Ansichten der Elektrodenoberflächen.

zusetzen, wohl aufgrund des verringerten Dreiphasenraums. Die in Abbildung 4.6 aufgeführten Spannungsmesswerte bei Betrieb der Brennstoffzelle lassen sich also durch das Zusammenspiel mehrerer Faktoren deuten: Das Material und dessen Oberfläche sowie Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst die Zersetzungsspannung, sodass die während der Elektrolyse entstehenden Gasmengen und Adsorptions-Prozesse sowie die räumlichen Ausdehnungen der Dreiphasengrenze bedingt werden.

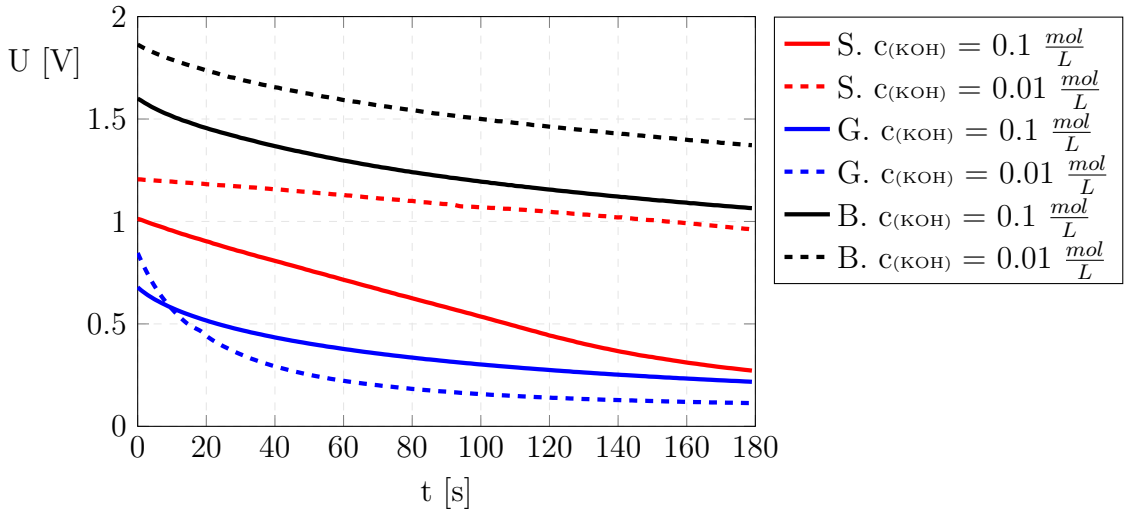



Abbildung 4.6: In Abhängigkeit von Elektrolyt-Konzentration und Elektroden ausgebildete Zellspannung bei Betrieb der Brennstoffzelle. *S. steht für Scherfolien; G. für Graphitstäbe; B. für Bleistiftminen.*

Es wurde jeweils sowohl die Konzentration an Kalilauge, die die höchste Zellspannung an Scherfolien erzielte ($c = 0.01 \frac{mol}{L}$), und die Konzentration, die hinsichtlich zuvor genannter Kriterien den besten Kompromiss an Anforderungen erfüllte, ($c(KOH) = 0.1 \frac{mol}{L}$), vermessen. Bei Verwendung aller Elektroden wurde erneut bei

einer Elektrolyt-Konzentration von c(KOH) = $0.01\frac{mol}{L}$ die höhere Zellspannung erreicht. Bei beiden gewählten Konzentrationen bildete sich an den Bleistiftminen insgesamt eine höhere Zellspannung aus, die langsamer abnahm als bei den Vergleichselektroden. Die Effekte, die zu diesen hohen Zellspannung führen sind ohne Kenntnis der genauen Inhaltsstoffe von den Bleistiftminen nicht gänzlich zu erklären. An Graphitstäben bildeten sich im Vergleich die niedrigsten Zellspannungen aus, die schnell abnahmen.
Wie bereits beschrieben reicht bei Verwendung von Scherfolien als Elektroden und des Elektrolyten in der Konzentration c = $0.1\frac{mol}{L}$ die Leistung bei Betrieb der Brennstoffzelle aus, um einen Motor etwa 5 s zu betreiben. Auch im Aufbau mit Bleistiftminen kann bei selbiger Elektrolyt-Konzentration der Motor für etwa 5 s betrieben werden. Die Leistung des Aufbaus mit Graphitstäben reicht dazu nicht aus.

Weitergehend könnte der Einfluss des Ausglühens der Bleistiftminen vor Verwendung als Elektrode überprüft, sowie quantitative Untersuchungen der Gasbildung und Gasadsorption an den gewählten Materialien während der Elektrolyse angeschlossen werden.

Zusammenfassend zeigen sich Scherfolien im Vergleich weiterhin als geeignetste Elektrodenkomponente für den Einsatz in dem Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle, da die Bildung und Rückbildung der Gasblasen deutlicher zu beobachten ist, die Spannung nahe am Erwartungswert und die Stromstärke beziehungsweise Leistung zum Betrieb des Motors ausreicht. Der Spannungswirkungsgrad $\eta_U$ beträgt für Kalilauge der Konzentration von $0.1\,\frac{mol}{L}$ an Rasierscherfolien zu Beginn des Brennstoffzellbetriebes:

$$\eta_U = \frac{1.01\ V}{1.229\ V} = 0.82 \tag{4.2}$$

Stehen keine Scherfolien zur Verfügung, können Bleistiftminen als Ersatz verwendet werden, wobei die Beobachtbarkeit weniger prägnant und der Betrieb des Motors durch die kürzere Laufzeit weniger eindrucksvoll ist.

### 4.1.3. Variation der Zellgeometrie

Analog zu den Untersuchungen zur mikrobiellen Hefe-Brennstoffzelle in Kapitel 4.4 wurde der Versuch unternommen, den Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle in veränderter Zellgeometrie als Zwei-Topf-Aufbau zu betreiben. Da an anderer Stelle bereits verschiedene Elektrolyt-Brücken hinsichtlich ihrer Eignung vermessen worden sind (Kapitel 4.4.3), wird hier nur das für geeignet empfundene Toilettenpapier

verwendet. Toilettenpapier besteht zu großen Teilen aus Zellstoff, was wiederum Cellulose entspricht. Das Polymer aus D-Glucose-Monomeren ist linear aufgebaut.[73] Cellulose liegt in unverzweigten, wasserunlöslichen Ketten vor. Durch das Vorhandensein von Hydroxy-Gruppen kommt es zur Ausbildung von intra- und intermolekularen Wasserstoff-Brücken, sodass eine übermolekulare Struktur aus geordneten (kristallinen) und weniger geordneten (parakristallinen) Bereichen ausgebildet wird. In stark alkalischen Medien wird die Faserstruktur der Cellulose homogenisiert: Trotz gleichem chemischen Aufbau liegen vermehrt kristalline Bereiche vor, sodass Wasser und andere Reaktanden schneller aufgenommen werden können.[74] Eine Zersetzung des Toilettenpapiers im geringen Messzeitraum war nicht zu erwarten, sodass es auch in alkalischen Brennstoffzellen als Elektrolyt-Brücke geeignet schien.
Die alkalische Brennstoffzelle wurde mit Scherfolien sowie Bleistiftminen als Elektroden bei Verwendung des Elektrolyten in der Konzentration c = 0.1 $\frac{mol}{L}$ vermessen. Für Scherfolien ergab sich eine Spannung nahe 1.2 V, für Bleistiftminen nahe 1.4 V (siehe Abb. 4.7). Die Spannung nahm jeweils im Verlauf der Messzeit leicht ab.

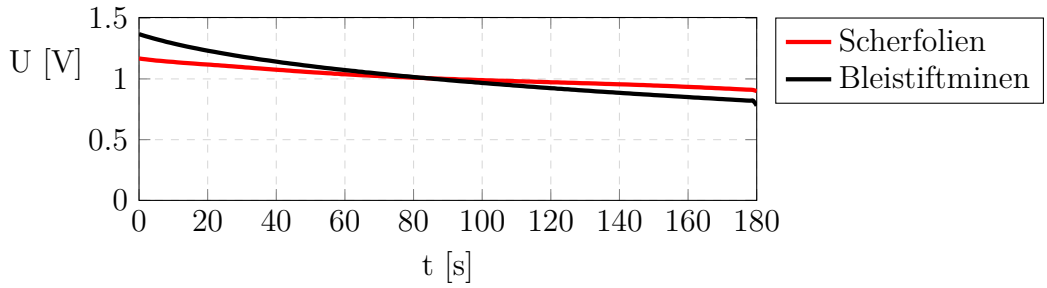



Abbildung 4.7: Zellspannung des Zwei-Topf-Aufbaus bei Betrieb der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Elektroden.

In keinem der Fälle war eine Gasbildung während der 60 s Elektrolyse eindeutig beobachtbar. Die Stromstärken waren in beiden Fällen so gering, dass kein Motor betrieben werden konnte und die Werte unterhalb der Sensibilität des Messgerätes lagen.
Aufgrund der Unterrepräsentation der Ausprägungen der zuvor an den Versuch gestellten Kriterien (vgl. Kapitel 4.1), wurde dieser Variante keine Eignung für den Schulunterricht zugesprochen.

### 4.1.4. Zwischenfazit zum Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle

Hinsichtlich der eingangs in Abschnitt 4.1 genannten Kriterien wurde der Ein-Topf-Aufbau des Modellversuchs zur alkalischen Brennstoffzelle mit einer Elektrolyt-Konzentration von c = $0.1\frac{mol}{L}$ bei einer Elektrolyezeit von 30 s und 60 s als geeignetste Variante bestätigt. Wenngleich der Elektrolyt noch immer stark alkalisch ist, ist die Ruheklemmspannung nahe am Erwartungswert und ihre Entstehung im schulischen Kontext erklärbar. Zudem ist die Bildung und Rückbildung der Gasblasen an den Elektroden mit bloßem Auge beobachtbar, die Gasblasen haften an der netzartigen Struktur der Scherfolien. Die Stromstärke bei Betrieb der Brennstoffzelle reicht für einige Sekunden zum Antrieb eines Motors aus.

## 4.2. Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien

In Anlehnung an den Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle nach Tausch u. a. [10] wurde erprobt, ob sich auch durch Einsatz von Kochsalz, Backpulver und Natron als gut wasserlösliche Alltagschemikalien mit geringem Gefährdungspotential als Elektrolyte für eine Modell-Brennstoffzelle eignen. Diese Anordnungen sind als Ergänzungen des Spektrums an Schulversuchen zu Brennstoffzellen zu betrachten, die insbesondere mit Lernenden der Primarstufe durchgeführt und phänomenologisch erschlossen werden können.

Da dieselben Brenngase wie in der AFC elektrolytisch gebildet und anschließend zum Betrieb der Brennstoffzelle genutzt werden sollen, wird näherungsweise ebenfalls ein Erwartungswert von 1.2 V angenommen[3]. Neben in Kapitel 4.1 für den Modellversuch zur AFC formulierten Kriterien bestand die Intention darin, eine Versuchsvariante zu identifizieren,

- die mit alltagsnahen, kostengünstigen Materialien und Chemikalien auskommt.
- von der ein geringes Gefährdungspotential ausgeht.

Zur Beschreibung der jeweiligen Varianten und zur Wahrung der Reproduzierbarkeit wurden analoge Maßnahmen wie in Kapitel 4.1 für die Untersuchung des Modellversuchs zur AFC beschrieben getroffen.

### 4.2.1. Ansetzen der Elektrolyt-Lösung mit Kochsalz

Kochsalz ist ein Trivialname für Natriumchlorid. In handelsüblichen Kochsalz-Gebinden sind auch Trennmittel und Zusätze zur Wahrung der Rieselfähigkeit enthalten. Natriumchlorid dissoziiert in Wasser in Ionen, die die Leitfähigkeit der Lösung erhöhen.
Zur Elektrolyse der Lösung wurde ein regelbares Netzgerät bei einer Spannung von 3 V verwendet, um die Bildung von Chlor zu vermeiden. Da sich die Lösung mit einer Einwaage von 0.5 g Kochsalz bereits innerhalb der Elektrolysedauer von 30 s leicht grünlich einfärbte, entstand offenbar dennoch Chlor. Die Ausbildung von Gasblasen konnte nicht beobachtet werden. Die zugehörigen Spannungsmesswerte während des Betriebs der Brennstoffzelle sind in Abbildung 4.8 aufgeführt, sie liegen weit unter dem Erwartungswert.

[3] Da das Zellpotential auch pH- und konzentrationsabhängig ist, ist dieser Erwartungswert nur als grober Richtwert zu verstehen.

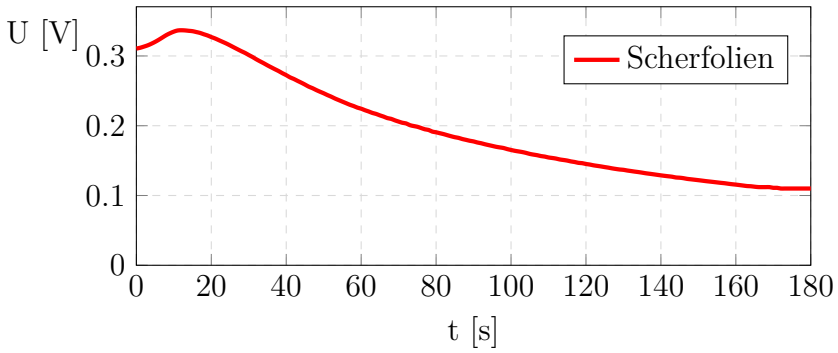



Abbildung 4.8: Zellspannung bei Betrieb der Modell-Brennstoffzellen mit Kochsalz-Elektrolyt nach 30 s Elektrolyse.

Die Stromstärke reichte nicht zum Antrieb des Motors. Die Einwaage und Elektrolysedauer wurde nicht erhöht, weil anzunehmen war, dass die Bildung von gefährdendem Chlor in höherem Maße stattfinden würde.

#### 4.2.1.1. Variation der Elektroden und Einwaagen

Statt der Scherfolien wurden Bleistiftminen als Elektroden verwendet. Da die Bildung farbloser Gasblasen und keine Grünfärbung der Lösung beobachtbar war, wurden ebenfalls die Einwaagen und Elektrolysezeiten verändert. Die während des Betriebs der Brennstoffzelle gemessenen Spannungen scheinen nur in geringem Maße von der Einwaage oder Elektrolysedauer abzuhängen (Abb. 4.9):

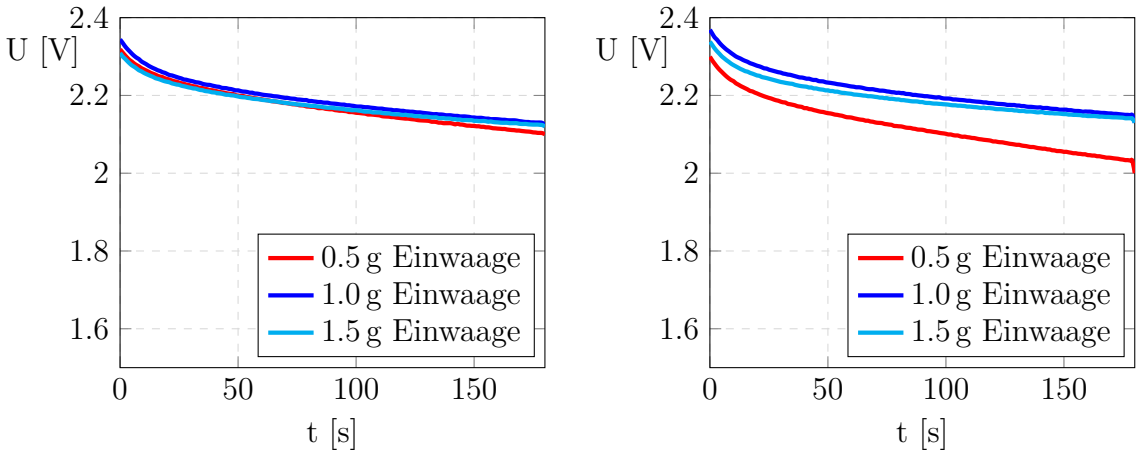



Abbildung 4.9: Zellspannungen bei Betrieb der Modell-Brennstoffzelle mit Kochsalz-Elektrolyt an Bleistiftminen; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse.

Zu Beginn der Messung betrugen sie jeweils etwa 2.3 V und sanken im Verlauf auf einen Wert um 2.1 V. Dieser Spannungsbereich ist deutlich über dem Erwar-

tungswert, was andeutet, dass neben den Reaktionsgasen andere Komponenten der Bleistiftminen maßgeblich an der Potentialbildung beteiligt waren.
In allen gewählten Einwaage-Elektrolyt-Kombinationen reichte die Stromstärke aus, um den Motor für etwa 20 s anzutreiben. Auf der Oberfläche der Elektrolyt-Lösung waren nach der Elektrolyse dunkle Partikel sichtbar, bei denen es sich mutmaßlich um Anteile der Bleistiftminen handelte. Dieses Aufplatzen der Graphitschicht kann durch die Intercalation hervorgerufen werden. So reagiert das möglicherweise bei der Elektrolyse entstandene Chlor mit Graphit spontan zu der Intercalationsverbindung Halogengraphit - deren genaue Zusammensetzung bislang jedoch unbekannt ist.[75]

Da die Prozesse der Potentialausbildung nicht gänzlich zu klären sind, womöglich Chlor gebildet wird und offenbar die Elektroden verbraucht oder beschädigt werden, eignet sich diese Modifikation der Modell-Brennstoffzelle mit Elektrolyt aus Kochsalz-Lösung und Bleistiftminen als Elektroden nicht für den Einsatz im Schülerexperiment.

### 4.2.2. Ansetzen der Elektrolyt-Lösung mit Backpulver

Handelsübliche Backpulver sind ein Gemisch aus Natriumhydrogencarbonat, Säureträgern wie Natriumdihydrogenphosphat, Calciumdihydrogenphosphat, Natriumaluminumphosphaten oder Weinsäure, Weinstein, Citronensäure, Adipinsäure und Bernsteinsäure.[76] Im Zusammenhang mit dem Modellversuch zur Brennstoffzelle mit Alltagsmaterialien ist insbesondere das Natriumhydrogencarbonat, $NaHCO_3$, von Interesse. In Wasser reagiert es schwach alkalisch, vgl. Gleichungen 4.3 und 4.4. Da der pKs-Wert der Kohlensäure hoch ist, liegt das Gleichgewicht in Reaktionsgleichung 4.4 auf Seite der Edukte. Die vorliegenden Hydroxid-Ionen bestimmen maßgeblich die Leitfähigkeit des Elektrolyten.

$$NaHCO_3\ (s) \longrightarrow Na^+\ (aq) + HCO_3^-\ (aq) \tag{4.3}$$

$$HCO_3^-\ (aq) + H_2O\ (l) \rightleftharpoons H_2CO_3\ (aq) + OH^-\ (aq) \tag{4.4}$$

#### 4.2.2.1. Variation der Einwaage

Es wurden verschiedene Einwaagen an Backpulver zur Erstellung einer Elektrolyt-Lösung vermessen. Dabei wurden Einwaagen gewählt, die mit schulüblichen Waagen beziehungsweise Küchenwaagen abmessbar sind. Die Konzentration an Natriumhydrogencarbonat in den Suspensionen kann nicht beziffert werden, da die mengenmäßige Zusammensetzung des verwendeten Backpulvers nicht genau angegeben ist. Beim Vermengen von Backpulver mit Wasser ergab sich eine weißliche Suspension. Bei den Einwaagen von 1.0 g und 1.5 g Backpulver bildete sich zudem unmittelbar nach Ansetzen der Suspension ein Bodensatz aus. Die Gasbildung an den Elektroden während der Elektrolyse war aufgrund der Trübung der Suspension nicht gut beobachtbar. Die Zellspannungen bei Betrieb der Modell-Brennstoffzelle nach 30 s Elektrolyse waren sehr gering, die Stromstärken reichten nicht zum Betrieb des Motors aus (vgl. Abb. 4.10, links). Nach 60 s Elektrolyse hingegen wurden für die Einwaagen von 0.5 g und 1.0 g Backpulver kurzfristig Spannungen im Bereich des Erwartungswertes gemessen, wenngleich die Stromstärken in keinem der Fälle zum Antrieb des Motors ausreichten.

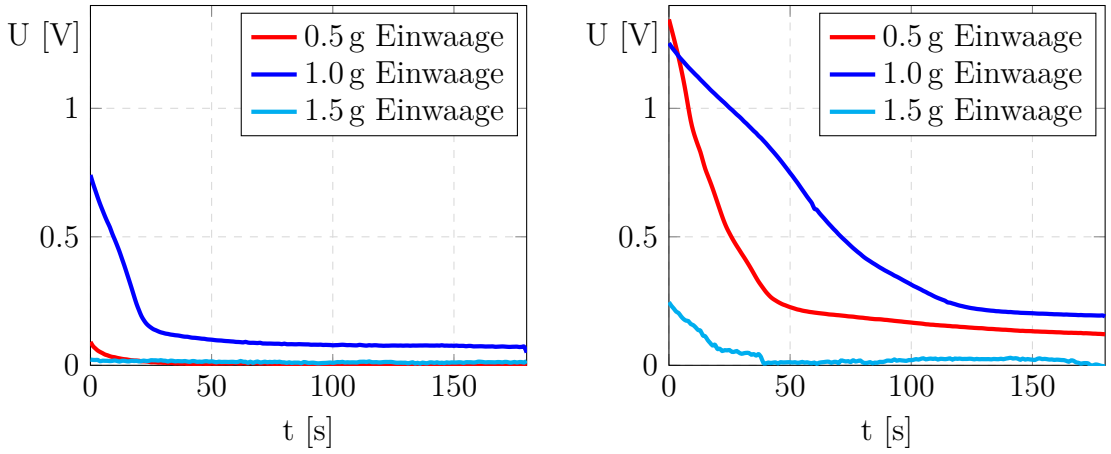



Abbildung 4.10: Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Backpulver-Elektrolyt an Scherfolien; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse.

Als Ursache wird angenommen, dass der Innenwiderstand der Suspension derart hoch ist (siehe Tabelle 4.2), dass nach 30 s Elektrolyse nicht hinreichend große Gasmengen zum Ausbilden der Potentialdifferenz vorhanden waren. Bei einer Einwaage von 1.5 g Backpulver war auch eine Elektrolysedauer von 60 s nicht ausreichend, um bei Betrieb der Brennstoffzelle eine Ruheklemmspannung nahe des Erwartungswertes zu erreichen.
Möglicherweise reichte die mit der Flachbatterie angelegte Spannung von 4.5 V in

diesem Fall nicht aus, um die Überspannung zu überwinden und durch Elektrolyse die Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff an Scherfolien in ausreichendem Maßstab zu initiieren.

| **Einwaage [g]** | **Widerstand** [$m\Omega$] |
|---|---|
| 0.5 | 6.46 |
| 1.0 | 8.08 |
| 1.5 | 13.2 |

Tabelle 4.2: Widerstände der Backpulver-Suspensionen verschiedener Einwaagen. Abstand der Messfühler 1.5 cm.

#### 4.2.2.2. Variation der Elektroden

Wie in Kapitel 4.1.2 dargelegt, sind alternative Elektrodenmaterialien zu Rasierscherfolien wünschenswert. Daher wurden die Messungen mit Backpulver verschiedener Einwaagen mit Bleistiftminen wiederholt (siehe Abb. 4.11). Von der Vermessung von Graphitstäben als Elektroden wurde aufgrund der Erkenntnisse aus Abschnitt 4.1.2 abgesehen.

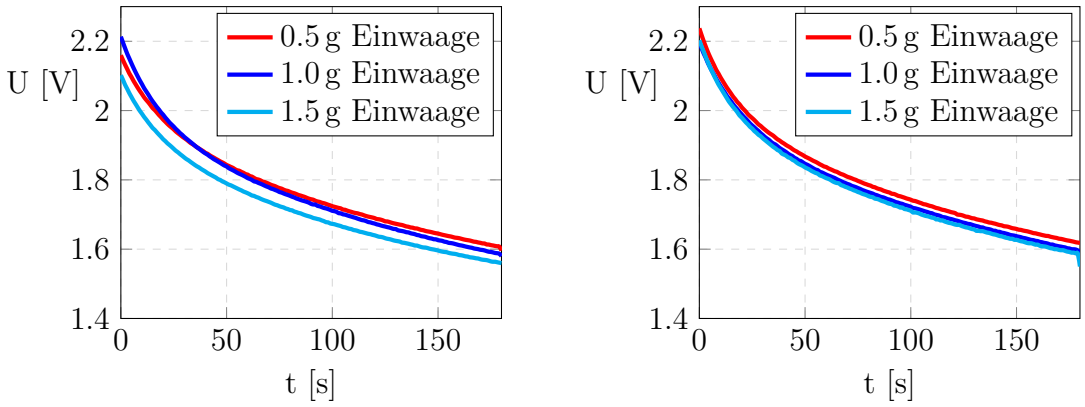



Abbildung 4.11: Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Backpulver-Elektrolyt an Bleistiftminen; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse.

Die unter Verwendung von Bleistiftminen als Elektroden vermessenen Ruheklemmspannungen sind deutlich höher als unter Verwendung von Scherfolien. Die Höhe und Verläufe der Werte nach 30 s beziehungsweise 60 s Elektrolyse unterscheiden sich kaum: Zu Beginn der Messung wurden jeweils die höchsten Spannungen von etwa 2.2 V gemessen, binnen der dreiminütigen Messung nahmen die Spannungen auf etwa 1.6 V ab. Bei allen dargestellten Variationen war es möglich, den Motor

für einige Sekunden zu betreiben. Die Werte zu Beginn der Messung übertrafen den Erwartungswert deutlich, was nahelegt, dass in diesem Zellaufbau in beträchtlichem Ausmaß noch andere Komponenten als nur Wasserstoff (Anode) und Sauerstoff (Kathode) an der Ausbildung des Zellpotentials beteiligt sind.

### 4.2.3. Ansetzen der Elektrolyt-Lösung mit Natron

Bei Verwendung von Backpulver zum Ansetzen der Elektrolyt-Lösung ergab sich eine trübe Suspension. Mutmaßlich waren die „Begleitstoffe“ des zur Erhöhung der Leitfähigkeit eingesetzten Natriumhydrogencarbonat ursächlich dafür, dass die Suspension eintrübte, die Gasbildung schwer beobachtbar und der Innenwiderstand der Flüssigkeit hoch war. Daher wurde als Alternative zum Stoffgemisch Backpulver reines Natriumhydrogencarbonat untersucht, sodass neben Einwaagen- auch Konzentrationsangaben möglich sind. Natriumhydrogencarbonat ist unter dem Trivialnamen *Natron* ebenfalls für Haushaltszwecke gebräuchlich und in Supermärkten und Drogerien kostengünstig erhältlich.
Die Messungen wurden analog zu denen in Abschnitt 4.2.2 unter Verwendung von Backpulver durchgeführt.
Die Natriumhydrogencarbonat-Lösungen waren farblos und klar, sodass während der Elektrolyse die Gasbildung an den Elektroden gut erkennbar war.

#### 4.2.3.1. Variation der Einwaage

Sowohl nach einer Elektrolysedauer von 30 s als auch 60 s wurden für alle gewählten Einwaagen Ruheklemmspannungen nahe des Erwartungswertes bestimmt, siehe Abbildung 4.12. Es fällt auf, dass einzig bei der Einwaage von 1.5 g die längere Elektrolyse deutlichen Einfluss auf die gemessene Spannung hat: Nach 60 s Elektrolyse ist dieser Wert zu Beginn höher. Die den Einwaagen entsprechenden Konzentrationen des Natriumhydrogencarbonats und die Widerstände der Lösungen sind in Tabelle 4.3 aufgeführt:

| **Einwaage [g]** | **Konzentration, c** $[\frac{mol}{L}]$ | **Widerstand** $[m\Omega]$ | **pH-Wert** |
|---|---|---|---|
| 0.5 | 0.15 | 0.46 | 8.4 |
| 1.0 | 0.30 | 0.64 | 8.5 |
| 1.5 | 0.45 | 1.2 | 8.6 |

Tabelle 4.3: Kennwerte der Natron-Lösungen verschiedener Einwaagen.

Gegenüber den mit einer Elektrolyt-Suspension aus Backpulver erreichten Spannungen sind die mit Natriumhydrogencarbonat-Lösung vermessenen Werte deutlich

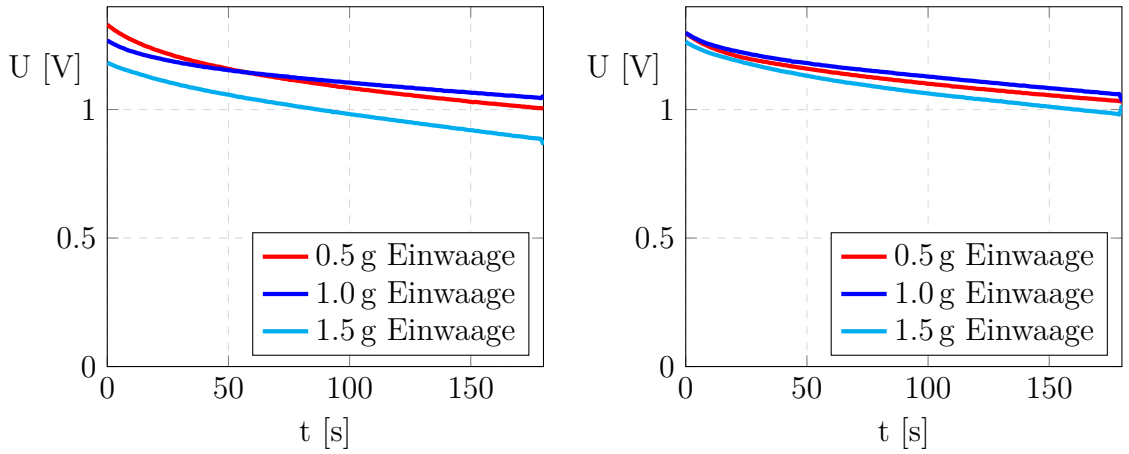



Abbildung 4.12: Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Natron-Elektrolyt an Scherfolien; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse.

höher. Mutmaßlich ist das in der höheren Stromstärke während der Elektrolyse begründet: Zum einen ist die Konzentration an Hydroxid-Ionen in der Lösung und somit deren Leitfähigkeit höher, da reines Natriumhydrogencarbonat eingewogen wurde. Zum anderen wird der Innenwiderstand der Lösung nicht durch „Begleitstoffe“ erhöht.

Die Stromstärken während des Betriebs der jeweiligen Modell-Brennstoffzelle reichten dennoch nicht aus, um den Motor anzutreiben.

#### 4.2.3.2. Variation der Elektroden

Bei Verwendung von Bleistiftminen als Elektroden konnten auch für den Ansatz der Elektrolyt-Lösung mit reinem Natriumhydrogencarbonat deutlich höhere Spannungswerte bestimmt werden. Anders als zuvor, hatte die Elektrolysedauer bei einer Einwaage von 1.0 g und 1.5 g Einfluss auf die Höhe der Spannung (vgl. Abb. 4.13). Die zu Beginn der jeweiligen Messungen dokumentierten Maximalwerte von etwa 2 V übersteigen den Erwartungswert, sind jedoch geringer als die in der Backpulver-Suspension vermessenen. Dies spricht dafür, dass neben den im Backpulver enthaltenen Begleitstoffen auch Ionen verschiedener Dissoziationsstadien des Natriumhydrogencarbonats an der Potentialbildung beteiligt sind. Die aufgeführten Varianten des Versuchs erreichten während des Betriebs der Brennstoffzellen alle eine Stromstärke, die den Antrieb des Motors für einige Sekunden ermöglichte.

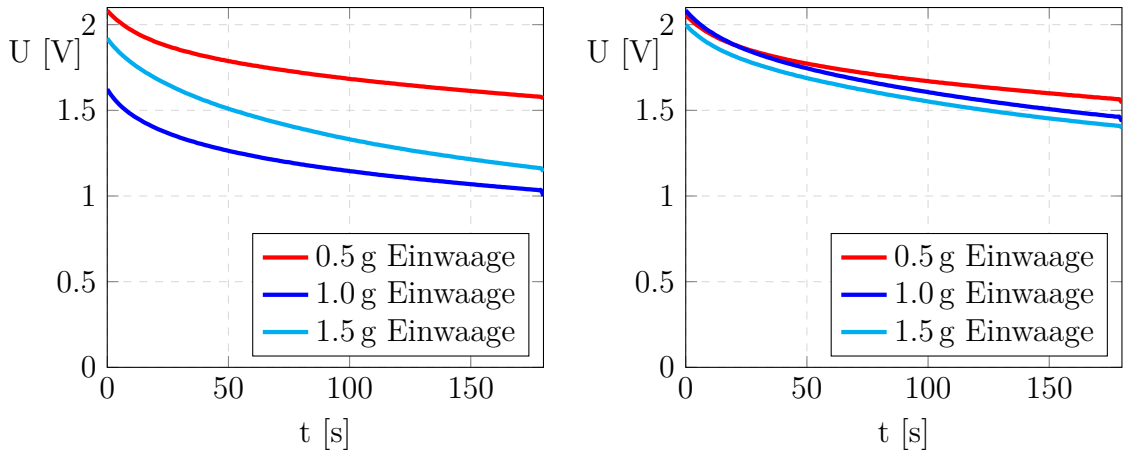



Abbildung 4.13: Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Natron-Elektrolyt an Bleistiftminen; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse.

### 4.2.4. Leitungswasser als Elektrolyt-Lösung

Während bei der Untersuchung der vorangegangen Varianten des Modellversuches destilliertes Wasser zum Ansetzen der Elektrolyt-Lösungen genutzt worden ist, wurde auch Leitungswasser ohne Zusätze als Elektrolyt-Lösung vermessen. Als Elektroden wurden Rasierscherfolien sowie Bleistiftminen und Elektrolysedauern von 30 s und 60 s erprobt (vgl. Abb. 4.14).

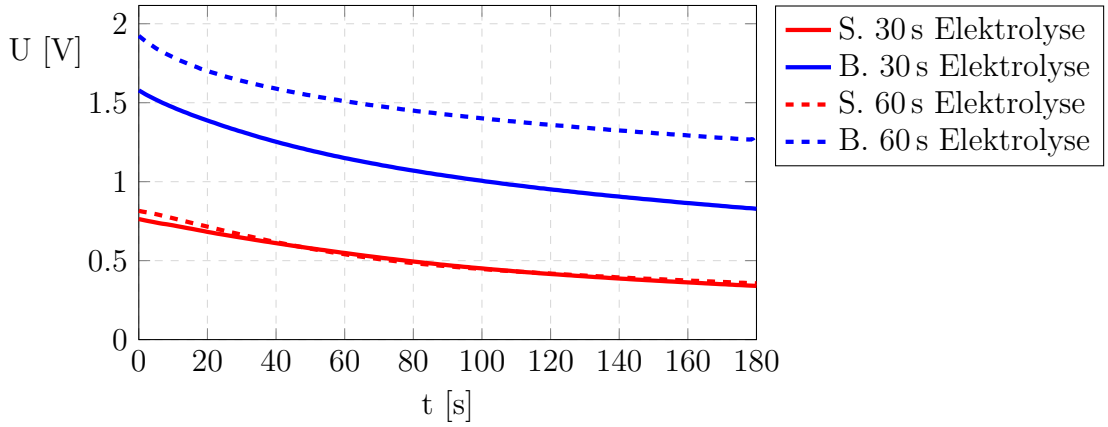



Abbildung 4.14: Zellspannungen der Modell-Brennstoffzellen mit Leitungswasser. *S. steht für Scherfolien, B. für Bleistiftminen.*

In keiner der Varianten war eine deutliche Gasbildung während der Elektrolyse beobachtbar. An Scherfolien konnte durch verlängerte Elektrolysedauer die Ruheklemmspannung bei Betrieb der Brennstoffzelle nur geringfügig erhöht werden: Die Anfangswerte lagen um Bereich von 0.7 V und fielen im Verlauf der Messung auf etwa 0.4 V. Die an Bleistiftminen vermessenen Spannungen waren mit Werten um

$U = 2\,\mathrm{V}$ deutlich höher und übertrafen den Erwartungswert. Dennoch reichte die Stromstärke in keiner der Variationen zum Antrieb des Motor aus.

### 4.2.5. Zwischenfazit zur Modell-Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien

Unter den eingangs in Abschnitt 4.2 genannten Kriterien erscheint die Modell-Brennstoffzelle mit einer Natron-Lösung der Konzentration $c = 0.15\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ als Elektrolyt und Bleistiftmine bei einer Elektrolysedauer von 30 s am geeignetsten für den Einsatz in der Primarstufe: Die verwendeten Materialien sind in Drogerien oder Supermärkten kostengünstig zu erwerben. Weder Edukte, Nebenprodukte noch Produkte sind gefährdend - beziehungsweise erheblich weniger gefährdend als die der alternativen Ansätze. Die Bildung und das Anhaften der Gasblasen an den Elektroden während der Elektrolyse ist gut beobachtbar. Die Spannung übertrifft den Erwartungswert deutlich, die Stromstärke reicht einige Sekunden zum Antrieb des Motors aus. Der Spannungswirkungsgrad $\eta_U$ beträgt für die beschriebene Variante zu Beginn des Brennstoffzellbetriebes:

$$\eta_U = \frac{2.08\ V}{1.23\ V} = 1.69 \tag{4.5}$$

Ein Erklärungsansatz ist, dass die Messungen nicht unter Standardbedingungen und somit auch nicht an Standardelektroden erfolgten. An Bleistiftminen finden offenbar von den Reaktionsgasen unabhängige Prozesse der Potentialbildung statt.

## 4.3. Direkt-Alkoholische Brennstoffzelle

Der Modellversuch zur alkoholischen Brennstoffzelle mit Methanol nach Tausch und Wachtendonk [77] wurde vermessen und weiterentwickelt. Die Intention bestand darin,

- zu überprüfen, ob Methanol durch Ethanol substituiert werden kann.
- eine möglichst geringe Elektrolyt-Konzentration zur Minimierung davon ausgehender Gefährdung einzusetzen.
- zu überprüfen, ob bei Luftzufuhr ein Anstieg der Zellspannung zu beobachten ist.
- eine Halbzellseparation zu wählen, die ein *Crossover* hinreichend lange hinauszögert, um mehrfach den Effekt der Spannungszunahme bei Luftzufuhr demonstrieren zu können.

Dazu wurde der zugrundeliegende Modellversuch in der Art des Brennstoffes sowie hinsichtlich der Luftzufuhr, der Elektrolyt-Konzentration und der Halbzellseparation variiert.
Das Zellpotential einer methanolischen DAFC unter Standardbedingungen kann als Erwartungswert unter Berücksichtigung der GIBBSchen freien Reaktionsenthalpie, $\Delta G^0$ = -702.5 $\frac{kJ}{mol}$, berechnet werden[13][4].

$$E^0 = \Delta E^0 = -\frac{\Delta G^0}{6 \cdot F} = 1.21\ V \tag{4.6}$$

Jedoch wird in der (technischen) Praxis bei einem Sauerstoffüberdruck von 2-3 bar lediglich eine Klemmspannung von etwa 0.5 V erreicht.[13]

Zur Beschreibung der jeweiligen Varianten wurde jeweils zunächst die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 180 s mit dem Messwerterfassungssystem „Pocket Cassy“ dreifach bestimmt. Im Anschluss wurde ein Motor für geringe Stromstärken angeschlossen, um zu überprüfen, ob und wie lange er betrieben werden kann. Die Stromstärken lagen unterhalb des Messbereiches des Pocket Cassy, sodass keine entsprechenden Messreihen aufgenommen wurden.

[4] Durch analoge Berechnung ergibt sich für Ethanol als Brennstoff eine reversible Zellspannung von 1.15 V.

### 4.3.1. Variation des Brennstoffes

Zunächst wurde der Versuch nach Tausch und Wachtendonk [77] aufgebaut und vermessen. Das giftige Methanol ist im Schülerexperiment ab Jahrgangsstufe fünf zugelassen, dennoch ist eine Ersatzstoffprüfung vorgesehen.[78] Um dieser Substitutionsprüfung Rechnung zu tragen, wurde neben Methanol auch Ethanol als Brennstoff verwendet. Anodenseitig lag eine Mischung vom Brennstoff und Kalilauge, $c = 5\frac{mol}{L}$, zu gleichen Volumenanteilen und kathodenseitig selbige Kalilauge vor. Als Elektroden wurden Scherfolien genutzt.

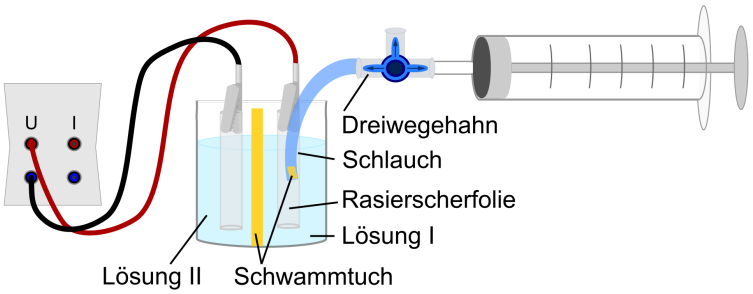



Abbildung 4.15: Aufbau des Modellversuchs zur alkoholischen Brennstoffzelle.

Mit der Einleitung von Umgebungsluft in die Kathodenhalbzelle wurde die Messung begonnen. Weder für Methanol noch Ethanol konnten reproduzierbare Spannungswerte ermittelt werden. Die Startwerte der Spannungsmessung für Methanol lagen zwischen 50 mV und 220 mV, selten konnte ein Spannungsanstieg bei Einleiten von Umgebungsluft detektiert werden. Wenn ein Effekt messbar war, konnte er nicht durch erneutes Einleiten von Umgebungsluft wiederholt werden. Für Ethanol verhielt es sich analog.[5] In Tabelle 4.4 sind die Spannungsdifferenzen aufgeführt, die bei einmaligem Einleiten von Umgebungsluft in das jeweilige System erreicht worden sind.

| **Brennstoff** | **Spannungsdifferenz [mV]** | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung | Mittelwert |
| Methanol | 61 | 84 | 86 | 77 |
| Ethanol | 48 | 44 | 20 | 37 |

Tabelle 4.4: Spannungsdifferenzen bei Einleiten von Umgebungsluft.

[5] Um einen systematischen Fehler der Durchführenden auszuschließen, wurde der Versuch von wissenschaftlichen Hilfskräften, Praktikanten und Abschlusskandidaten wiederholt - mit selbigem Ergebnis.

Bei Verwendung beider Brennstoffe schwankten die Spannungsdifferenzen prozentual enorm, bei Methanol als Brennstoff wurden absolut größere Differenzen bestimmt. Aufgrund dieser Situation sind in Abbildung 4.16 Einzelmessungen aufgetragen. Es wurden jeweils die Messreihen mit den höchsten Spannungswerten ausgewählt.

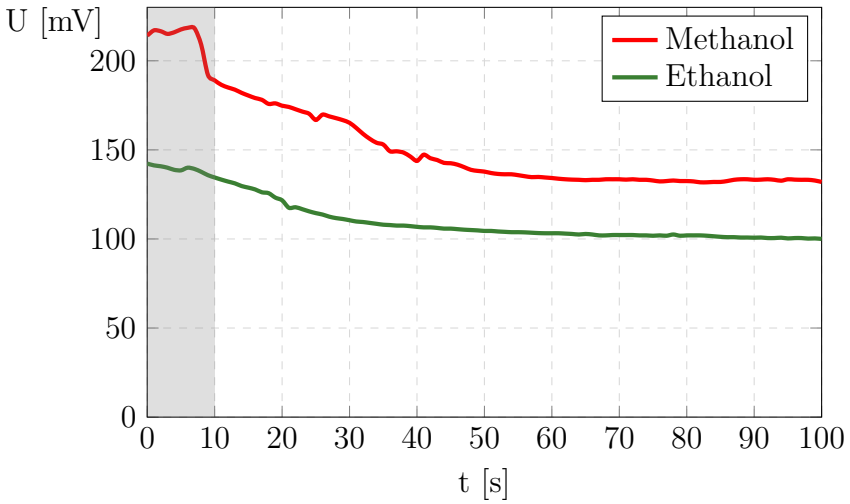



Abbildung 4.16: Zellspannungen der DAFC mit den Brennstoffen Methanol beziehungsweise Ethanol. Einleiten von Umgebungsluft grau hinterlegt.

Bei Verwendung von Methanol als Brennstoff war während des Einleitens von Umgebungsluft zunächst ein Anstieg der Spannung zu messen. Das Maximum betrug 218 mV. Insgesamt nahm die Spannung im Verlauf wohl durch Verbrauch des Methanols und aufgrund der Crossover-Effekte ab und nahm einen Wert von ca. 130 mV an. Erneutes Einleiten von Umgebungsluft zeigte keinen eindeutigen Effekt auf die messbare Spannung. Bei Verwendung von Ethanol als Brennstoff war die Zellspannung - wie erwartet - geringer. Sie nahm prozentual weniger ab und sank auf ca. 100 mV. Die geringere Abnahme lässt sich darüber erklären, dass Crossover-Effekte bei Ethanol geringer ausgeprägt sind.[29]
Mit Ethanol als Ersatz-Brennstoff für Methanol wurde in diesem Aufbau eine geringere Zellspannung bestimmt. Da zumindest beim einmaligen Einleiten von Umgebungsluft eine Spannungsdifferenz in ähnlichem prozentualem Verhältnis zur Ausgangsspannung wie unter Verwendung von Methanol messbar ist, scheint Ethanol als geeignete und geringer gefährdende Alternative nutzbar, um die grundsätzliche Funktionsweise einer DAFC im schulischen Kontext Experiment-basiert zu thematisieren.

### 4.3.2. Variation der Elektrolyt-Konzentration

Ein beträchtliches Gefährdungspotential des Modellversuchs geht von dem stark alkalischen Elektrolyten aus. Ein Elektrolyt ist jedoch in der DAFC zwingend notwendig, da bei Einbringen reinen Brennstoffes in den Anodenraum die Zellleistung durch starkes Crossover unmittelbar einbrechen würde.[79] Daher war es ein Anliegen, den Aufbau mit verschiedenen Elektrolyt-Konzentrationen zu vermessen, um die Eignung niedrigerer Konzentrationen zu prüfen. Sahu und Basu [29] identifizierten für eine technische DAFC bei einer Elektrolyt-Konzentration von $c(KOH) = 3\frac{mol}{L}$ und einer Brennstoff-Konzentration von $c = 2\frac{mol}{L}$ die höchste Zellleistung, bezogen auf die Zellspannung und Stromdichte. Als Brennstoffe kamen Methanol und Ethanol zum Einsatz. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daran angelehnt für beide Brennstoffe die Zellspannungen in Abhängigkeit der Elektrolyt-Konzentrationen vermessen, siehe Abbildung 4.17. Zu Beginn der Messung und anschließend in Abständen von 50 s wurde Umgebungsluft an der Kathode eingeleitet. Bei Verwendung von Methanol als Brennstoff wurde bei einer Elektrolyt-Konzentration von $c(KOH) = 5\frac{mol}{L}$ die höchste Zellspannung gemessen, ein deutlicher Effekt der Luftzufuhr war jedoch nicht zu verzeichnen. Dieser Effekt zeichnete sich jedoch bei Elektrolyt-Konzentrationen von $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ und $c(KOH) = 3\frac{mol}{L}$ leicht ab. Dort war ein gering ausgeprägter, stufenweiser Anstieg beziehungsweise Abfall der Spannung in Abhängigkeit der Lufteinleitung zu verzeichnen. Bei den genannten Konzentrationen nahm zudem die Zellspannung im Verlauf der Messzeit prozentual weniger ab, als bei $c(KOH) = 5\frac{mol}{L}$. Bei Einsatz von Ethanol als Brennstoff wurde mit einer Elektrolyt-Konzentration von $c(KOH) = 5\frac{mol}{L}$ ebenfalls die höchste Zellspannung und kein deutlicher Effekt der Luftzufuhr gemessen (Abb. 4.17).

Bei einer Elektrolyt-Konzentration von $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ wurde zwar die niedrigste Zellspannung, aber ein sehr deutlicher Effekt der wiederholten Luftzufuhr bestimmt. Anders als bei der von Sahu und Basu [29] beschriebenen technischen DAFC, wurde im Modellversuch zur DAFC sowohl für Methanol als auch Ethanol bei der Elektrolyt-Konzentration von $c(KOH) = 5\frac{mol}{L}$ jeweils die maximale Spannung gemessen. Bezogen auf die reversiblen Zellspannungen als Erwartungswerte ergibt sich für Methanol ein Spannungswirkungsgrad von 0.18 und 0.12 für Ethanol:

$$\eta_U Methanol = \frac{0.22\ V_{max}}{1.21\ V} = 0.18 \tag{4.7}$$

$$\eta_U Ethanol = \frac{0.14\ V_{max}}{1.15\ V} = 0.12 \tag{4.8}$$

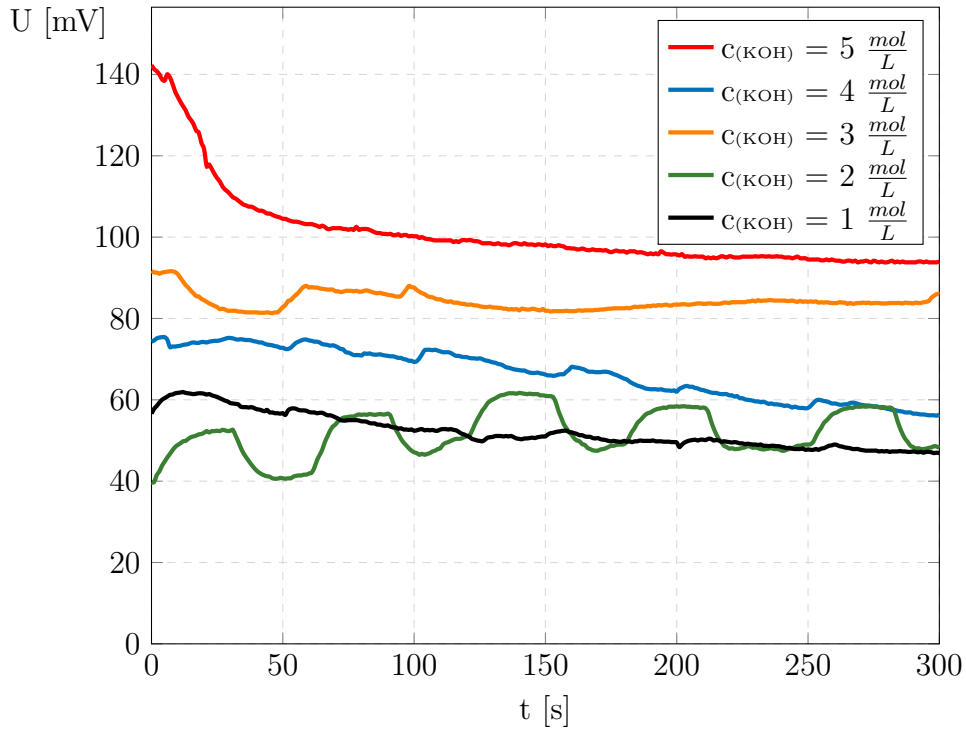



Abbildung 4.17: Zellspannungen der DAFC mit Ethanol in Abhängigkeit von der Elektrolyt-Konzentration.

Alle eingesetzten Elektrolyt-Lösungen sind stark alkalisch, vgl. Tabelle 4.5, sodass auch bei der geringsten gewählten Konzentration eine nicht unerhebliche Gefährdung für Lernende davon ausgeht.

| **Konzentration** $[\frac{mol}{L}]$ | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
|---|---|---|---|---|---|
| **pH-Wert** | 14.7 | 14.6 | 14.5 | 14.3 | 14 |

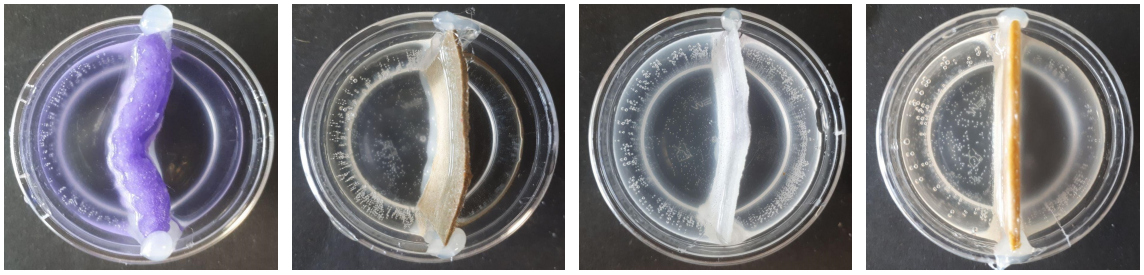
Tabelle 4.5: pH-Werte der eingesetzten Konzentrationen an Kalilauge.

Während für Methanol bei verschiedenen Elektrolyt-Konzentrationen nur ein geringer Effekt der Luftzufuhr verzeichnet wurde, wurde dieser für Ethanol bei $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ umso deutlicher und war wiederholbar. Da diese Variation den eingangs aufgestellten Anforderungen an den Modellversuch am nächsten kam, diente sie als Ausgangspunkt für weitere Optimierungen.

### 4.3.3. Variation der Halbzellseparation

Es galt zu überprüfen, welches schulübliche beziehungsweise alltagsnahe Material geeignet ist, um ein Crossover des Ethanols hinreichend lange gering zu halten, um mehrfach den Effekt der Spannungszunahme bei Luftzufuhr demonstrieren zu

können. Es besteht der Zusammenhang, dass das Crossover mit der Schichtdicke der separierenden Membran abnimmt, sodass die Spannung zunimmt beziehungsweise länger konstant gehalten wird.[79] In Anbetracht des geringen Zellvolumens des Modellaufbaus sollte diese Schichtdicke des Materials dennoch recht gering sein. Neben dem im Modellversuch nach Tausch und Wachtendonk [77] genutzten Schwammtuch wurden Eierkartonpappe, Abzugvlies und Bierdeckelfilz erprobt (siehe Abb. 4.18).



(a) Schwammtuch (b) Eierkarton (c) Abzugvlies (d) Bierdeckelfilz

Abbildung 4.18: Aufsicht auf die durch verschiedene Materialien separierten Halbzellen des DAFC-Modellversuchs nach 300 s Messzeit. Anodenhalbzellen jeweils links.

Um möglichst selektiv die Spannungseffekte des Crossover zu detektieren, wurde keine Umgebungsluft eingeleitet. Die Messwerte sind in Abbildung 4.19 dargestellt.

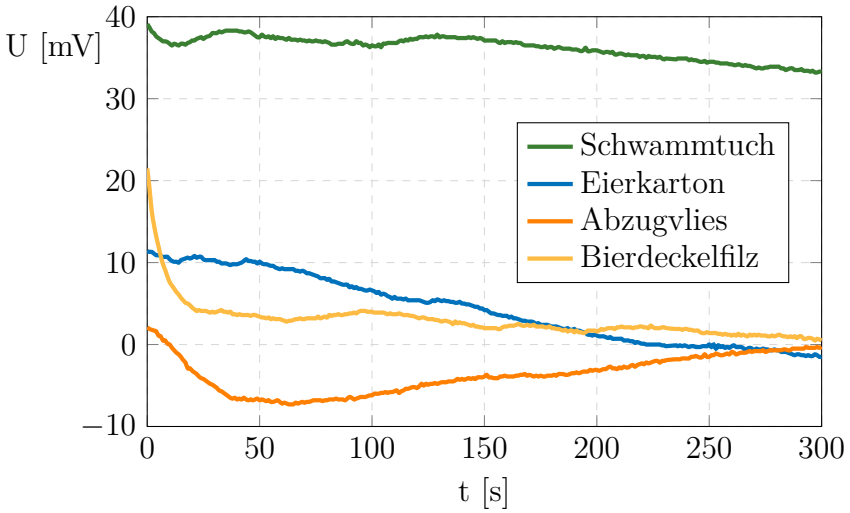



Abbildung 4.19: Zellspannungen der DAFC mit Ethanol unter Verwendung verschiedener Materialien zur Separation der Halbzellen.

Einzig bei Separation durch ein Stück Schwammtuch blieb eine beinahe konstante Potentialdifferenz von etwa 35 mV bestehen - die geringe Abnahme der Zellspannung

kann durch Oxidation des Ethanols begründet sein. Die übrigen gewählten Materialien waren scheinbar bereits im Moment der Befeuchtung durchlässig für das Ethanol: Bereits zu Beginn der Messung stellte sich eine geringere Spannung ein und näherte sich im Verlauf der Messung einem Wert von 0 mV an, was für eine vollständige Durchmischung der Flüssigkeiten spricht.
Bei Verwendung von Abzugvlies und Bierdeckelfilz konnten in beiden Halbzellen Gasblasen an den Gefäßwänden erkannt werden (siehe Abbildung 4.18). Dies kann ein Indiz für Ethanoloxidation und somit Bildung von Kohlenstoffdioxid gewertet werden. Die Kathodenhalbzelle der mit Bierdeckelfilz separierten DAFC trübte zudem ein, womöglich aufgrund Zersetzungsprozesse des gewählten Materials. Im Falle des Eierkartons ist unklar, weshalb er die Halbzellen zwar nicht wirksam voneinander trennte, aber keine parasitäre Ethanoloxidation an der Kathode durch Gasbildung vermutet werden kann. Aufgrund der erläuterten Messungen und geschilderten visuellen Eindrücke, blieb das Schwammtuch die Halbzellseparation der Wahl.

### 4.3.4. Variation der Luftzufuhr

Der Effekt der Luftzufuhr auf die Zellspannung wurde untersucht. Dabei wurde in einen DAFC-Aufbau mit Ethanol als Brennstoff bei $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ und Separation durch ein Stück Schwammtuch auf vier verschiedene Arten Luft in den Kathodenraum eingebracht: Zum einen wurde in regelmäßigem Rhythmus 60 mL Umgebungsluft über eine Spritze in das System gepulst und zum anderen kontinuierlich über eine Aquarienpumpe ($10\,\frac{L}{h}$) eingebracht. Analog wurde reiner Sauerstoff gepulst sowie kontinuierlich zugeführt. Da Umgebungsluft nur zu etwa 20 % auf Sauerstoff besteht, *könnte* bei Einleiten reines Sauerstoffs ein fünffacher Reaktionsumsatz stattfinden. Damit verbunden wäre zunächst eine höhere Zellspannung sowie durch schneller verbrauchten Brennstoff abnehmende Zellspannung im Verlauf der Messung erwartbar. Die Vermessung der Zellspannung bei ausbleibender Luftzufuhr diente als Referenz (vgl. Abb. 4.20).
Bei allen Variationen der Luft- beziehungsweise Sauerstoffzufuhr war ein Anstieg der Zellspannung gegenüber des Referenzaufbaus zu messen. Der Anstieg bei der jeweils gepulsten Zufuhr war wiederholbar und deutlich, auch nach Zufuhr blieb die Zellspannung auf leicht erhöhtem Niveau gegenüber des Anfangszustandes. Ursächlich hierfür könnte eine höhere Sauerstoffsättigung in Lösung sein. Anhand einer Sauerstoffsättigung lässt sich auch die höhere Spannung bei kontinuierlicher Zufuhr von Umgebungsluft beziehungsweise reinem Sauerstoff sowie die höhere sich

einstellende Basis-Spannung zwischen dem Einpulsen von Gas bei Verwendung von reinem Sauerstoff erklären.

In Tabelle 4.6 sind die gemessenen Spannungsdifferenzen bei Einleiten von Umge-

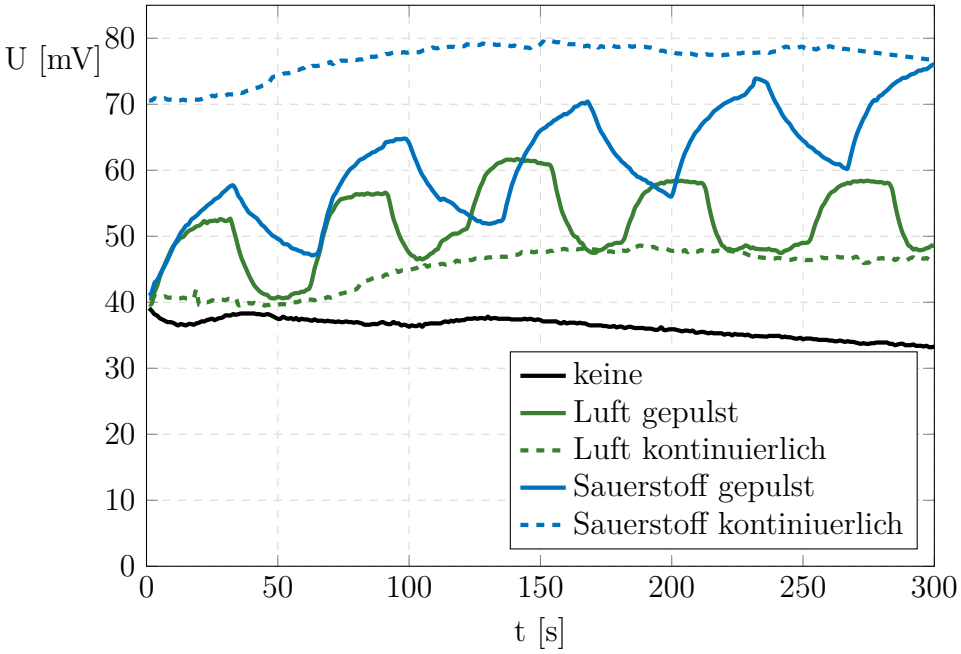



Abbildung 4.20: Zellspannungen der DAFC mit Ethanol als Brennstoff bei $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ bei variierter Luftzufuhr.

bungsluft beziehungsweise reinem Sauerstoff aufgeführt. Es wird deutlich, dass sich bei Zufuhr von Sauerstoff eine höhere Spannung einstellt[6], die Spannungsdifferenzen bei Einpulsen von Sauerstoff beziehungsweise Umgebungsluft sich jedoch kaum unterscheiden.

| | **Spannungsdifferenz [mV]** | |
|---|---|---|
| | gepulste Zufuhr | kontinuierliche Zufuhr |
| **Umgebungsluft** | 13 | 20 |
| **Sauerstoff** | 16 | 42 |

Tabelle 4.6: Spannungsdifferenzen im DAFC-Modellversuch bei Einleiten von Gasen.

Reiner Sauerstoff ist aus Druckgasflaschen zu entnehmen. Für Lernende bis Jahrgangsstufe neun ist der Umgang mit Druckgasflaschen nicht zulässig, weswegen beispielsweise durch eine Lehrkraft eine geringere Menge Sauerstoff in einem Gasbeutel bereitgestellt werden müsste. Dieses Vorgehen wäre auch bei Schülerversuchen ab Jahrgangsstufe neun angebracht, da pro Schule pro Gasart nur eine Gasdruckflasche vorhanden sein darf.[78] Demnach scheint die Zufuhr von reinem Sauerstoff

[6] Die Angabe erfolgte anhand der jeweiligen Spannungen bei 150 s Messzeit.

praxisfern und didaktisch nicht unbedingt notwendig, da auch durch Einpulsen von Umgebungsluft vergleichbare Spannungsdifferenzen erzielt werden.

### 4.3.5. Verwendung von Platinelektroden

Da Rasierscherfolien als lowcost Variante von Platinelektroden gehandelt werden, wurde ein Vergleich damit angestellt (Abb. 4.21). Unter Verwendung von Platinblechen als Elektroden stellte sich bereits zu Beginn der Messung eine deutlich höhere Zellspannung von etwa 60 mV ein. Der Spannungsanstieg bei Einleiten von Umgebungsluft war sowohl absolut ($\Delta U = 34\,mV$) als auch prozentual (+50 %) ausgeprägter, als bei Verwendung von Rasierscherfolien ($\Delta U = 13\,mV$ beziehungsweise +30 %). Damit bestätigt sich, dass die Elektrode beziehungsweise der Katalysator

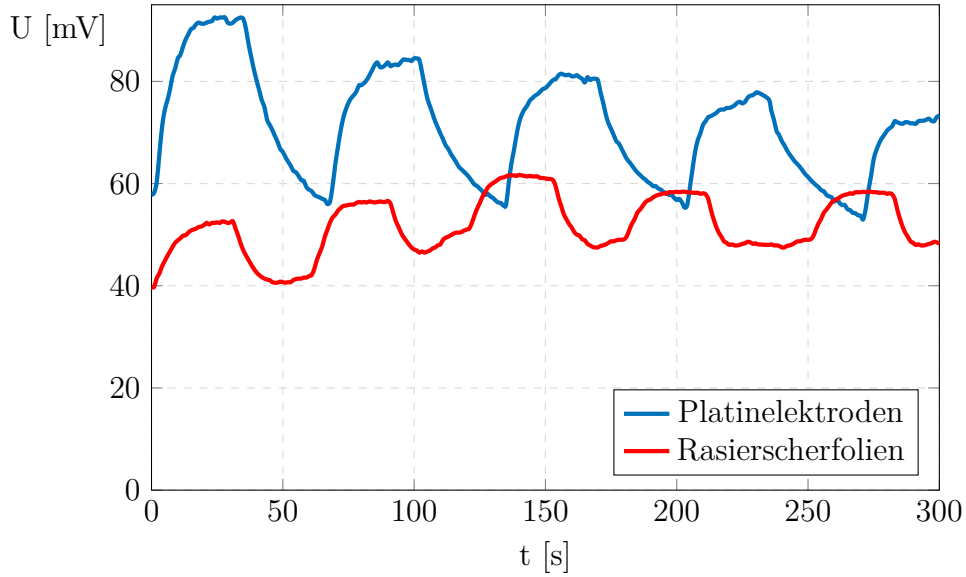



Abbildung 4.21: Zellspannungen der DAFC mit Ethanol als Brennstoff bei $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ mit verschiedenen Platin-Elektroden.

einen entscheidenden Einfluss auf die Zellspannung der DAFC aufweist.[79] Platin ist dabei das in DAFC gebräuchlichste Katalysatormaterial.[13]
Sofern in einem schulischen Setting Platinelektroden zur Verfügung stehen, können diese in den Modellversuch zur DAFC integriert werden, um ein prägnanteres Messergebnis zu erzielen.

### 4.3.6. Variation der Elektrolyt-Lösung

Auch bei Substitution des Brennstoffs Methanol durch Ethanol und der Verwendung einer Kalilauge geringerer Konzentration als im Ausgangsversuch, geht insbesondere in dem filigranen Aufbau eine Gefahr von der stark alkalischen Kalilauge aus. Daher wurde auf Grundlage der Erkenntnisse aus Abschnitt 4.2.3 anstelle der Kalilauge als Elektrolyt eine Natriumhydrogencarbonat-Lösung der Konzentration 0.15 $\frac{mol}{L}$ verwendet. In Abbildung 4.22 ist als Referenz die Messung mit Kalilauge der Konzen-

tration 2 $\frac{mol}{L}$ eingefügt, bei der alle 30 s eine Luftzufuhr erfolgte. Bei Verwendung der Natriumhydrogencarbonat-Lösung wurde zu Beginn eine Zellspannung von 45 mV gemessen. Die Zellspannung nahm bei Luftzufuhr deutlich zu. Der maximale Spannungswert betrug 84 mV, was bezogen auf die zu Beginn vermessene Spannung einer Differenz von 39 mV (+87 %) entspricht. Der Effekt der Spannungszunahme bei Luftzufuhr konnte - wie auch bei der Referenz - wiederholt vermessen werden, die Höhe der Spannungsdifferenz und die Peakform variierte jedoch stark. Bei längeren Messungen fiel die Zellspannung allmählich ab, was durch den Verbrauch des Brennstoffes oder aber Crossover-Effekte bedingt sein kann.

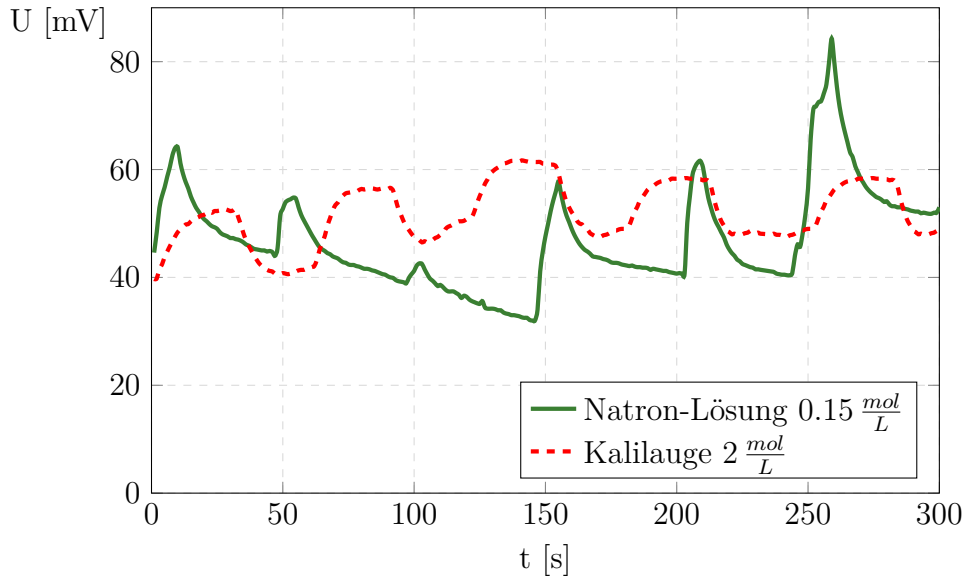



Abbildung 4.22: Zellspannungen der DAFC mit verschiedenen Elektrolyt-Lösungen und gepulster Luftzufuhr.

Die Natriumhydrogencarbonat-Lösung ist mit einem pH-Wert von näherungsweise 8.4 nur leicht alkalisch, sodass die Gefährdung gegenüber einer Elektrolyt-Lösung aus Kalilauge deutlich geringer ist. Da auch in dieser Variante während des Betriebs eine feinperlige Gasbildung an der Anode erkennbar war und sich eine Zellspannung einstellte, die durch Luftzufuhr wiederholt erhöht werden konnte, scheint sie eine geringer gefährdende Alternative zum durch Tausch und Wachtendonk [77] vorgeschlagenen Modellversuch zur DAFC zu sein.

### 4.3.7. Zwischenfazit zum Modellversuch zur DAFC

Unter den zuvor in Abschnitt 4.3 genannten Kriterien erscheint der Aufbau des Modellversuchs zur DAFC mit Ethanol als Brennstoff, einer Natron-Lösung als Elektrolyt und einem Schwammtuch als Halbzellseparation am geeignetsten für didaktische Zwecke: Ethanol substituiert Methanol und die Natron-Lösung die Kalilauge der Konzentration 5 $\frac{mol}{L}$, sodass die Gefährdung während der Versuchsdurchführung deutlich gesenkt und auch die Entsorgung der Lösungen erleichtert wird. In dieser Variante scheint während des Betriebs das Crossover hinreichend verzögert zu werden, sodass mehrfach der Effekt des Spannungsanstiegs bei Luftzufuhr in den Kathodenraum gemessen werden kann.
Der Spannungswirkungsgrad $\eta_U$ beträgt für die beschriebene Variante am Peakmaximum:

$$\eta_U Ethanol = \frac{0.084\ V_{max}}{1.15\ V} = 0.07 \tag{4.9}$$

Bislang ist unklar, in welchem Maße die Alkohol-Konzentration in der Anodenhalbzelle abnimmt, und, inwiefern dies durch den Verbrauch des Brennstoffes beziehungsweise Crossover bedingt ist. Weiterhin könnte untersucht werden, ob die Zellleistung wie in technisch eingesetzten alkalischen DAFC mit der Temperatur zunimmt.[29] Darauf wurde an dieser Stelle verzichtet, weil dadurch die Exposition der Lernenden mit Ethanol-Dämpfen steigen und der filigrane Aufbau noch anspruchsvoller zu realisieren sein würde.
Bereits der erprobte Aufbau erfordert in hohem Maße Feinmotorik, um gute Mess-

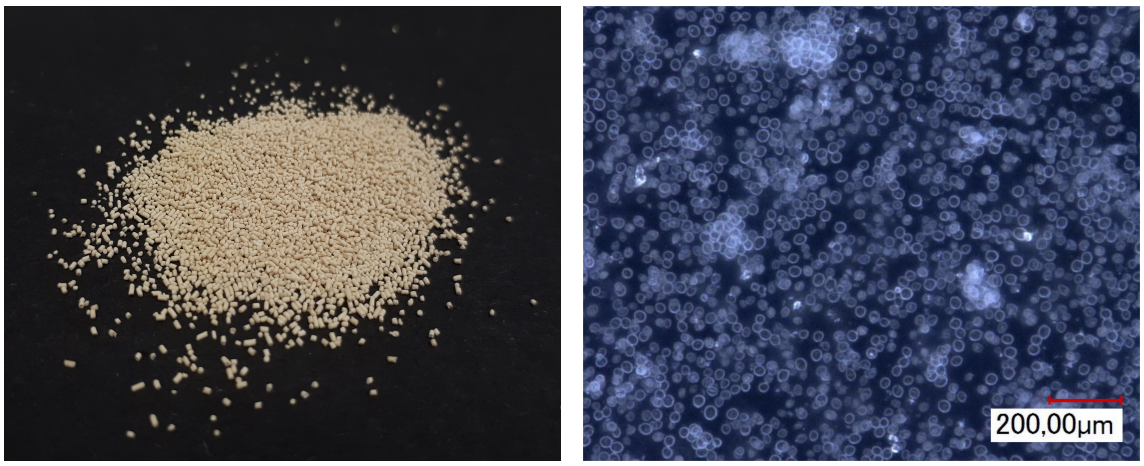


Abbildung 4.23: Eindrücke vom Aufbau des Modellversuchs zur DAFC.

ergebnisse zu erhalten (vgl. Abb. 4.15 und 4.23): Die Separation muss abdichtend eingeklebt werden. Die Scherfolien gerollt, fixiert und in eine der Folien ein Gaseinleitungsschlauch so eingebracht werden, dass das Gas unter der Flüssigkeitsoberfläche austritt. Weiterhin muss sorgfältig darauf geachtet werden, beim Einleiten der Luft kontinuierlich die Spritze zu entleeren, um die Flüssigkeit nicht abrupt aus dem Becher zu verdrängen, und, den Gaseinleitungsschlauch nicht über den Flüssigkeitspegel zu ziehen.

## 4.4. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Bäckerhefe

Im Rahmen dieser Arbeit sollten schulgeeignete Versuche zur mikrobiellen Brennstoffzelle entwickelt beziehungsweise gefunden und optimiert werden. Der Umgang mit in der Forschung zu MFC bewährten Mikroorganismen wie genetisch veränderten *Escherichia coli*, *Shewanella*- und *Geobacter*-Stämmen oder nicht näher charakterisierten Biofilmen ist in der Schule nicht zulässig, weil die Beurteilung der Gefahren und die Festlegung zu treffender Maßnahmen nach Biostoffverordnung erfolgen muss. Der Umgang mit Mikroorganismen der Risikogruppe I ist möglich,[78] sodass als Biokatalysator die Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* gewählt wurde. Diese ist durch ihre geringe Gefährdung für den Einsatz im Schülerexperiment geeignet und einfach zu entsorgen.
Weiterhin spricht für den Einsatz von Bäckerhefe in Schulversuchen zur MFC, dass sowohl die Bäckerhefe als Biokatalysator als auch Saccharide als Substrate den Lernenden aus ihrem Alltag bekannt seien können und kostengünstig in lokalen Supermärkten verfügbar sind. In Abbildung 4.24 ist die makroskopische Ansicht der Trockenhefe als Alltagsprodukt der mikroskopischen Ansicht einer wässrigen Hefe-Suspension gegenübergestellt. In der tausendfachen Vergrößerung sind zahlreiche, leicht ellipsoide Hefe-Zellen ersichtlich. Die Zellen sind zwischen 5-10 $\mu$m lang und 1-7 $\mu$m breit.[80]




(a) Trockenhefe (b) Suspendierte Trockenhefe

Abbildung 4.24: Ansichten der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*.

Zusätzlich handelt es sich bei der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* um einen viel ergründeten Forschungsgegenstand der Mikrobiologie,[32,80] sodass gut gesicherte Erkenntnisse zum Stoffwechsel vorliegen, die nachfolgend aufgegriffen werden.

### 4.4.1. Stoffwechsel der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*

Die Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* ist ein fakultativ anaerober Eukaryot. Da sie die kommerziell meist genutzte Hefe ist, sind ihre Stoffwechselwege weitestgehend bekannt. Der chemoorganotrophe Organismus kann verschiedene kohlenstoffhaltige Substrate verstoffwechseln. So werden die Saccharide Glucose, Fructose, Mannose, Galactose, Saccharose und Maltose in der Gärung zu Ethanol und Kohlenstoffdioxid umgesetzt. Andere Substrate wie etwa Ethanol, Glycerol und Acetate können nur unter aeroben Bedingungen in der Zellatmung metabolisiert werden.[80] Das Substrat gelangt auf spezifische Weise in den Innenraum der Hefe-Zellen. So nimmt *Saccharomyces cerevisiae* Glucose durch gerichtete Diffusion und Maltose über aktiven Transport durch transmembrale ATPasen-Proteine auf.[80] Die Substrate werden gegebenenfalls zunächst in Monosaccharide gespalten, bevor sie in die Glykolyse eintreten. Während der im Cytoplasma der Eukaryoten ablaufenden Glykolyse werden pro Glucose-Monomer bei einem Nettogewinn von zwei Molekülen ATP zwei Moleküle Pyruvat gebildet. Meist tritt unter aeroben Bedingungen ein Atmungs- beziehungsweise unter anaeroben Bedingungen ein Gärungsprozess ein (vgl. Abb. 4.25).

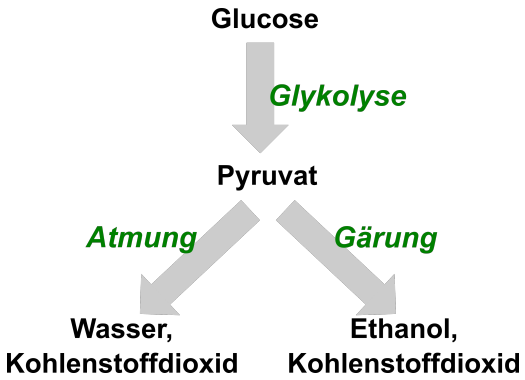



Abbildung 4.25: Schematische Übersicht katabolischer Stoffwechselprozesse.

Unter aeroben Bedingungen schließt sich der Glykolyse der *Citratzyklus* sowie die *Atmungskette* an, die Teilschritte sind zumeist enzymatisch katalysiert. Das aus der Glykolyse resultierende Pyruvat wird zunächst oxidativ decarboxyliert, wobei der C2-Körper Acetyl-CoA entsteht. Dieser tritt wiederum durch Kondensation mit dem C4-Körper Oxalacetat in den Citratzyklus ein, wodurch eine Tricarbonsäure (C6-Körper) vorliegt (vgl. Abb. 4.26). Durch zwei aufeinanderfolgende oxidative Decarboxylierungen entstehen pro Molekül Acetyl-CoA zwei Moleküle Kohlenstoffdioxid. Die freiwerdenden Elektronen dienen der Gewinnung zweier Moleküle des Reduktionsäquivalentes NADH.

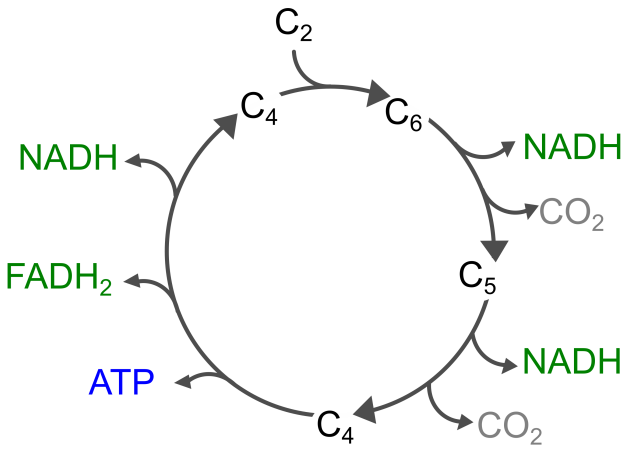



Abbildung 4.26: Stark reduzierter Überblick über den Citratzyklus. Adaptiert nach Berg u. a. [31].

Bei Rückbildung der C4-Einheit zu Oxalacetat werden neben ATP auch die Reduktionsäquivalente NADH und $FADH_2$ gebildet. Dem Citratzyklus in den Mitochondrien folgt die als Atmungskette bezeichnete Reaktionsabfolge in der Mitochondrienmembran, bei der unter Reoxidation von $FADH_2$ und NADH ein Protonengradient durch die Membran entsteht. Die Protonen passieren die ATP-Synthase, sodass ATP aus ADP regeneriert wird. Pro Molekül Glucose werden etwa 30 Moleküle ATP regeneriert.

Unter einer Gärung wird ein ATP-liefernder Prozess verstanden, bei dem organische Verbindungen als Elektronendonatoren und -akzeptoren fungieren.[31] In Hefen wird Pyruvat in der alkoholischen Gärung decarboxyliert und durch NADH zu Ethanol reduziert, sodass $NAD^+$ regeneriert wird (vgl. Abb. 4.27). Die Teilschritte sind enzymatisch durch Pyruvatdecarboxylase (**1.**) beziehungsweise Alkoholdehydrogenase (**2.**) katalysiert.[31]

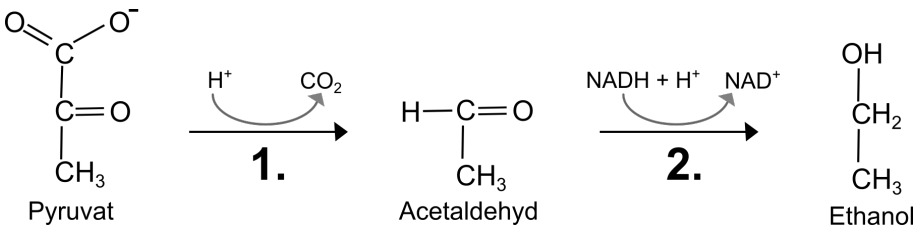



Abbildung 4.27: Verlauf der alkoholischen Gärung.

Aus Gärungsprozessen wird erheblich weniger ATP als aus Atmungsprozessen freigesetzt, wie anhand der Netto-Reaktionsgleichung deutlich wird:

$$C_6H_{12}O_6 + 2\,Pi + 2\,ADP + 2\,H^+ \longrightarrow 2\,CH_3CH_2OH + 2\,CO_2 + 2\,ATP + 2\,H_2O \tag{4.10}$$

Bei Bäckerhefe lässt sich der *Pasteur-Effekt* beobachten: Wird eine anaerob gärende Kultur belüftet, geht der Glucoseumsatz zurück. Ursächlich hierfür ist, dass die Phosphorylierung von Fructose-6-phosphat durch ATP allosterisch gehemmt wird. Demnach werden anabole Prozesse der Biomasse gehemmt, katabole Prozesse jedoch nicht, sodass dennoch in hohem Ausmaß Ethanol entsteht.[32] Zusätzlich tritt bei Bäckerhefe der *Crabtree-Effekt* als Sonderfall des Pasteur-Effektes auf, bei dem unter aeroben Bedingungen die Atmung ab einer Substratverfügbarkeit von 1 $\frac{g}{L}$ Glucose gehemmt wird.[80]

Demnach sollten zur Konzeption der Schulversuche mit Bäckerhefe Substratverfügbarkeiten gewählt werden, die den energieeffizienten Substratumsatz in der Atmung und somit eine hohe Zellleistung zu begünstigen.

## 4.4.2. Redox-Aktivität von Bäckerhefe

Es ist ein Anliegen der Didaktik, neue Inhalte an bekannten anzugliedern, um Anknüpfungspunkte zur Erweiterung semantischer Netzwerke (vgl. Kapitel 7.2) und somit auch eine Überleitung von etablierten zu innovativen Inhalten zu schaffen.

Daher sollte zunächst ein Versuch entwickelt werden, mit dem demonstriert werden kann, dass in lebenden Hefe-Zellen elektrochemische Prozesse ablaufen - eine Redox-Aktivität beobachtbar wird.

### 4.4.2.1. Erprobung verschiedener Redox-Indikatoren

Bennetto [81] schlug vor, zur Verdeutlichung der Redox-Aktivität von *E. coli* eine Suspension der Mikroorganismen in Pufferlösung mit Substrat und dem Redox-Mediator Thionin zu versetzen und die einsetzende Farbänderung zu beobachten.
Unter Verwendung der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* als Biokatalysator hat sich Methylenblau als Elektronenshuttle in MFC bewährt,[82] auch Neutralrot kann einen positiven Einfluss auf die Zellleistung haben.[41,83] Für beide Farbstoffe wird grundlegend der gleiche zyklische Mechanismus des Elektronentransports angenommen (Abb. 4.28). Die oxidierte Form der Farbstoffe gelangt in den intrazellulären

Raum und nimmt Elektronen auf. Die reduzierte Form der Farbstoffe verlässt die Hefe-Zelle und gibt die transportierten Elektronen an die Anode ab, sodass der Farbstoff erneut in der oxidierten Form vorliegt.

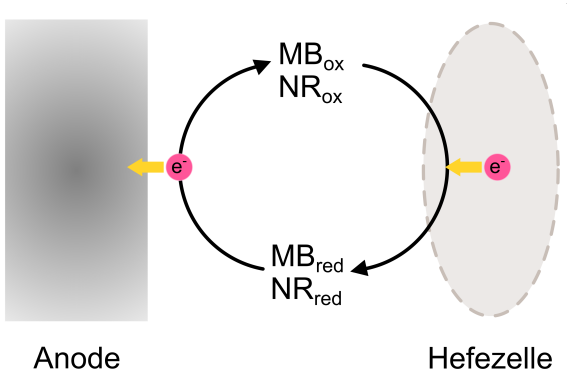



Abbildung 4.28: Zyklischer Elektronentransportmechanismus in mikrobiellen Brennstoffzellen auf Hefe-Basis. *MB für Methylenblau, NR für Neutralrot. Elektron schematisch für beliebige Anzahl an Elektronen.* Eigene Darstellung in Anlehnung an Babanova u. a. [41, S. 385].

Es wird angenommen, dass Substanzen mit einem ähnlichen Redox-Potential wie NADH/NAD$^+$ (E = -0.320 V) Elektronen von NADH aufnehmen können, während Substanzen mit einem Potential nahe dem oder größer als das Potential des Redox-Systems Succinat/Fumarat (E = +0.030 V), sowohl mit den Redox-Systemen NADH/NAD$^+$, Succinat/Fumarat und Redox-Systemen mit höherem energetischen Niveau in der Elektronentransportkette interagieren können.[41]
Das Redox-Potential von Methylenblau (E = -0.055 V) ist recht nahe des Redox-Systems Succinat/Fumarat, das als Enzymkomplex im Citratzyklus und der Atmungskette von Bedeutung ist. Methylenblau kann folglich aus verschiedenen Bereichen des katabolischen Stoffwechsels Elektronen aufnehmen. Die Reduktion des Methylenblaus wird durch die Farbveränderung der Indikator-Lösung von blau zu farblos deutlich (vgl. Abb. 4.29).

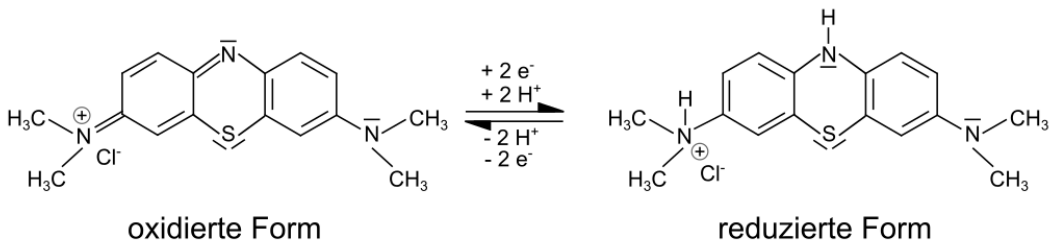



Abbildung 4.29: Struktur der oxidierten und reduzierten Form von Methylenblau.

Das Redox-Potential des Neutralrots (E = -0.290 V) hingegen ist nahe des Redox-Systems NADH/$NAD^+$, sodass nur Elektronen dieses Redox-Systems übertragen werden können. Diese Reduktion wird durch einen Farbwechsel der Indikator-Lösung von gelb zu rot indiziert.

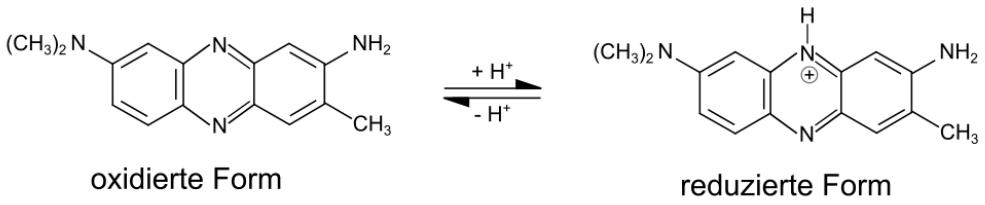
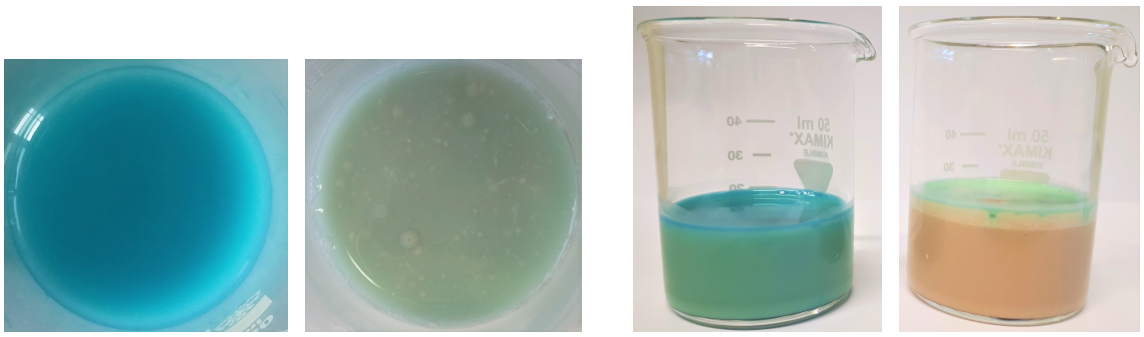



Abbildung 4.30: Struktur der oxidierten und reduzierten Form von Neutralrot.

Die Versuchsreihe wurde auf den Einsatz von Methylenblau und Neutralrot beschränkt, da diese Farbstoffe für den grundsätzlichen Einsatz als Redox-Mediator in technischen MFC erprobt werden (Tabelle 3.2) und an Schulen verfügbar sind.
In den Ansätzen beider Farbstoffe mit wässriger Frischhefe-Suspension war die Bildung von Gasblasen in der Suspension und eine Schaumbildung auf der Oberfläche der Suspension beobachtbar. Bei einer Raumtemperatur von 23 °C war in der Methylenblau-Suspension nach 240 s eine deutliche Farbveränderung verglichen mit der Ausgangsfarbe ersichtlich (siehe Abb. 4.31).



(a) Draufsicht unmittelbar nach Zugabe.

(b) Draufsicht nach vier Minuten Standzeit.

(c) Seitliche Ansicht unmittelbar nach Zugabe.

(d) Seitliche Ansicht nach vier Minuten Standzeit.

Abbildung 4.31: Farbverlauf einer mit Methylenblau versetzten Hefe-Glucose-Suspension. T = 23 °C.

Das enthaltene Methylenblau wurde demnach mit Elektronen aus dem Stoffwechsel der Hefe zur Leukoform reduziert, sodass die vormals blaue Suspension wieder die Hefe-typische bräunliche Färbung aufwies. Die Oberfläche des Schaums über der

Suspension blieb bläulich gefärbt (Abb. 4.31 (c), (d)), da Methylenblau nicht selektiv ist und auch durch Luftsauerstoff in die oxidierte Form überführt wird.
Die Neutralrot-Suspension wies unmittelbar beim Vermengen eine rosa Farbe auf. Der Umschlagbereich des Neutralrots von gelb nach rot beträgt zwischen 6.8 - 8.0. Offenbar war dieser Bereich bereits unterschritten, sodass Neutralrot in der reduzierten Form vorlag und die Suspension eine rosa Farbe aufwies. Im Bereich von 4.5 - 6.5 ist das Wachstum von Bäckerhefe und entsprechende Stoffwechselprozesse möglich.[80] Jedoch konnte über einen Zeitraum von drei Tagen keine Farbveränderung beobachtet werden, die auf die Redox-Aktivität der Hefe zurückzuführen wäre.

Da die Intention der Versuchsreihe darin bestand, mit einer möglichst einfachen Versuchsanordnung eine deutliche Beobachtung zu erwirken, wurde der Versuch zur Visualisierung der Redox-Aktivität von Bäckerhefe ausschließlich mit Methylenblau weitergehend charakterisiert: Die Farbveränderung der Methylenblau-Hefe-Suspension von blau zu farblos (Hefe-farbend) war klar erkennbar.

#### 4.4.2.2. Vergleichender Einsatz von Frisch- und Trockenhefe

Da sich Frischhefe nur begrenzte Zeit lagern lässt, deren Dosierung und Homogenisierung während des Versuchs aufwendig ist, wurde vergleichend aktive Trockenhefe eingesetzt. Aktive Trockenhefe ist ein feines Granulat aus Hefe mit einem Massenanteil von Wasser unter 10 %. Pro Masseneinheit weist diese eine bis zu siebenfach höhere Stoffwechselaktivität gegenüber Frischhefe auf und ist bis zu zwei Jahre ohne Einbußen der Triebkraft lagerfähig.[84]
Bei einer Raumtemperatur von 23 °C war in beiden Ansätzen eine Gas- und Schaumbildung ersichtlich. Unter Verwendung von Trockenhefe trat die deutliche Farbänderung bereits nach 120 s ein, die Schaumschicht war ausgeprägter - was als Anzeichen erhöhter Stoffwechselaktivität gewertet werden kann.[85]
Sowohl Frisch- als auch aktive Trockenhefe eigenen sich demnach, um durch Reduktion des Methylenblaus die Redox-Aktivität zu visualisieren. Da die Trockenhefe eine höhere Stoffwechselaktivität (wohl wegen der höheren Anzahl an Hefe-Zellen pro Masseneinheit) aufweist, erfolgte die Farbänderung in der Hälfte der von der Frischhefe benötigten Zeit. Da Trockenhefe zudem besser zu lagern und zu dosieren ist, wurde sie für die folgenden Versuche im Kontext mikrobieller Brennstoffzellen unter Verwendung des Biokatalysators Bäckerhefe genutzt.

#### 4.4.2.3. Temperaturabhängigkeit der Redox-Aktivität

Die Stoffwechselwege der Bäckerhefe werden von einer Kaskade enzymatischer Reaktionen definiert, sodass sich Temperaturoptima ergeben. Zur Gärung beträgt das Optimum 32 °C, zur Zellteilung 30 °C.[86] Ab einer Temperatur von 40 °C sterben die Hefe-Zellen ab.[87]
Um diese Temperaturabhängigkeit im Schulversuch zu betrachten, wurden sechs Versuchsvarianten erstellt, bei denen die Ansätze auf 0 °C, 10 °C, auf Raumtemperatur, 30 °C, 40 °C sowie auf 50 °C temperiert worden sind. Wird die Zeit bis zur Farbveränderung des Methylenblaus als Indikator für den Stoffwechsel angewandt, lässt sich das Temperaturoptimum bei 30 °C bestätigen: Bei dieser Temperatur wird eine Entfärbung in der kürzesten Zeitspanne (80 s) erreicht [7].

Tabelle 4.7: Zeitraum bis zum Einsetzen der Entfärbung der Methylenblau-Suspension bei Verwendung von Trockenhefe.

| **T [°C]** | 0 | 10 | 23 | 30 | 40 | 50 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **t [s]** | - | 1800 | 120 | 80 | - | - |

Zudem ist die Gas- und Schaumbildung sehr deutlich beobachtbar (Abb. 4.32). Die entstandenen Schaummengen pro Zeiteinheit können als Indikator der Stoffwechselaktivität der Bäckerhefe verstanden werden.[85] Bei den Ansätzen der Temperaturen von 0 °C, 40 °C sowie 50 °C waren weder Gasbildungen noch Farbveränderungen ersichtlich. Bei 0 °C ist die Stoffwechselaktivität gehindert, während bei den höheren Temperaturen bereits ein Absterben der Hefe-Zellen einsetzt.



Abbildung 4.32: Schaumbildung einer wässrigen Suspension aus Hefe, Methylenblau, Glucose bei einer Temperatur von 30 °C während zweiminütiger Reaktionszeit.

[7] Unter dem Begriff *Entfärbung* ist in dem Zusammenhang die Farbänderung der Methylenblau-Indikator-Lösung von blau zu farblos zu verstehen. Die betrachtete Suspension im *entfärbten* Zustand Hefe-farbend.

Bereits durch diesen kompakten Versuchsaufbau kann die Temperaturabhängigkeit der Redox-Aktivität von Bäckerhefe anhand der Ausprägung der Gas- und Schaumbildung sowie der Farbveränderung des Methylenblau-Indikator-Lösung verdeutlicht werden.

### 4.4.3. Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

Die Hefe-Brennstoffzelle sollte zunächst in einer Zwei-Topf-Anordnung realisiert werden, in der die Reaktionsräume der Anode und Kathode eindeutig voneinander getrennt vorliegen. An der Anode wird ein Kohlenhydrat oxidiert, an der Kathode Luftsauerstoff reduziert, wie in den Gleichungen 4.11 am Beispiel des Substrates Glucose aufgeführt ist:

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & \mathrm{C_6H_{12}O_6 + 6\,H_2O \xrightarrow{Hefe} 6\,CO_2 + 24\,H^+ + 24\,e^-} \\ \text{Kathode} & \mathrm{6\,O_2 + 24\,H^+ + 24\,e^- \longrightarrow 12\,H_2O} \end{array} \tag{4.11}$$

$$\mathrm{C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \xrightarrow{Hefe} 6\,CO_2 + 6\,H_2O}$$

In dieser Anordnung kann analog zum aus dem regulären Chemieunterricht bekannten galvanischen Element die Funktion der Halbzellen von Lernenden zugeordnet und somit innovative an bekannte Inhalte angeknüpft werden. Dieses methodische Prinzip, von bekannten Inhalten ausgehend neue Aspekte zu erschließen, ist im Arbeitskreis etabliert. Daher spiegelt sich ein analoges Vorgehen beispielsweise im Themenbereich *Photogalvanisches Element* in dem Gang *Vom Galvanischen Element zur Solarzelle*[88,89] und im Bereich des *Photo-Blue-Bottle-Experimentes* in *Vom Daniell-Element zum Solar-Wasserstoff* wider.[90]
Angelehnt an den Aufbau von Silveira u. a. [91] sollte daher eine Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau für den Einsatz im schulischen Kontext experimentell charakterisiert sowie weiterentwickelt werden. Die Intention bestand darin,

- in dem Schulkontext angemessenen Zeiträumen eindeutige Beobachtungen zu generieren.
- einen auf die wesentlichen Komponenten zur Erklärung der Funktionsweise von mikrobiellen Brennstoffzellen reduzierten Aufbau zu identifizieren.

- in dem Aufbau möglichst ausschließlich kostengünstige und alltagsnahe Materialien zu verwenden.
- eine möglichst hohe auf die Stoffwechselaktivität der Bäckerhefe zurückführbare Zellspannung zu erreichen.
- Effekte einer Substrat-Priorisierung zu verdeutlichen (vgl. Abschnitt 4.4.1).

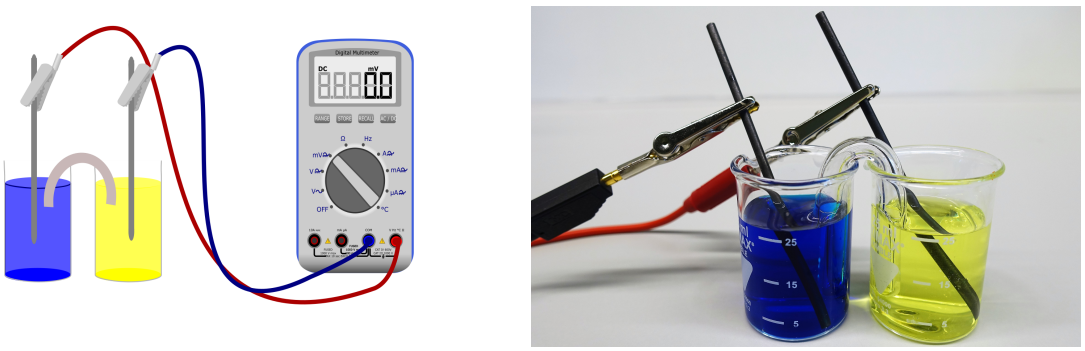
Die zugrundeliegende Versuchsanweisung nach Silveira u. a. [91] wurde zunächst nachempfunden, bevor sie hinsichtlich des Einsatzes von Redox-Mediatoren, der Elektrolyt-Brücke, des Elektrolytes in der Brücke und der Elektroden sowie der Lösung im Kathodenraum verändert wurde. Der Einfluss veränderter Glucose-Konzentrationen in der Lösungen im Anoden und Kathodenraum sowie die Änderung des pH-Wertes im Anodenraum wurde bestimmt und die substratspezifischen Effekte auf die Zellleistung sowie der Effekt von Luftzufuhr in die Lösung des Kathodenraums vermessen.

Da die Konzentrationen der Metaboliten in Mikroorganismen mit ablaufender Glykolyse nicht exakt bekannt sind, kann kein konkreter Erwartungswert angegeben werden.[31] Die Bestrebungen der Versuchsreihe bestanden daher darin, eine möglichst hohe Zellspannung zu erreichen.

Weil die Aktivität von Mikroorganismen temperaturabhängig ist, wurden nur unter gleichen Bedingungen erfolgte Messungen zum Vergleich herangezogen. Die bei den Messungen vorherrschende Raumtemperatur wird jeweils an den Messgraphen angegeben. Zunächst wurde zur Beschreibung der jeweiligen Varianten jeweils die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 30 min mit dem Messwerterfassungssystem „Pocket Cassy“ dreifach gemessen. Die Stromstärke wurde vermessen, war jedoch zumeist außerhalb des Messbereiches des Pocket Cassy, weswegen keine Berechnung der Zellleistungen möglich war.
Die Messungen wurden bei der jeweils angegebenen Raumtemperatur durchgeführt, der Abstand zwischen den Elektroden betrug jeweils 5 cm. Weiterhin wurden für alle Messungen dieselben Kabel verwendet.

#### 4.4.3.1. Versuchsanordnung nach Silveira u. a. [91]

Der Aufbau wird in der didaktischen Standortbestimmung in Kapitel 5.4 ausführlich dargelegt, zusätzlich ist die Durchführung in Kapitel B.3.4.2.1 hinterlegt.
Zu Beginn des Stabilisierungsprozesses der Potentialbildung zwischen Anoden- und Kathodenhalbzelle wurde kurzfristig eine Spannung von über 500 mV gemessen. Innerhalb des Messzeitraums vor Hefe-Zugabe nahm diese kontinuierlich ab, bevor sie sich nach 60 min bei etwa 200 mV stabilisierte. In weiteren Messreihen stellte sich eine *Stabilisation* erst nach 90 min ein. Bei anschließender Zugabe von Hefe



(a) Aufbau nach Silveira u. a. [91].

(b) Ansicht während des Stabilisationsprozesses.

Abbildung 4.33: Eindrücke von der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei-Topf-Anordnung nach Silveira u. a. [91].

in die Anodenhalbzelle nahm die *Gesamt*-Spannung bis auf 533 mV zu, ehe sie innerhalb des halbstündigen Messzeitraums auf 492 mV sank (Abb. 4.34, blau). Die Abnahme der Zellspannung ist durch den zurückgehenden Hefe-Metabolismus aufgrund der sinkenden Glucose-Konzentration begründet.[32] Letztlich ist nur die Differenz zwischen der stabilisierten Spannung ohne Hefe und Gesamtspannung nach Hefe-Zugabe auf die Wirkung der Hefe als Biokatalysator zurückzuführen (Abb. 4.34, rot). Im Durchschnitt bewirkte die Zugabe von Hefe bei den erfolgten Messreihen einen Anstieg der Spannung $\Delta U$ um 203 mV.

Mithilfe dieses Aufbaus kann demnach gezeigt werden, dass die Zugabe von Hefe in die Anodenhalbzelle einen Spannungsanstieg bewirkt, womit qualitativ die Funktion von MFC experimentell belegt werden kann.
Allerdings erstreckt sich der Stabilisationsprozess bei 24 °C über einen Zeitraum von 60 min, was die Dauer einer oder gegebenenfalls zweier Schulstunde überschreitet. Der Versuch könnte also nur durchgeführt werden, wenn der Aufbau durch eine Lehrkraft vorbereitet würde und lediglich die Hefe-Zugabe durch die Lernenden selbst im Rahmen des Unterrichts erfolgt.

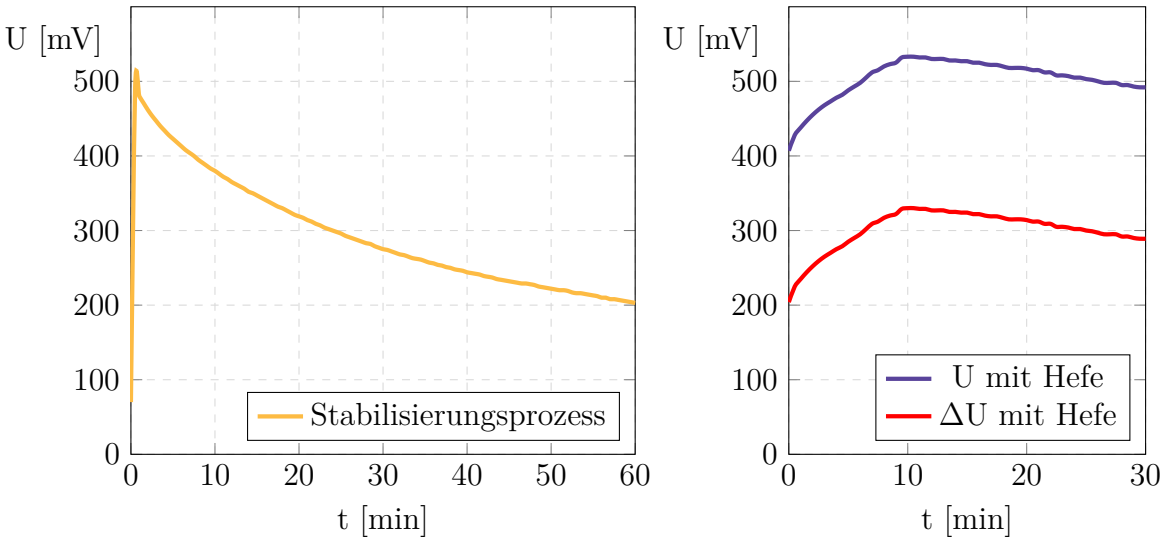



Abbildung 4.34: Im Zusammenhang des Nachbaus der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau nach Silveira u. a. [91] gemessene Spannungen. T = 24 °C.

Die genauen Prozesse der Potentialbildung während des Stabilisationsprozesses und nach Hefe-Zugabe sind durch die vielen im Aufbau nach Silveira u. a. [91] eingesetzten Komponenten in Anoden- und Kathodenhalbzelle nicht eindeutig belegbar, sodass der Spannungsanstieg nach Hefe-Zugabe nur qualitativ zu bewerten ist. Zeitgleich können verschiedene Prozesse stattfinden, wie etwa Wechselwirkungen zwischen der Hefe und den Mediatoren.
Die unterschiedlichen eingesetzten Komponenten im Aufbau nach Silveira u. a. [91] bedingen auch, dass der Versuch inhaltlich für Lernende schwieriger nachvollziehbar ist und der eigentliche Fokus des Versuches auf den Betrieb der MFC verschoben wird. So ist beispielsweise die Funktionsweise eines Puffers selbst Lernenden der Sekundarstufe II nicht notwendigerweise bekannt, da diese nicht explizit im Lehrplan verankert sind.[92]
Die U-Rohre als Elektrolyt-Brücken müssten in entsprechender Zahl vorhanden sein und kurz vor ihrem Einsatz mit der Elektrolyt-Lösung in Agar versehen werden. Schließlich sind Kaliumhexacyanoferrat als gewässergefährend und Methylenblau als gesundheitsschädlich deklariert[93] und sollten somit im schulischen Kontext nur dann zum Einsatz kommen, wenn sie für das Gelingen oder die Visualisierung des Versuches unabdingbar sind.

In diesem Schulversuch findet Kaliumhexacyanoferrat als Oxidationsmittel Einsatz, da es bei Gebrauch einfacher Kohlenstoffelektroden ein geringes Überpotential ausbildet, sodass die Betriebsspannung nahe der Leerlaufspannung ist. Weil die

Reoxidation mit Sauerstoff jedoch unzureichend abläuft, muss die Lösung im Kathodenraum regelmäßig ausgetauscht werden.[94] Bereits während der dreißig-minütigen Messzeit nach Hefe-Zugabe war eine bleibende Oxidation des Kaliumhexacyanoferrats anhand der Umfärbung der Lösung von gelb nach grün anzunehmen. Aus didaktischer Perspektive ist der Einsatz von Kaliumhexacyanoferrat zweifelhaft, da die Redox-Prozesse und der notwendige Austausch der Lösung im Kathodenraum erläutert werden müssen - was wiederum der Demonstration einer Brennstoffzelle als kontinuierlichem Energiewandler entgegensteht.

Aus den vorgestellten Gründen wurde auch im Sinne einer Substitutionsprüfung in anschließenden Messreihen auf Kaliumhexacyanoferrat verzichtet und der Einfluss exogener Redox-Mediatoren überprüft.

#### 4.4.3.2. Einfluss exogener Redox-Mediatoren

Ein positiver Effekt der Redox-Indikatoren Neutralrot und Methylenblau auf die Zellleistung mikrobieller Brennstoffzellen mit der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* wurde verschiedentlich beschrieben.[82,83] Sayed u. a. [95] hingegen postulieren, dass die in Kontakt mit der Anodenoberfläche stehenden Hefe-Zellen verantwortlich für den Elektronentransfer seien und exogene Mediatoren keinen Einfluss nähmen. Aufgrund dieser gegensätzlichen Argumentationsstränge wurde der Einfluss der jeweiligen Redox-Mediatoren im Anodenraum einzeln sowie der einer Mischung auf die Leistung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau überprüft und mit einer Variante ohne exogene Mediatoren verglichen. Während auf den Einsatz eines Puffers in beiden Halbzellen verzichtet wurde,[96] wurde im Kathodenraum von der Verwendung der Kaliumhexacyanoferrat(III)-Lösung als Oxidationsmittel[81,91] abgesehen, um möglichst in geringem Ausmaß Stabilisationsprozesse zwischen Elektrolyten in der Anoden- beziehungsweise Kathoden-Lösung und nicht durch Aktivität der Hefe bedingte Potentialbildung hervorzurufen.

Die Hefe wurde unmittelbar bei Aufbau der Zelle in den Anodenraum eingebracht und die Messung der Spannung begonnen: Sowohl unter Einsatz von Methylenblau, Neutralrot als auch des Gemisches beider Mediatoren im Anodenraum der Hefe-Brennstoffzelle war unmittelbar zu Beginn der Messung eine höhere Spannung messbar als ohne Einsatz eines exogenen Mediators. Nur unter Verwendung von Methylenblau blieb die Spannung über den gesamten Messzeitraum höher als ohne Zusatz eines exogenen Mediators. Da sich die Methylenblau-Suspension jedoch im Verlauf der

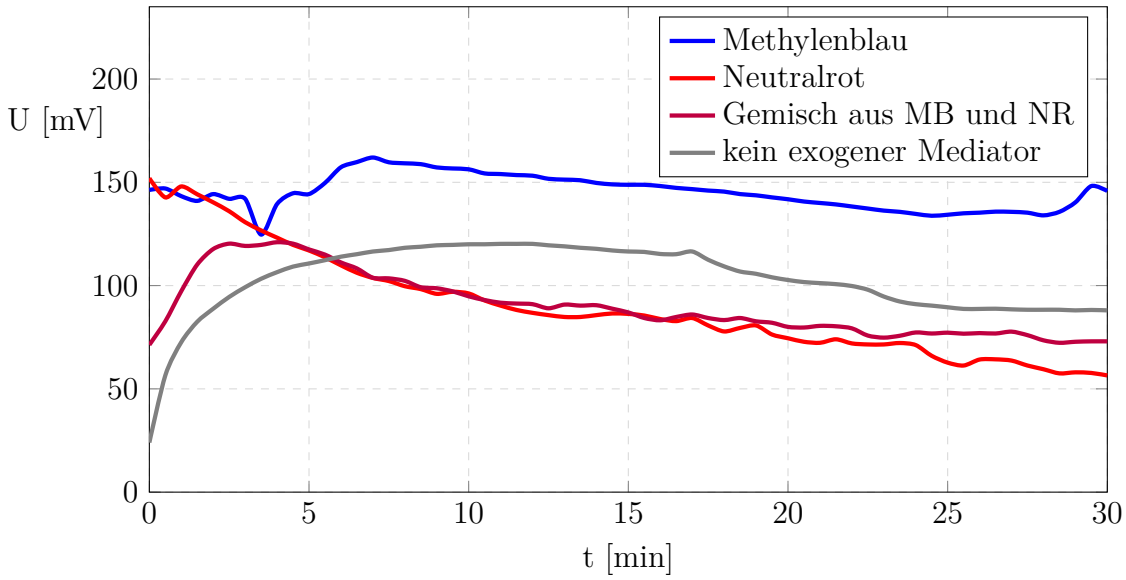



Abbildung 4.35: In Abhängigkeit des Einsatzes exogener Mediatoren gemessene Zellspannungen. T = 22 °C.

Messung entfärbte, ist anzunehmen, dass Methylenblau in dem gewählten Versuchs-Setting nicht die Funktion eines Elektronen-Shuttles erfüllte, sondern die aus dem Metabolismus der Hefe freiwerdenden Elektronen in Leukomethylenblau-Molekülen gespeichert wurden. Anzumerken ist zudem, dass der Verlauf der Spannung bei Zugabe exogener Mediatoren nicht der Variante ohne exogene Mediatoren entspricht: Ohne Zugabe eines exogenen Mediators stieg die Spannung bei einer Raumtemperatur von T = 22 °C über einen Zeitraum von 10 min von 24 mV auf 120 mV an, bevor sie im Verlauf weiterer 20 min kontinuierlich auf 88 mV sank. Dieser vermutlich dem Stoffwechsel der Bäckerhefe entsprechende Verlauf der Spannung spiegelt sich nicht in den anderen Messvarianten wieder.
Ursächlich hierfür kann sein, dass sowohl Methylenblau als auch Neutralrot Einfluss auf den Metabolismus der Bäckerhefe nehmen. In beiden Fällen wird Glucose komplett abgebaut, es werden jedoch unterschiedliche Stoffwechselendprodukte gebildet. Die Vermutung liegt also nahe, dass durch die genannten Redox-Indikatoren alternative Stoffwechselwege aktiviert werden. In Anwesenheit von Methylenblau konnte beispielsweise die Bildung von Ameisensäure mittels HPLC detektiert werden, die in Abwesenheit des Farbstoffes nicht gebildet wird - die genauen Stoffwechselwege sind Gegenstand aktueller Forschung.[82] In Anwesenheit von Neutralrot in der Hefe-Suspension wurde eine erhöhte Ausbeute an Ethanol gemessen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Zellatmung unterdrückt wird und die Gärung abläuft.[41] Sobald der Alkoholgehalt 15 Vol.% übersteigt, setzt auch die Gärung aus, sodass der Metabolismus zum Erliegen kommt.[32]

In der Variante des Versuchsaufbaus mit Einsatz von Methylenblau wurde eine höhere Zellspannung vermessen als ohne Zugabe exogener Mediatoren. Dennoch wird für die didaktische Optimierung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau auf den Einsatz exogener Mediatoren verzichtet, da der Einfluss auf den Metabolismus unklar ist und der Verlauf der Spannung nicht schlüssig zu erklären ist. Auch die zu beobachtende Entfärbung der Methylenblau-Suspension während des Messung widerspricht der Elektronen-transferierenden Funktion des Farbstoffes und steht der intendierten didaktischen Funktion des Versuchs entgegen, dass Brennstoffzellen im Gegensatz zu Akkumulatoren *kontinuierliche* Energiewandler sind.

Während Methylenblau zur Visualisierung der Redox-Aktivität von Bäckerhefe essentiell ist, wurde auch im Sinne einer Substitutionsprüfung zur Verringerung der Gefährdung auf den Einsatz von Methylenblau in Hefe-Brennstoffzellen verzichtet.

#### 4.4.3.3. Variation der Elektrolyt-Brücke

Wenngleich bei Silveira u. a. [91] mit Agar und Elektrolyt-Lösung präparierte U-Rohre aus Glas als Elektrolyt-Brücke vorgesehen sind, sollte hinsichtlich der Entwicklung von Schulversuchen überprüft werden, ob ein alltagsnahes und kostengünstigeres Material gleichermaßen geeignet ist. Dazu wurden vergleichend Bierdeckelfilz, Eierkartonpappe, Küchen- und Toilettenpapier jeweils in der Kaliumchlorid-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}$ getränkt und als einfache Elektrolyt-Brücken genutzt. Sowohl der Bierdeckelfilz als auch das Küchenpapier erwiesen sich als nicht praktisch handhabbar, weswegen lediglich die sich unter Einsatz von Eierkartonpappe und Toilettenpapier ergebende Zellspannung bestimmt wurde (Abb. 4.36). Zur Messung wurde die Hefe-Brennstoffzelle mit Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ im Anoden- und Kathodenraum und Bleistiftminen der Länge 10 cm als Elektroden gewählt. In die Lösung im Anodenraum wurden 1.5 g Trockenhefe eingebracht und die Halbzellen über die jeweilige gewählte Brücke verbunden.

In allen drei Variationen konnten Spannungen gemessen werden. Unter Verwendung von Toilettenpapier stellte sich kurzfristig eine Spannung von 120 mV ein, die im Verlauf der zehnminütigen Messung auf 35 mV sank. Unter Verwendung des mit Agar gefüllten U-Rohrs ergab sich zu Beginn eine ähnlich hohe Spannung (115 mV), die wiederum im Verlauf der Messung auf 65 mV sank. Dahingegen wurde unter Verwendung der Eierkartonpappe eine deutlich niedrigere Spannung gemessen.
Auch wenn die Spannung schneller im Vergleich zur Verwendung des U-Rohrs schnel-

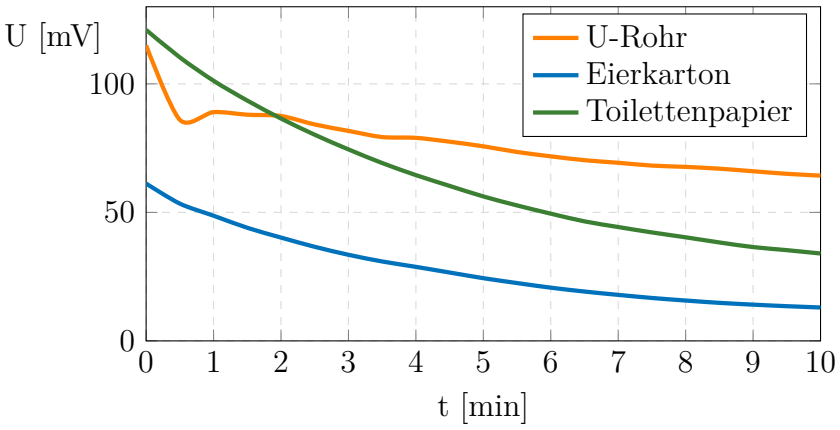



Abbildung 4.36: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der eingesetzten Elektrolyt-Brücke. T = 22 °C.

ler abnahm, erschien das verdrillte Toilettenpapier als geeignetste Wahl anhand der eingangs aufgestellten Kriterien. Toilettenpapier ist ein alltagsnahes und preisgünstiges Material, das aufgrund der wirkenden Kapillarkräfte der Cellulosefasern als Elektrolyt-Brücke eingesetzt werden kann. Das verdrillte Toilettenpapier war auch getränkt sehr reißfest und ließ sich gut und mit wenigen Handgriffen in die Halbzellen einbringen.

#### 4.4.3.4. Variation der Elektrolyt-Lösung in der Brücke

Nachdem verdrilltes Toilettenpapier als alternative geeignete Elektrolyt-Brücke für diesen Schulversuch identifiziert worden ist, wurde weiterhin untersucht, inwiefern ein Zusatz von Elektrolyten notwendig ist. Dazu wurde erneut der Aufbau ohne exogene Mediatoren, mit Bleistiftminen der Länge 10 cm als Elektroden und eine Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ in Anoden- und Kathodenhalbzelle gewählt, wobei in die Lösung im Anodenraum 1.5 g Trockenhefe beigemengt wurde. Die Elektrolyt-Brücke bestand aus verdrilltem Toilettenpapier, das in Kaliumchlorid- oder Kaliumnitrat-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\text{mol}}{\text{L}}$ getränkt wurde, beziehungsweise zunächst trocken in die Zelle eingebracht wurde und sich schnell mit Elektrolyt-Lösung vollsog. Bei letztgenannter Variante wurde die Messung begonnen, sobald das Toilettenpapier augenscheinlich vollständig befeuchtet war.

Zu Beginn der Messungen stieg die Zellspannung jeweils innerhalb weniger Minuten auf einen Maximalwert an, wobei ohne zusätzliche Elektrolyt-Lösung in der Brücke eine höhere Spannung als unter Verwendung der gesättigten Kaliumnitrat-Lösung beziehungsweise Kaliumchlorid-Lösung erreicht wurde (siehe Abb. 4.37). Die zu-

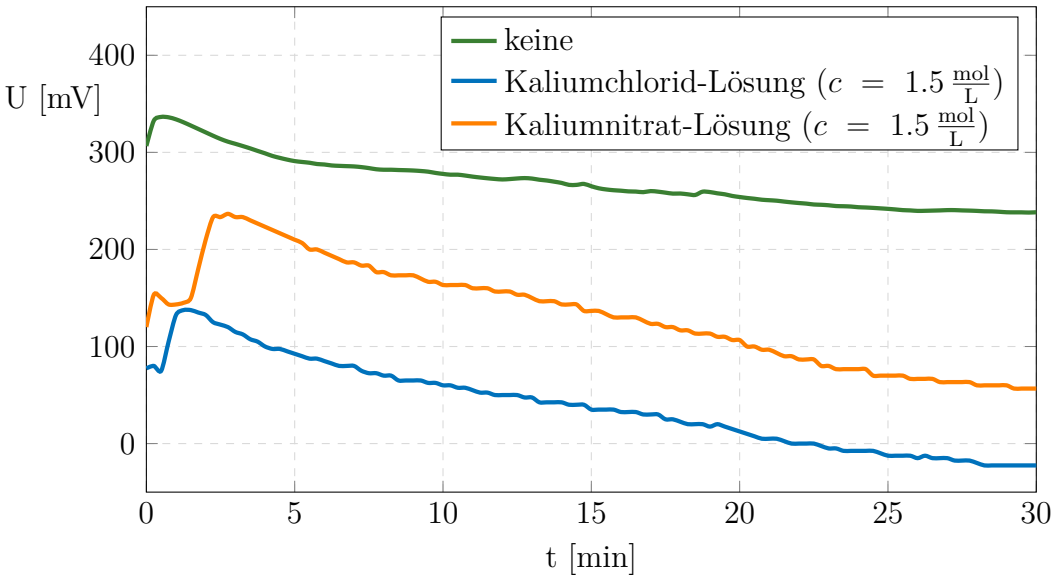



Abbildung 4.37: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der in der Toilettenpapier-Brücke eingesetzten Elektrolyt-Lösung. T = 22 °C.

sätzlich in das System eingebrachten Ionen scheinen das auszubildende Potential zu verringern. Die Stromstärken waren in jeder der Varianten zu gering, um mit dem Pocket Cassy vermessen zu werden. Daher wird anhand der gemessenen Spannung abgeleitet, in weiteren Aufbauten verdrilltes Toilettenpapier ohne Zusatz einer Elektrolyt-Lösung zu nutzen.

#### 4.4.3.5. Variation der Elektroden

Da auch das Material der Elektroden Einfluss auf die Potentialbildung und somit die Zellleistung haben kann, wurden verschiedene Materialien erprobt. Um als Elektrode in einer MFC geeignet zu sein, muss das Material leitfähig, korrosionsbeständig und formstabil sein, sowie über eine möglichst große Oberfläche verfügen. Zudem sollte das Material keinen negativen Einfluss auf den Biokatalysator beziehungsweise die Umwelt im Allgemeinen haben und möglichst preisgünstig sein. Gebräuchlich sind daher Materialien auf Kohlenstoffbasis sowie Metalle.[54]
Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die Kohlenstoff-basierten Komponenten Bleistiftminen, Graphitfolie, Graphitvlies und Graphitgewebe auf ihre Eignung als Elektrode in der Hefe-Brennstoffzelle geprüft (Abb. 4.38, Abb.4.39). Zusätzlich wurden als metallische Elektroden Scherfolien, Kupfer-, Silber-, Zink- und Eisen-Bleche sowie Eisen-Nägel, Edelstahl-Topfreiniger und Büroklammern im Versuchsaufbau eingesetzt und die resultierende Spannung vermessen (Abb. 4.40).



Abbildung 4.38: Von links nach rechts: Makroskopisches Aussehen der Graphitfolie, des Graphitvlies sowie des Graphitgewebes.

Um möglichst selektiv den Einfluss der Elektroden abzubilden, wurde der Aufbau ohne exogene Mediatoren, Toilettenpapier ohne zusätzlichen Elektrolyt als Brücke und mit gleich konzentrierter Glucose-Lösung in der Anoden- und Kathodenhalbzelle umgesetzt. In den Anodenraum wurde zusätzlich Bäckerhefe eingebracht. Es wurden jeweils die gleichen Komponenten als Anode und Kathode gewählt, um nicht die Potentialdifferenz zwischen zwei unterschiedlichen Elektroden-Materialien zu vermessen.

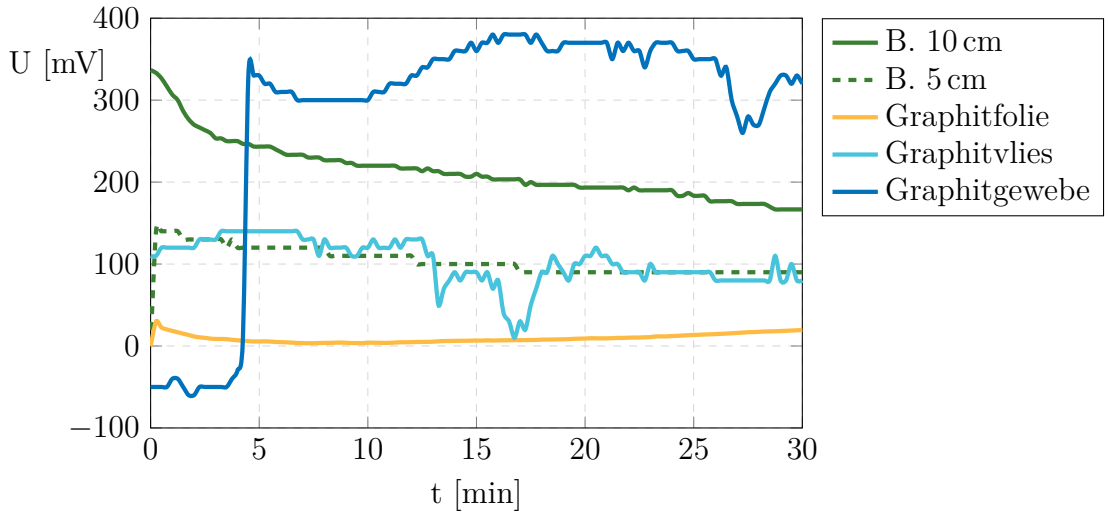



Abbildung 4.39: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Kohlenstoff-Elektroden. *B.: Bleistiftminen verschiedener Längen.* T = 22 °C.

An den Kohlenstoff-basierten Materialien schienen unterschiedliche Prozesse zur Potentialausbildung abzulaufen, da sich die Geschwindigkeit und Kontinuität der Einstellung sowie die Höhe der messbaren Spannungen deutlich unterschieden. Im

Falle einer eher planen Oberfläche des Materials (Bleistiftmine, Graphitfolie) war eine recht kontinuierliche Spannung ohne erhebliche Schwankungen messbar. Bei unebenen Oberflächenstrukturen wie die des Vlies beziehungsweise Gewebes traten erhebliche Spannungsschwankungen auf. An derartigen Materialien wird zwar aufgrund der vergrößerten Oberfläche eine hohe Spannung ausgebildet, allerdings verstopfen sie leicht[36] - beispielsweise mit abgestorbenen Zellen des Mikroorganismus - und sind nicht sehr formstabil, sodass sie durch Gasbildung im Anodenraum aufgetrieben werden.
An einigen der gewählten metallischen Komponenten bildeten sich ähnlich hohe sowie höhere Spannungen aus (Abb. 4.40): Unter Verwendung von Zink- und Eisen-Blechen sowie Eisen-Nägeln ergaben sich hohe Spannungen. Die höchste Spannung war bei der Verwendung von Eisen-Blechen messbar. Sie sank jedoch binnen der ersten 5 min der Messzeit unter die mit Eisen-Nägeln als Elektroden erreichte Spannung. Die Eisen-Nägel, Locken des Edelstahl-Topfreinigers, sowie Büroklammern wurden als kostengünstige, alltagsnahe Substitutionsmöglichkeit für die Eisen-Bleche getestet. Sowohl an den Eisen-Nägeln als auch der Büroklammer bildete sich eine deutliche Potentialdifferenz aus, sodass diese als lowcost Ersatz für Eisen-Bleche genutzt werden können. Mit Eisen-Nägeln als Elektroden wurde absolut betrachtet die höchste und stabilste Spannung gemessen.

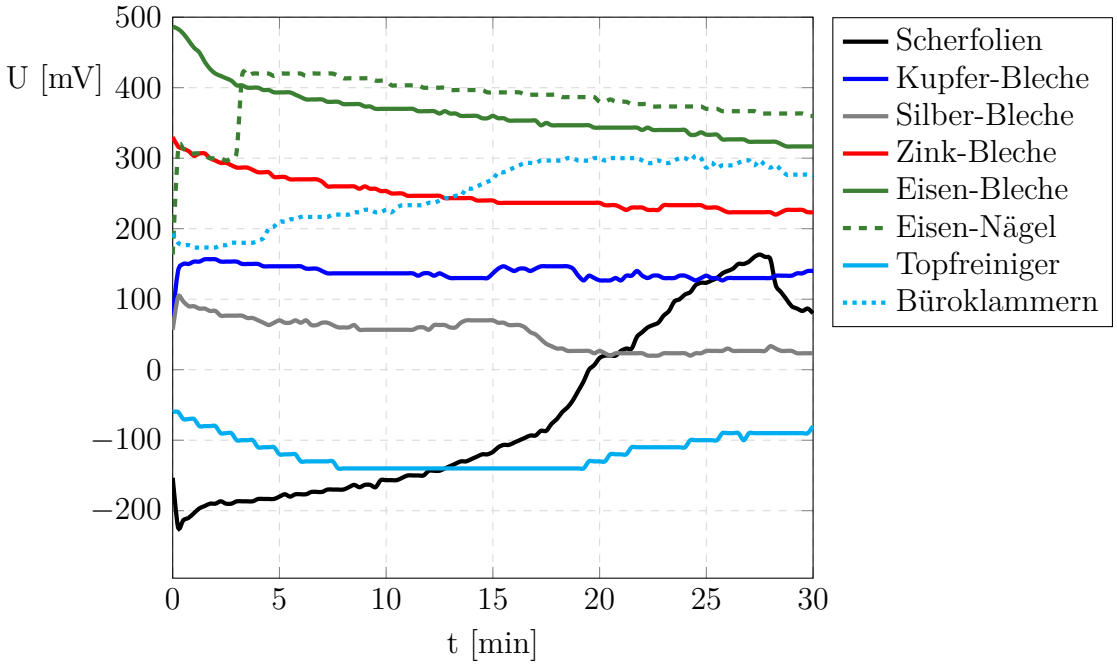



Abbildung 4.40: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Metall-Elektroden. T = 22 °C.

Eisen ist in wässrigen Lösungen nicht korrosionsbeständig, wie es zunächst als Anforderung an das Elektrodenmaterial formuliert war. Womöglich wirkt gerade dies jedoch positiv auf die messbare Zellspannung: Hefe-Zellen benötigen Eisen-Ionen im Mikromol-Bereich zur Aufrechterhaltung des Stoffwechsels und zum Wachstum.[80] Zink wird bislang nicht als Elektrodenmaterial geführt, allerdings benötigen Hefe-Zellen auch Zink-Ionen zum Überleben,[80] sodass das Material als nicht toxisch für die Mikroorganismen und grundsätzlich geeignet eingestuft werden kann. In dem Versuch wurde unter Einsatz von Zink-Elektroden eine niedrigere Spannung verglichen mit Eisen-Elektroden, jedoch höhere verglichen mit Kupfer- und Silber-Elektroden erreicht. Obwohl Kupfer und Silber als etabliertes Anodenmaterial gelten,[54] wurden in diesem Aufbau recht niedrigere Spannungen erreicht. Unklar ist, ob und in welchem Maße intermediär adsorbierte Gasblasen isolierend an den jeweiligen Materialien wirken - ähnlich, wie es bei Batterien der Fall sein kann.

In dieser Versuchsreihe erwiesen sich die Eisen-Nägel als geeignetstes Elektrodenmaterial: Sie sind leitfähig, formstabil und über den schulrealen Messzeitraum korrosionsbeständig. Obwohl ihre Oberfläche durch die Form bedingt eher gering ist, bildete sich an ihnen eine hohe Zellspannung von maximal 420 mV aus, die Stromstärke wurde nach 10 min Messzeit als 30 $\mu$A bestimmt. Diese Stromstärke reicht jedoch nicht zum Betrieb eines Motors aus.

#### 4.4.3.6. Variation der Lösung im Kathodenraum

Der Einfluss der im Kathodenraum verwendeten Elektrolyt-Lösung sollte überprüft werden. Um möglichst selektiv den Einfluss der im Kathodenraum verwendeten Lösung abzubilden, wurde der Aufbau ohne exogene Mediatoren, Toilettenpapier ohne zusätzlichen Elektrolyt als Brücke, Eisen-Nägeln als Elektroden und einem Glucose-Gehalt $\omega = 10\,\%$ von in der Anoden-Halbzelle umgesetzt.
Aufgrund des in Abschnitt 4.4.3.1 beschriebenen Stabilisationsprozesses wurde die von Silveira u. a. [91] eingesetzte Kaliumhexacyanoferrat-Lösung als Lösung im Kathodenraum mit und ohne Hefe-Zugabe in der Anodenhalbzelle vermessen. In allen weiteren Messreihen kam Hefe im Anodenraum zum Einsatz. Kalilauge wurde aufgrund ihrer guten elektrischen Leitfähigkeit und der Beständigkeit der Elektrode in alkalischem Medium als Elektrolyt-Lösung erprobt. Die Konzentrationen wurden so gewählt, dass sie der der Kaliumhexacyanoferrat-Lösung gleichen ($c = 0.025\,\frac{mol}{L}$) beziehungsweise der in Abschnitt 4.1.1 für alkalische Brennstoffzellen geeignet befundenen Konzentration von $c = 0.1\,\frac{mol}{L}$ entsprechen. Zudem wurde eine Natriumchlorid-Lösung eingesetzt, da Natriumchlorid in Lösung eine elektrische Leitfähigkeit bewirkt und

bei der geringen erwartbaren Zellleistung keine Bildung von Chlor zu befürchten war. Schließlich wurde Glucose-Lösung in zwei Konzentrationen verwendet: Analog zum Kaliumhexacyanoferrat sowie in gleicher Konzentration wie in der Anodenhalbzelle, um Potentialbildungseffekte aufgrund von Konzentrationsunterschieden zu verringern.
Die jeweils resultierenden Ruheklemmspannungen sind in Abbildung 4.41 dargestellt.

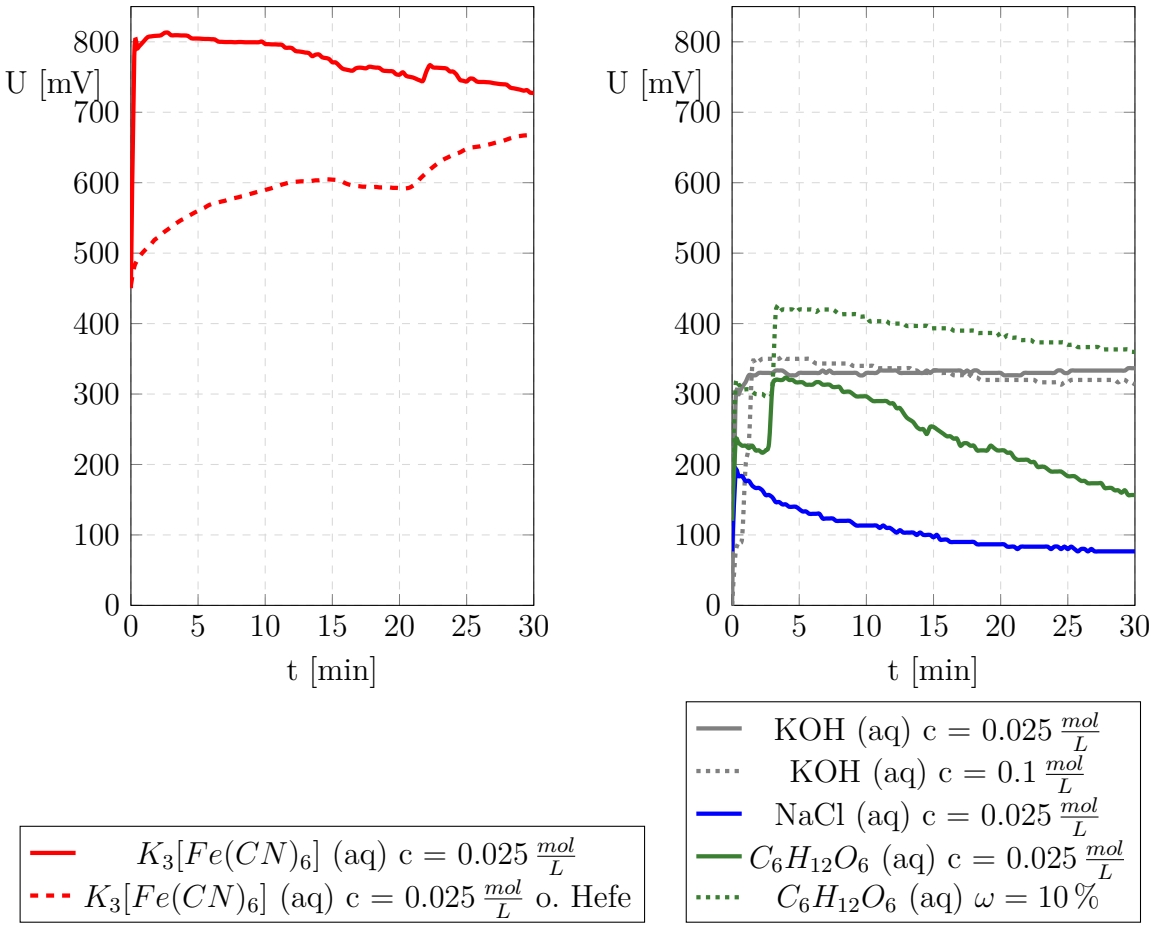



Abbildung 4.41: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Lösung im Kathodenraum. T = 22 °C.

Unter Einsatz der von Silveira u. a. [91] vorgeschlagenen Kaliumhexacyanoferrat-Lösung wurde die höchste Spannung von $U_{max}$ = 810 mV detektiert. Doch auch ohne Hefe-Zugabe in den Anodenraum wurde eine Spannung von bis zu 600 mV erreicht (Abb. 4.41, rot gestrichelt). Somit entfällt ein erheblicher Teil der ausgebildeten Spannung auf vom Kaliumhexacyanoferrat ausgehende Prozesse. Vor Hefe-Zugabe in der Anodenhalbzelle hätte - wie auch bei zusätzlichem Vorhandensein exogener Mediatoren (Abschnitt 4.4.3.1) - auf eine Stabilisierung der Spannung gewartet werden müssen, um über eine Differenzbestimmung den Einfluss der Hefe bestimmen

zu können. Dieses Vorgehen erscheint wenig schultauglich. Bei Verwendung von Kalilauge als Lösung im Kathodenraum bildete sich beinahe unabhängig von der Konzentration eine recht konstante Spannung von 330 mV aus. Dahingegen wurde für Natriumchlorid-Lösung im Kathodenraum kurzzeitig eine Ruheklemmspannung von 180 mV gemessen, die innerhalb des Messzeitraums jedoch auf 77 mV sank.
Unter Einsatz von Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ stellte sich eine Spannung von bis zu 410 mV ein, die innerhalb des Messzeitraums nur geringfügig abnahm (Abb. 4.41, grün gestrichelt). Diese Konzentration entspricht der zu Beginn der Messung in der Anodenhalbzelle eingesetzten Glucose-Konzentration. Glucose ist in wässriger Lösung zwar löslich, bildet jedoch keine Ionen aus.[73] An der Leitung des elektrischen Stroms durch die Lösung ist sie folglich nicht beteiligt, bewirkt eher einen höheren Innenwiderstand, was die Zellleistung herabsetzt, wie aus den Messwerten für die Spannung ableitbar ist.

Unter Verwendung von Kaliumhexacyanoferrat-Lösung als Lösung im Kathodenraum wurden im Zwei-Topf-Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle die höchsten Spannungswerte bestimmt. Die Ausbildung des Potentials schien jedoch nur in geringem Maße mit der Stoffwechselaktivität der Hefe zusammenzuhängen. Mit Kalilauge und Glucose-Lösung wurden aufeinander bezogen ähnlich hohe Spannungen gemessen.
Für den Einsatz im Schulversuch scheint Glucose-Lösung der Massenkonzentration $\omega = 10\,\%$ die geeignetste Wahl, da eine geringere Gefahr als von Kalilauge ausgeht. Zudem liegen dann - mit Ausnahme der Hefe - in Anoden- und Kathodenhalbzelle gleiche Lösungen vor, was die Ausbildung einer Spannung durch die Stoffwechselaktivität der Hefe didaktisch prägnanter gestaltet. Zusätzlich ist eine didaktische Anschlussfähigkeit an das Thema *Konzentrationszellen* somit gegeben.

#### 4.4.3.7. Variation des Glucose-Gehaltes der Lösungen im Anoden- und Kathodenraum

Nachdem experimentell bestätigt wurde, dass die Verwendung gleich konzentrierter Glucose-Lösungen in Anoden- und Kathodenhalbzelle zum Betrieb einer Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau geeignet ist, wurde die Glucose-Konzentration zur Optimierung variiert. Dazu wurden Massenanteile an Glucose zwischen $\omega = 1\,\%$ und $\omega = 15\,\%$ eingesetzt. Zur Messung wurde der Aufbau ohne exogene Mediatoren, Toilettenpapier ohne zusätzlichen Elektrolyt als Brücke und Eisen-Nägeln als Elektroden genutzt. Unmittelbar nach Einbringen der Bäckerhefe in den Anodenraum wurde die Messung begonnen. Es zeigte sich kein proportionaler Zusammenhang

zwischen der Glucose-Konzentration und der gemessenen Zellspannung (vgl. Abb. 4.42). Vielmehr fiel auf, dass bei den geringen Massenanteilen von $\omega = 1\,\%$ und $\omega = 2.5\,\%$ und dem hohen Anteil von $\omega = 15\,\%$ zunächst deutlich negative Spannungen gemessen wurden, die jedoch im Verlauf der Messzeit positive Werte annahmen. Bei hoher Verfügbarkeit an Glucose setzt der Crabtree-Effekt ein, die Zellatmung

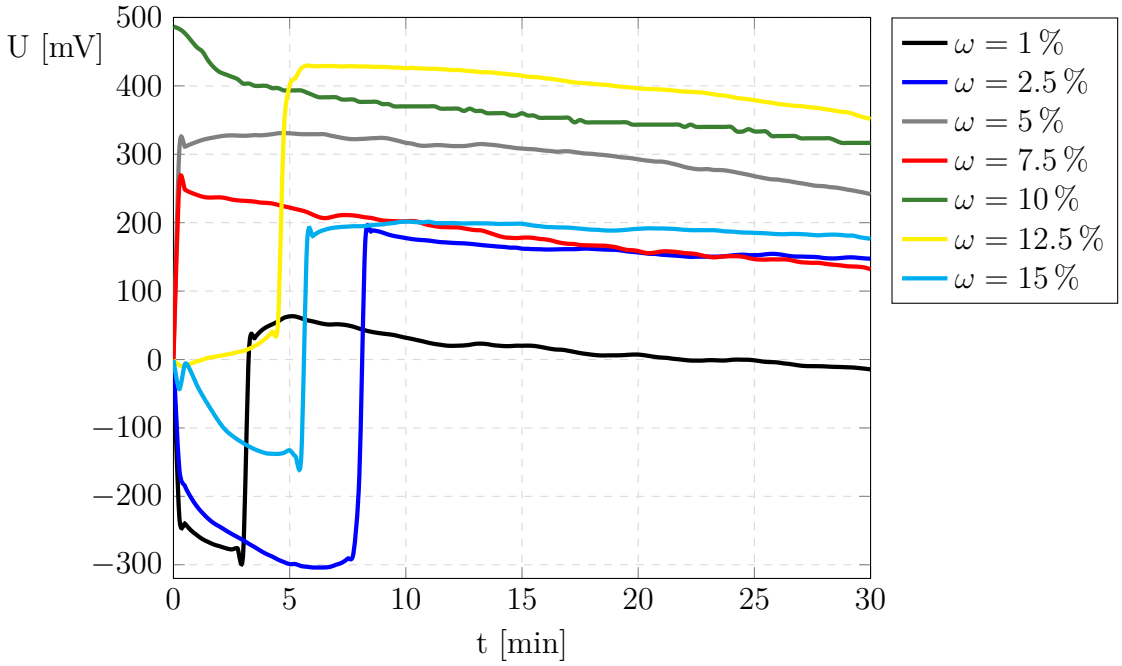



Abbildung 4.42: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit des Massenanteils Glucose in Lösung. T = 22 °C.

wird unterdrückt und stattdessen die weniger energieeffiziente Gärung betrieben (vgl. Abschnitt 4.4.1).[80] Extreme Glucose-Konzentrationen nehmen weiterhin Einfluss auf Stoffwechselpfade und somit die Metaboliten des katabolen Stoffwechsels. So wurde beispielsweise nachgewiesen, dass *Saccharomyces cerevisia* bei einer Massenkonzentration an Glucose von 320 $\frac{g}{L}$ einen deutlich erhöhten Anteil an Essigsäure bildet.[97]

Wenngleich die genauen Effekte der Glucose-Konzentration auf den Metabolismus der Bäckerhefe und somit auf die messbare Spannung nicht exakt aufgeklärt worden sind, kann anhand der erfolgten Messungen qualitativ festgehalten werden, dass ein Massenanteil an Glucose von $\omega = 10\,\%$ am besten für die Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau geeignet ist. Es stellte sich unmittelbar eine Spannung von bis zu 500 mV ein, die im Verlauf der Messzeit auf 320 mV sank, wohingegen die Einstellung der über die Messzeit betrachtet leicht höheren Spannung ($U_{max} = 430$) bei $\omega = 12.5\,\%$ beinahe 5 min in Anspruch nahm.

#### 4.4.3.8. Veränderung des pH-Wertes im Anodenraum

Angelehnt an Almer und Gerl [96] wurde in den eigenen Messreihen vom Einsatz eines Puffers abgesehen, auch um das fachliche Erschließen des Versuches für Lernende so einfach wie möglich zu gestalten. Um diese Entscheidung für einen Schulversuch zu legitimieren, der üblicherweise im Zeitfenster unter 30 min durchgeführt wird, wurde der pH-Wert in der Hefe-Suspension über einen Zeitraum von 30 min gemessen. Dazu wurde die Hefe-Brennstoffzelle gewählt, deren Anoden- und Kathodenraum mit Glucose-Lösung der Massenkonzentration $\omega = 10\,\%$ gefüllt sind, in die jeweils Eisen-Nägel hineinragen und über ein gerolltes Blatt Toilettenpapier ohne zusätzlichen Elektrolyt verbunden sind. In den Anodenraum wurde Bäckerhefe eingebracht und in Folge die Messreihe begonnen. Wie erwartet sank der pH-Wert im Verlauf der Zeit durch die Stoffwechselaktivität der Hefe ab. Wie jedoch in Abbildung 4.43 deutlich wird, lag erst nach etwa 10 min ein pH-Wert unterhalb des Wachstumsbereiches vor. Der für Bäckerhefe letale pH-Bereich wurde im Laufe der 30 min Messzeit nicht erreicht.

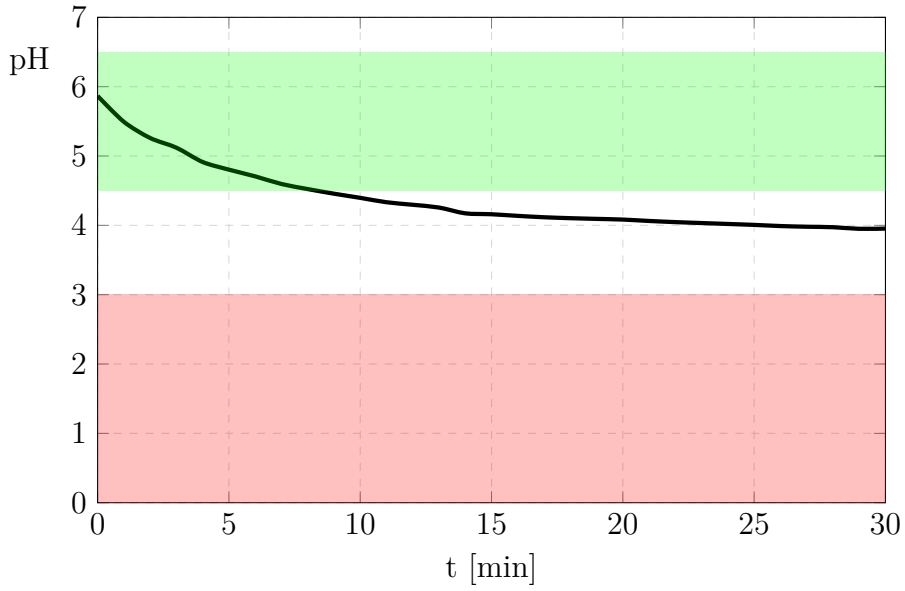



Abbildung 4.43: Veränderung des pH-Wertes in der Anodenhalbzelle der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau. Wachstumsbereich grün, letaler Bereich rot; Zuordnung nach Walker [80, S. 483]. T = 22 °C.

Die Potentiale werden abhängig vom pH-Wert ausgebildet, sodass davon auszugehen ist, dass im Verlauf der Messung auch auf den verändernden pH-Wert zurückzuführende Spannungsänderungen auftreten. Da jedoch insgesamt in dem Schulversuch ein für Lernende plausibler Spannungsverlauf gemessen werden kann

und das für die Bäckerhefe letale Milieu nicht erreicht wird, wird die Verwendung eines pH-Puffers in diesem Schulversuch als verzichtbar betrachtet.

#### 4.4.3.9. Variation des Substrates

Die Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* ist ein chemoorganotropher Organismus, der auf verschiedenen, organischen Substraten wachsen kann. Etwa ist für die Kohlenhydrate Glucose, Fructose, Mannose, Galactose, Saccharose und Maltose das Wachstum bestätigt.[80] Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Vergleich des Einsatzes der Monosaccharide Glucose und Fructose sowie des Disaccharids Saccharose, dessen Moleküle aus einem Glucose- und einem Fructose-Monomer bestehen, auf die Zellleistung einer Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau angestrebt. Zur Messung wurde der Aufbau ohne exogene Mediatoren, Toilettenpapier ohne zusätzlichen Elektrolyt als Brücke und Eisen-Nägeln als Elektroden genutzt. Eine Lösung mit $\omega = 10\,\%$ des jeweiligen Saccharids kam als Anoden- und Kathoden-Lösung zum Einsatz, wobei im Anodenraum zusätzlich die Bäckerhefe eingebracht und im Anschluss direkt die Messung begonnen wurde.
Bei Verwendung der drei genannten Kohlenhydrate in der Hefe-Brennstoffzelle war jeweils eine Spannung messbar, siehe Abbildung 4.44.

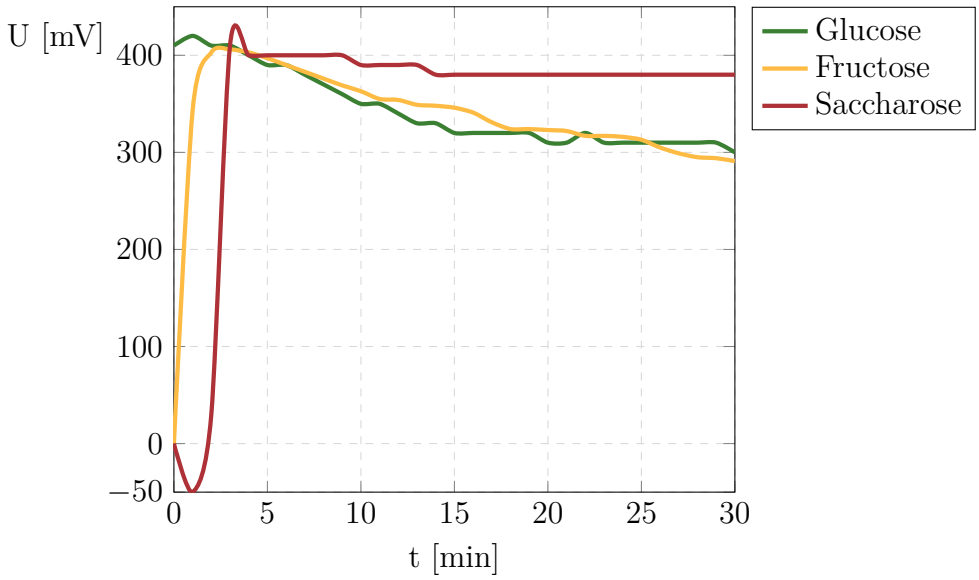



Abbildung 4.44: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit des eingesetzten Substrates. T = 21 °C.

Die unter Einsatz von Glucose gemessene Zellspannung lag unmittelbar an und war zu Beginn etwas höher als die unter Nutzung von Fructose sowie Saccharose gemessene. Sowohl bei Verwendung von Fructose als auch Saccharose verzögerte

sich die Potentialausbildung geringfügig. Der Effekt war für Saccharose deutlicher detektierbar.
Wird Saccharose in der Brennstoffzelle verwendet, hydrolysiert Bäckerhefe diese in einem vorausgehenden Stoffwechselschritt zu Glucose und Fructose, sodass die Zellspannung zunächst langsam ansteigt. Die Glucose wird von der Hefe priorisiert umgesetzt, Fructose erst nach Umsetzen der Glucose verstoffwechselt.[80] Da es für Fructose selbst keine abbauenden Stoffwechselwege in der Hefe gibt, wird dieser Zucker zunächst in einen Metaboliten der Glucose umgewandelt und schließlich in die Glykolyse eingespeist.[31]

Anhand der Nutzung verschiedener Substrat-Lösungen gleicher Massenanteile kann folglich im Schulversuch die Substrat-Priorisierung thematisiert werden.

#### 4.4.3.10. Einfluss des Lufteintrags in die Kathodenhalbzelle

In der Reduktionsreaktion wird Sauerstoff verbraucht. Daher wurde untersucht, welchen Einfluss das gepulste beziehungsweise kontinuierliche Einleiten von Umgebungsluft in die Kathodenhalbzelle mittels einer Pumpe auf die Spannung nimmt. Auf die Zufuhr reinen Sauerstoffs wurde verzichtet, weil dies nicht schulreal schien, wie in Kapitel 4.3.4 erläutert. Es wurde die Variante der Hefe-Brennstoffzelle gewählt, deren Lösungen im Anoden- und Kathodenraum aus Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ besteht, in die jeweils Eisen-Nägel hineinragen und über ein gerolltes Blatt Toilettenpapier ohne zusätzlichen Elektrolyt verbunden sind (vgl. Abb. 4.45).



Abbildung 4.45: Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei-Topf-Anordnung zur Messung des Einflusses kontinuierlicher Luftzufuhr.

Es wurde angenommen, dass Einleiten von Umgebungsluft und somit dem enthaltenen Sauerstoff die Reduktionsreaktion begünstigt und es zu einem Anstieg der

Zellleistung kommt. Tatsächlich spiegelte sich diese Annahme in der gemessenen Zellspannung wider, siehe Abbildung 4.46. Die Stromstärke konnte nicht bestimmt werden. Bei kontinuierlicher Zufuhr von Umgebungsluft in die Kathodenhalbzelle

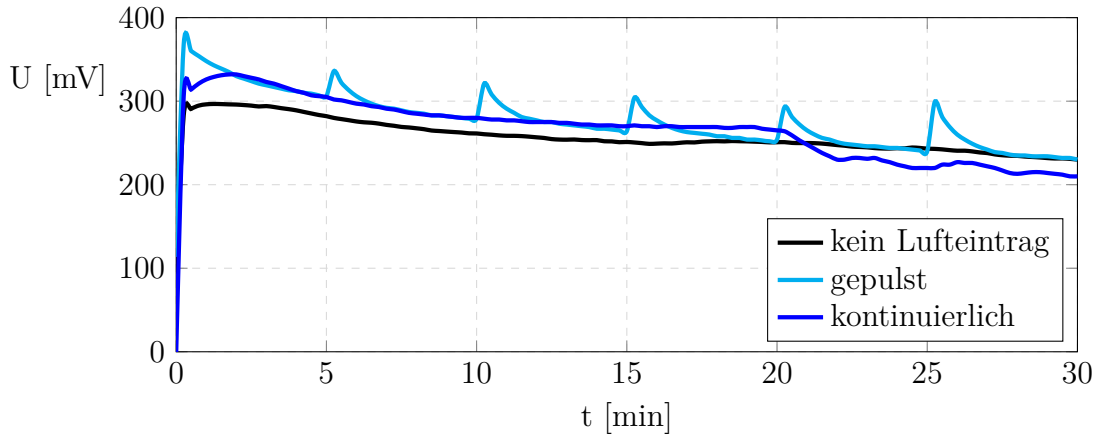


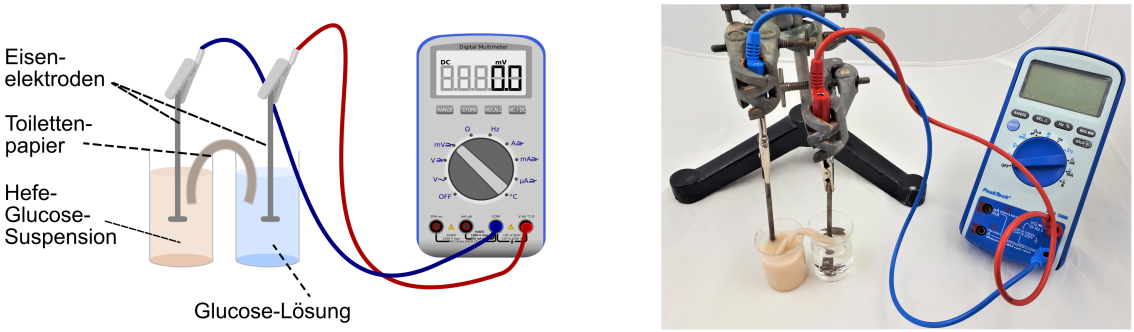

Abbildung 4.46: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der Luftzufuhr in den Kathodenraum. T = 21 °C.

ist gegenüber der Variante ohne Luftzufuhr eine leicht erhöhte Spannung messbar gewesen, die langsam sank und nach 22 min niedrigere Werte als der Vergleich annahm. Möglicherweise war die Glucose-Abbaurate unter Luftzufuhr erhöht, sodass die Glucose entsprechend schneller verbraucht war und infolge die Zellspannung sank. Einen eindeutigen und eindrucksvollen Effekt brachte das gepulste Einleiten von Umgebungsluft: Während dieses Einpulses stieg die Zellspannung an. Der Effekt konnte mehrfach wiederholt werden.

Der geringe Spannungsanstieg bei kontinuierlichem Einleiten von Umgebungsluft gegenüber der Vergleichsmessung rechtfertigt nicht den instrumentellen Aufwand, den dies für einen Schulversuch bedeuten würde. Jedoch kann ergänzend zum Aufbau ohne Luftzufuhr der Effekt von Umgebungsluft auf die Spannung durch Begünstigen der Reduktionsreaktion gut durch ein- oder mehrmaliges Einleiten über eine Spritze demonstriert werden.

#### 4.4.3.11. Zwischenfazit zur Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

Der zugrundeliegende Versuchsaufbau nach Silveira u. a. [91] wurde deutlich vereinfacht, vergleiche Abbildung 4.47. In dem Aufbau wurden weder Puffer noch exogene Mediatoren genutzt, eine gleich konzentrierte Glucose-Lösung in Anoden- und Kathodenhalbzelle verwendet, verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke und Eisen-Nägel als Elektroden eingesetzt. Die Materialien des vereinfachten Aufbaus sind alltagsnah, kostengünstig und weisen ein geringes Gefahrenpotential auf. Bei Betrieb der Hefe-Brennstoffzelle im vereinfachten Aufbau konnten unmittelbar Beobachtungen zur Funktionalität gemacht werden: In der Anodenhalbzelle war eine Schaumbildung als Indiz der Stoffwechselaktivität der Bäckerhefe sichtbar und eine deutliche Zellspannung war messbar. Die Zellspannung sank mit der Zeit etwas, was sowohl auf den leicht abnehmenden pH-Wert sowie den Rückgang verfügbarer Glucose in der Anoden-Halbzelle zurückzuführen ist.




(a) Schematische Ansicht (b) Realansicht

Abbildung 4.47: Vereinfachter Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei-Topf-Anordnung.

Die Messwerte unterlagen dabei geringfügigen Schwankungen, weil Bäckerhefe ein Mikroorganismus und als solcher temperaturabhängig ist. Weiterhin ist nicht auszuschließen, dass die Zellzahl bei gleicher Einwaage aufgrund von Qualitätsschwankungen der kommerziell erhältlichen Bäckerhefe variierte. Die Stromstärken der vermessenen Varianten der Zwei-Topf-Anordnung waren zu gering, um mithilfe des Pocket Cassy erfasst zu werden beziehungsweise einen Motor für kleine Ströme antreiben zu können. Aus diesem Grund konnten keine Zellleistungen ermittelt werden, sondern lediglich die gemessenen Spannungswerte als Diskussionsgrundlage herangezogen werden.
Im nachfolgenden Abschnitt wird daher dem Prinzip von der Zwei-Topf- zur kompakteren Zellanordnung im Ein-Topf-Aufbau mit dem Ziel untersucht, den Innenwiderstand zu verringern und die Zellleistung zu steigern.

### 4.4.4. Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau

Die zunächst in einer Zwei-Topf-Anordnung charakterisierte Hefe-Brennstoffzelle sollte auch in einer Ein-Topf-Anordnung realisiert werden, bei der Anoden- und Kathodenhalbzelle im gleichen Becherglas situiert und die Kompartimente nur durch eine Halbzellfassung der Anodenhalbzelle getrennt sind. Das Ziel war es, durch den kompakteren Aufbau die Zellleistung zu verbessern. Es ist zu erwarten, dass der Innenwiderstand verringert und die Potentialbildung durch die zunehmende Eintauchtiefe der Elektroden begünstigt wird.
Zusätzlich zu den im Zusammenhang mit dem Zwei-Topf-Aufbau angeführten Aspekten (Abschnitt 4.4.3) bestand die Intention der folgenden Messreihen darin,

- eine möglichst hohe Stromstärke zu erreichen, um die Funktionalität der Brennstoffzelle durch Betrieb eines Verbrauchers zu verdeutlichen.

Bennetto [81] stellte 1990 eine mikrobiellen Brennstoffzelle mit *Escherichia Coli* als Biokatalysator in einer Ein-Topf-Anordnung vor. Orientiert an diesem Aufbau wurden zunächst grundsätzlich Halbzellfassungen der Anodenhalbzelle variiert, bevor der Aufbau nach Bennetto [81] hinsichtlich des Einsatzes exogener Mediatoren und Reduktionsmitteln auf die Zellspannung nachvollzogen wurde. Anschließend wurde überprüft, ob auch in dieser Anordnung substratspezifische Effekte auf die Zellspannung detektierbar sind. Schließlich wurde die Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau mit dem Mikrocontroller *Arduino* verbunden, der zur Demonstration spannungsabhängiger Effekte genutzt werden sollte.

Wie bereits beschrieben gilt, dass die Aktivität von Mikroorganismen temperaturabhängig ist. Es wurden selbige Messprozedere eingehalten, die in Abschnitt 4.4.3 für die Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau angeführt wurden.
Der Abstand zwischen den Elektroden betrug jeweils 3 cm. Weiterhin wurden für alle Messungen dieselben Kabel verwendet.

#### 4.4.4.1. Variation der Halbzellfassung

Nach Bennetto [81] wird als Begrenzung des Anodenraums ein Dialysebeutel genutzt, der an der (Graphit-)Elektrode fixiert wird. Eine zusätzliche Elektrolyt-Brücke ist nicht notwendig. Da keine Dialysebeutel verfügbar waren, wurden Alternativen gesucht. Dialysebeutel bestehen aus Cellulose verschiedener Porengröße, sodass auch schulübliche beziehungsweise alltagsnahe Materialien aus Cellulose erprobt werden konnten. Es wurde ein Aufbau ohne exogene Mediatoren und mit Eisen-Nägeln als Elektroden gewählt, der mit Ausnahme der Zellgeometrie dem vereinfachten Aufbau

der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau entspricht (vgl. Abschnitt 4.4.3.11). Zunächst wurde der Aufbau mit einem Faltenfilter als Halbzellfassung realisiert (vgl. Abb. 4.48 (a)). Ein alternativ ausgewählter Kaffeefilter lies sich nicht an der Elektrode fixieren.



(a) Faltenfilter (b) Soxhlet-Hülse (c) Eierkarton-Hülse

Abbildung 4.48: Auswahl verwendeter Halbzellfassungen zur Realisierung der Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung.

Unter Verwendung des Faltenfilters konnte eine Zellspannung ($U_{max} = 200\,\text{mV}$) gemessen werden (Abb. 4.49, schwarz). Nach wenigen Minuten blähte sich jedoch aufgrund der Schaumbildung der Faltenfilter auf, Hefe-Schaum trat oben aus dem Filter aus, sodass Schlieren der Hefe in der Lösung sichtbar war. Die Spannung sank im Verlauf der Messzeit auf 120 mV. Eine mögliche Erklärung ist zum einen, dass durch den Verschluss des Faltenfilters zur Fixierung der Kontakt mit Umgebungsluft eingeschränkt wird und hinsichtlich des Hefe-Metabolismus die Gärung gegenüber der Atmung bevorzugt wird. Zusätzlich tritt Hefe-Suspension in die eigentliche Kathoden-Lösung über, wodurch die Halbzelltrennung aufgehoben wird. Diese Halbzelltrennung ist zum Betrieb der Hefe-Brennstoffzelle notwendig, wie experimentell anhand der Spannungsmessung bestätigt wurde (Abb. 4.49, cyan).

Zur Weiterentwicklung des Experiments wurden becherförmige Materialien größerer Schichtdicke aus Cellulose erprobt, weil darin ein Gasaustausch an der Oberfläche der Suspension stattfinden kann. Zunächst wurde eine Soxhlet-Extraktions-Hülse (Soxhlet-Hülse) als laborübliches Material und schließlich eine Eierkarton-Hülse als lowcost Material aus dem Alltag genutzt (vgl. 4.48 (b), (c)). Unter Einsatz beider Komponenten ergab sich zu Beginn der Messung eine deutlich höhere Zellspannung gegenüber dem Aufbau mit Faltenfilter (Abb. 4.49). Die Spannung sank insbesondere unter Verwendung der Eierkarton-Hülse nur geringfügig im Verlauf der Messzeit. Eine deutliche Schaumbildung war in beiden becherförmigen Komponenten sichtbar. Der Schaum trat jedoch nicht über den Rand der Begrenzung. Da die Lösung im

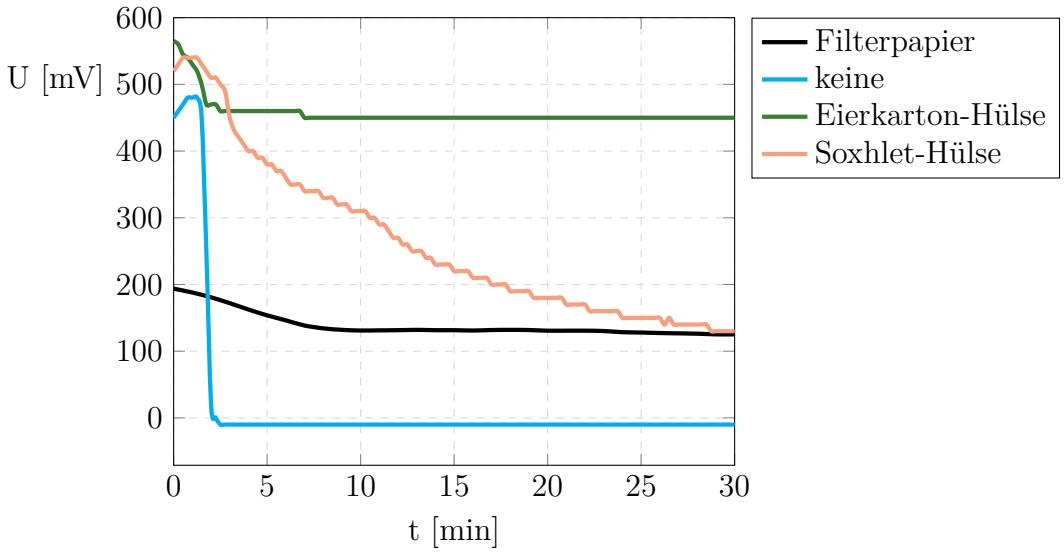



Abbildung 4.49: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der Halbzellfassung. T = 22 °C.

Kathodenraum nicht eintrübte, schienen beide Materialien nur in geringem Maße permeabel für die Hefe-Zellen zu sein, sodass die Halbzellseparation augenscheinlich im Messzeitraum nicht aufgehoben wurde.
Soxhlet-Hülsen bestehen aus Cellulose und sind im Laborbedarf erhältlich, wohingegen Eierkarton-Hülsen aus Pappe als Bestandteil von Lebensmittelverpackungen kostenfrei in großer Anzahl erhältlich sind [8].
Die Vorteile einer becherförmigen Halbzellfassung, die seitlich am Becherglas befestigt wurde, überwogen deutlich gegenüber einer beutelartigen Fassung, die an der Anode selbst fixiert wurde. Zudem war die unter Verwendung einer Eierkarton-Hülse gemessene Spannung höher als die Vergleichswerte und nahm auch geringer ab.

Da Eierkartons sehr kostengünstige Alltagsmaterialien sind, wurden diese als Halbzellfassung in nachfolgenden Messreihen zur Optimierung des Schulversuchs zur Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung genutzt.

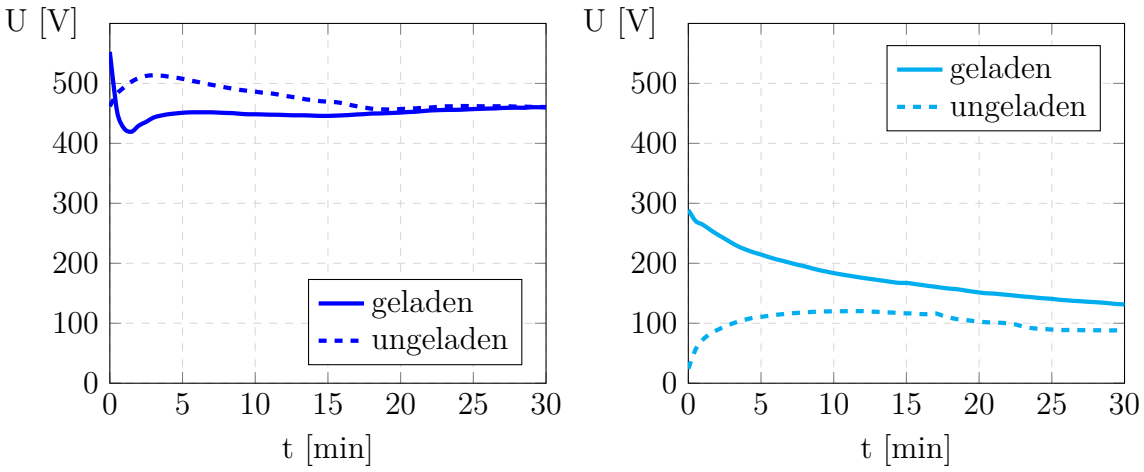
#### 4.4.4.2. Versuchsanordnung nach Bennetto [81]

Im Ein-Topf-Aufbau der mikrobiellen Brennstoffzelle nach Bennetto [81] ist vorgesehen, die Mikroorganismus-Suspension im Anodenraum mit Methylenblau als exogenen Mediator zu versetzen und eine Kaliumhexacyanoferrat-Lösung im Kathodenraum vorzulegen. Erst nach Entfärben der Mikroorganismus-Mediator-Suspension („Laden“) wird diese in den Anodenraum gegeben und die Zellspannung bestimmt.

[8] Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur farblose, nicht ersichtlich gefärbte Kartons genutzt.

Die detaillierte Versuchsvorschrift befindet sich in Abschnitt B.3.4.3.
Im Rahmen dieser Arbeit wurde unter Verwendung von Bäckerhefe als Mikroorganismus und Eierkarton-Hülsen als Halbzellfassung untersucht, welchen Effekt das Laden auf die Spannung der Zelle bei Verwendung von Kaliumhexacyanoferrat-Lösung beziehungsweise von Glucose-Lösung gleicher Konzentration im Kathodenraum aufweist.

Das „Laden“ nahm in beiden Fällen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf der gemessenen Spannung, wie aus Abbildung 4.50 hervorgeht. Unter Verwendung von




(a) Kaliumhexacyanoferrat-Lösung (b) Glucose-Lösung

Abbildung 4.50: In Anlehnung an Bennetto [81] durchgeführte Spannungsmessung einer Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau, unterteilt nach der im Kathodenraum verwendeten Lösung. T = 23 °C.

Kaliumhexacyanoferrat-Lösung im Kathodenraum wurde durch „Laden“ der Hefe-Suspension innerhalb weniger Minuten ein Spannungsmaximum von $U_{max} = 515\,\text{mV}$ erreicht, ehe sich nach etwa 20 min Messzeit eine Spannung von 460 mV einstellte, die bis zum Ende der Messung recht konstant blieb. Bei Verwendung der „ungeladenen“ Hefe-Suspension wurde unmittelbar zu Beginn ein Spannungsmaximum von $U_{max} = 550\,\text{mV}$ gemessen. Die Spannung sank zunächst auf 420 mV ab, ehe sie über den Messzeitraum bis auf 460 mV anstieg. Binnen der ersten 20 min unterschieden sich die Varianten hinsichtlich der Spannung deutlich, ehe sich diese annähernd anglich. Eine Erklärungsmöglichkeit wäre, dass nach dem „Laden“ die im Leukomethylenblau gespeicherten Elektronen vorausgehender Stoffwechselprozesse der Hefe kontinuierlich (über intermolekularen Transport von MB zu MB) an die Elektrode abgegeben werden kann. Werden schneller Elektronen des Leukomethylenblaus an die Anode abgegeben, als Methylenblau zu Leukomethylenblau reduziert wird, sinkt die Spannung. Mit dieser sinkenden Spannung ging eine leichte Blaufärbung der Suspension einher.

Dagegen könnten im „ungeladenen“ Zustand zunächst lokal Elektronen direkt aus den Hefe-Zellen oder nach kurzer Zeit von Leukomethylenblau auf die Elektrode übertragen werden, sodass es zu einem kurzzeitigen Spannungsmaximum kommen könnte. Im Verlauf stieg die Spannung an, da über die Redox-Mediator-Moleküle auch die nicht im unmittelbaren Umfeld der Elektrode freigesetzten Elektronen auf die Elektrode übertragen wurden und an der Potentialbildung beteiligt waren.

Unter Verwendung einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ im Kathodenraum wurden insgesamt niedrigere Spannungen erreicht, die Spannungsverläufe unterschieden sich leicht von denen der Verwendung von Kaliumhexacyanoferrat-Lösung. Zu Beginn der Messung betrug die Spannung der „geladenen“ Variante 290 mV und sank innerhalb des Messzeitraums bis auf 131 mV. In der „ungeladenen“ Variante erreichte die Spannung nach 10 min einen Maximalwert von 120 mV, ehe sie sich im Verlauf der dreißigminütigen Messzeit auf 90 mV verringerte. Die in der Ein-Topf-Anordnung gemessenen Spannungswerte unter Einsatz von Methylenblau als exogenen Mediator gegen Glucose-Lösung waren höher, als die der entsprechenden Zwei-Topf-Anordnung (Kapitel 4.4.3.2). Die veränderte Zellgeometrie scheint die Zellleistung zu begünstigen.

Die im Kathodenraum verwendete Lösung hat Auswirkung auf die Höhe und den Verlauf der sich ausbildenden Spannung. Unter Verwendung von Kaliumhexacyanoferrat-Lösung wurden höhere Spannungen erreicht. Die exakt ablaufenden Prozesse sind jedoch nicht zu benennen. Der Einsatz im didaktischen Kontext nicht angeraten (vgl. Abs. 4.4.3.1).
Da das „Laden“ einige Minuten Zeit in Anspruch nimmt und entgegen des eigentlich im Fokus stehenden Funktionsprinzips der Brennstoffzelle ein Akkumulatoren ähnliches System suggeriert, erscheint dieser Schritt didaktisch nicht zielführend.

Wie im vorherigen Absatz anhand der Zwei-Topf-Anordnung vorgestellt, konnte ohne Zusatz exogener Mediatoren und bei Einsatz von Eisen-Nägeln als Elektroden eine höhere Zellspannung gemessen werden, weswegen dieser vereinfachte Aufbau weiterhin für nachfolgende Messreihen verwendet wird.

#### 4.4.4.3. Variation des Substrats

In dieser Versuchsreihe wurde überprüft, ob in der Ein-Topf-Anordnung der Hefe-Brennstoffzelle ähnlich wie in der Zwei-Topf-Anordnung ein Effekt des eingesetzten Substrats auf die Zellspannung ersichtlich ist (vgl. Abschnitt 4.4.3.9).
Wie zuvor wurde ein Aufbau ohne exogene Mediatoren, Eierkarton als Halbzellfassung und Eisen-Nägeln als Elektroden genutzt. Eine Lösung mit $\omega = 10\,\%$ des jeweiligen Saccharids kam als Anoden- und Kathoden-Lösung zum Einsatz.

Bei Verwendung von Glucose, Fructose sowie Saccharose in der Hefe-Brennstoffzelle war jeweils eine Spannung messbar, siehe Abbildung 4.51.

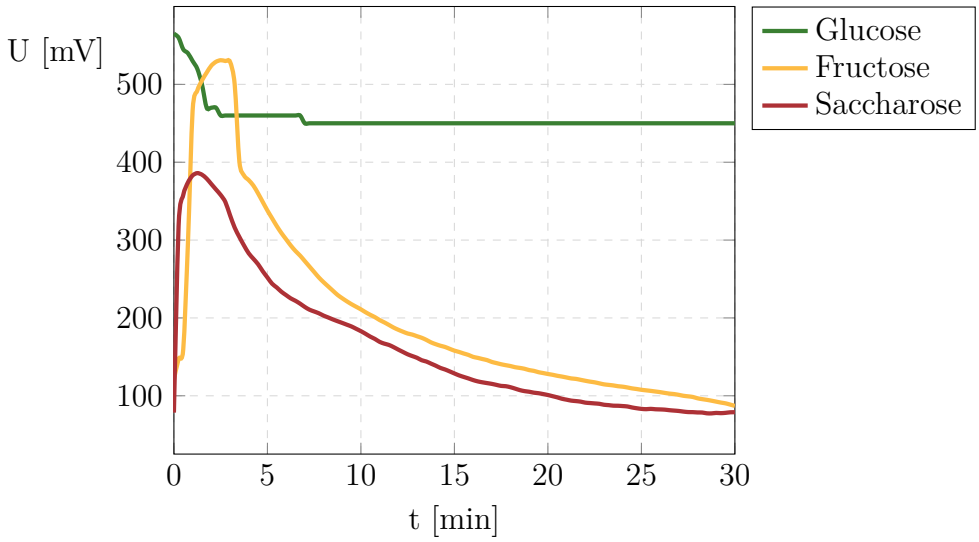



Abbildung 4.51: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau in Abhängigkeit des Substrates. T = 21 °C.

Die Verläufe der Zellspannungen unterschieden sich je nach eingesetztem Substrat. Unter Verwendung von Glucose wurde die unmittelbare die höchste Zellspannung ($U_{max} = 565\,\mathrm{mV}$) erreicht, die sich im Verlauf der Messung kontinuierlich bei 450 mV einstellte. Sowohl bei Nutzung von Fructose als auch Saccharose stieg die Zellspannung zunächst an, ehe sie im Verlauf der Messung auf unter 100 mV sank. Mögliche Ursachen für diese Spannungsverläufe wurden in Abschnitt 4.4.3.9 bereits dargelegt und können auch hier geltend gemacht werden.

Auch in der Ein-Topf-Anordnung der Hefe-Brennstoffzelle kann der Effekt verschiedener Substrate auf die mit dem Metabolismus der Hefe verbundenen Spannung demonstriert werden.

#### 4.4.4.4. Kopplung mit dem Mikrocontroller *Arduino*

Da in allen untersuchten Varianten die Stromstärke zu gering war, um einen sensiblen Motor zu betreiben, wurde der Mikrocontroller *Arduino* mit der Hefe-Brennstoffzellen gekoppelt: Bei Erreichen von individuell definierten Schwellspannungen kann der Betrieb diesen alternativen Geräts durch Zuschalten von LEDs visualisiert werden. Der eigentliche *Arduino* besteht aus einem Mikrocontroller und einer Steckplatte, sodass ein Programm geschrieben (vgl. Abb. 4.52) und die Steckplatte entsprechend bestückt werden musste (vgl. Abb. 4.53):
Zunächst wurde am Computer in der Programmiersprache C mithilfe der Software Arduino 1.8.10 ein Programm geschrieben, dass je nach Höhe der gemessenen Spannung unterschiedlich viele LED einschaltet. Die Zellspannung eines anderen Systems - zum Beispiel einer biologischen Brennstoffzelle - wird gemessen und ab einer Zellspannung von 300 mV wird eine LED eingeschaltet, ab 400 mV eine zweite LED und ab 500 mV auch die dritte LED.
Im Programm wird die Position des Sensors als *A0* gekennzeichnet. Als weitere

```
const int PIN_TEST = A0;
const float baselineVolt = 290;


void setup() {
  Serial.begin(9600);
  for (int pinNumber = 2; pinNumber < 5; pinNumber++) {
    pinMode(pinNumber, OUTPUT);
    digitalWrite(pinNumber, LOW);
  }
}

void loop() {
  int sensorVal = analogRead((PIN_TEST));
  Serial.print(",Sensormesswert");
  Serial.print(sensorVal);
  float voltage = (sensorVal );
  Serial.print(",Spannung in mV");
  Serial.print(voltage);

  if (voltage < baselineVolt) {
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
  } else if (voltage >= baselineVolt + 10 && voltage < baselineVolt + 110) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, LOW);
    digitalWrite(4, LOW);
  } else if (voltage >= baselineVolt + 110 && voltage < baselineVolt + 210) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, LOW);
  } else if (voltage >= baselineVolt + 210) {
    digitalWrite(2, HIGH);
    digitalWrite(3, HIGH);
    digitalWrite(4, HIGH);
  }
  delay(1);
}
```

Abbildung 4.52: Programm zum Zuschalten der LED in Abhängigkeit der gemessenen Spannung.

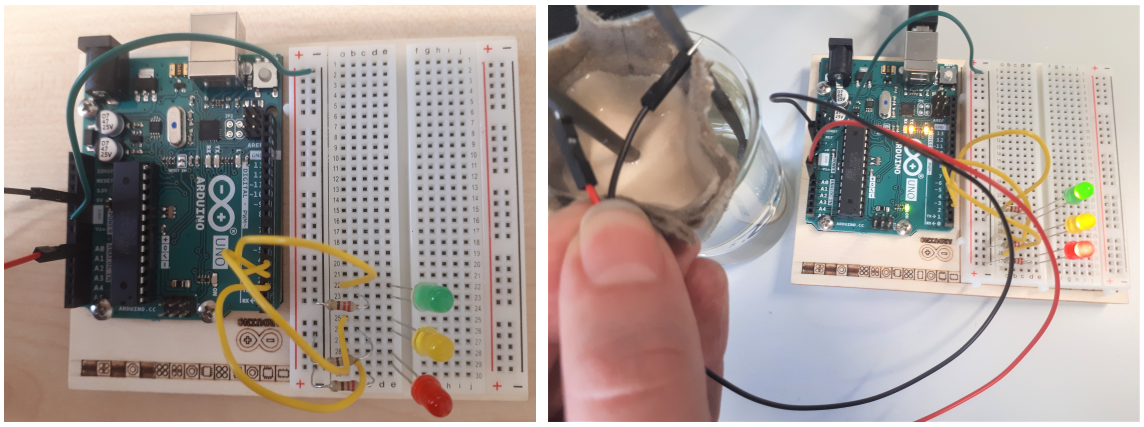
Konstante wird eine Grundspannung (*baselineVolt*) von 290 mV benannt.
Als einmal zu durchlaufende Vorgabe (*void setup*) ist die Schnittstelle zwischen dem Mikrocontroller und dem Computer formuliert. Darin ist festgelegt, dass Arduino und Computer in einer Geschwindigkeit von 9600 Bits pro Sekunde kommunizieren. In der for-Schleife ist vorgegeben, dass die Pins (Ausgänge) zwei bis vier durchlaufen werden sollen. Der *pinMode* ist als *OUTPUT* benannt, da die Ausgänge mit den LEDs versehen sind, die einschaltet werden sollen. Der Befehl *digitalWrite* mit dem Zusatz *LOW* bewirkt, dass der Pin auf eine Betriebsspannung von 0 V gesetzt wird, sofern kein gegenteiliger Befehl vorliegt.
Als mehrfach zu durchlaufende Vorgabe (*void loop*) wird die eigentliche Messung sowie das Zuschalten der LEDs angelegt. Der Messwert (*sensorVal*) wird als analoger Wert ausgelesen und über den Befehl *Serial.print* an den Computer übertragen. Argumente in Anführungszeichen werden als Überschriften angezeigt, die Variablen als Werte [9].

In den *if-Schleifen* ist zunächst festgelegt, dass bei einer Spannung unterhalb der Grundspannung keine der LEDs eingeschaltet wird. Weiterhin ist dort in *else if-Schleifen* festgelegt, dass zwischen 300 - 400 mV der Pin mit der Nummer 2 mit der Betriebsspannung des Systems versorgt wird (*HIGH*), sodass die erste LED leuchtet. In weiteren *else if-Schleifen* wird das Zuschalten der beiden weiteren LED bestimmt: Zwischen 400 - 500 mV werden die LEDs der Nummer 2 und 3 eingeschaltet, ab 500 mV auch die der Nummer 4. Der Befehl *delay* am Ende der *loop* regelt eine kleine Verzögerung des Ablesens, um dieses an die Geschwindigkeit des Analog-Digital-Konverters des *Arduino* anzupassen.
Nachdem das Programm über USB auf den Mikrocontroller übertragen wurde, wurde die Steckplatte entsprechend der Programmierung bestückt (vgl. Abb. 4.53).

Die Steckplatine wurde mit der Erdung verbunden, die Kathoden der verwendeten LEDs über einen 220-Ohm-Widerstand ebenfalls mit der Erdung. Die Anoden wurden an den Pins 2 bis 4 angeschlossen. In *AO* und den *Power-Zugang 5V* wurden Bananenkabel eingebracht, deren freie Enden als Kontakte zur Spannungsmessung genutzt wurden.

Bei Betrieb der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau wurden die Enden der Bananenkabel jeweils als Kontakt zu einem als Elektrode dienenden Eisen-Nagel verwendet. Da die Spannung über 500 mV betrug, leuchteten alle drei LEDs (Abb. 4.53). Die absoluten Messwerte konnten zusätzlich auf dem Computer unter Anwahl des *Seriellen Monitors* eingesehen und dokumentiert werden.

[9] Sensormesswert und Spannung in mV sind getrennt voneinander aufgeführt, weil je nach zu vermessendem System ein zusätzlicher Sensor genutzt werden kann und ein Umrechnungsfaktor vonnöten ist.



(a) Verwendeter Schaltkreis.

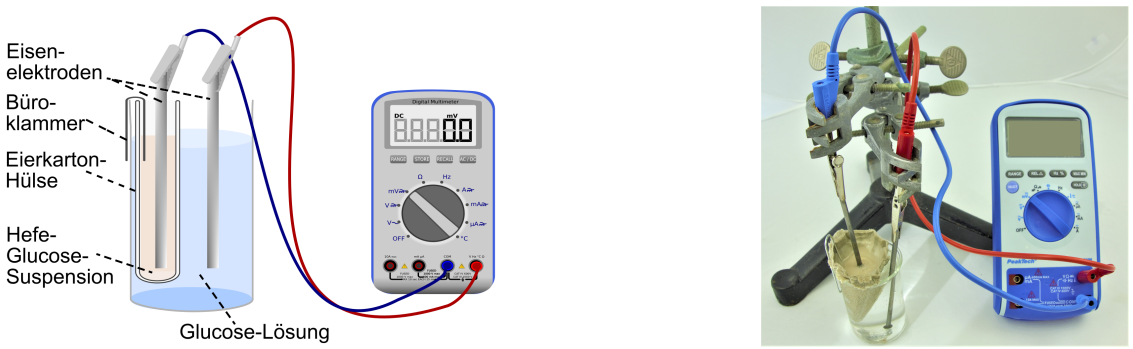
(b) Inbetriebnahme.

Abbildung 4.53: Visualisierung der Spannung in der Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung durch Zuschalten von LED.

Mithilfe des *Arduino* können auch weitere Funktionen, wie eine digitale Anzeige und akustische Signale, in einen Schulversuch integriert werden. Jede weitere Funktion bedingt eine komplexere Programmierung und einen entsprechenden Schaltkreis, sodass im Rahmen dieser Arbeit zunächst der Fokus auf die Visualisierung der Höhe der Spannung durch Lichtsignale gelegt wurde.

#### 4.4.4.5. Zwischenfazit zur Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau

Die Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung konnte mit kostengünstigen und alltagsnahen Materialien realisiert werden: Eine mit einer Büroklammer fixierte Eierkarton-Hülse diente als Halbzellfassung, Eisen-Nägel als Elektroden. Sowohl in Anoden- und Kathodenraum wurde eine Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ gegeben, wobei in den Anodenraum zusätzlich Hefe eingebracht wurde (siehe Abb. 4.54). Die




(a) Schematische Ansicht (b) Realansicht

Abbildung 4.54: Vereinfachter Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung.

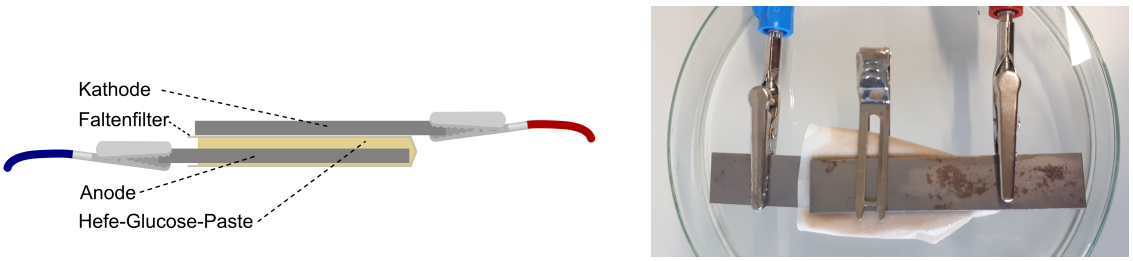
Notwendigkeit des Einsatzes des exogenen Redox-Mediators war auch in dieser Zellgeometrie nicht ersichtlich. Auch in dieser Zellgeometrie konnten substratspezifische Effekte auf die Zellleistung gemessen werden.
Da die Stromstärke in jeder vermessenen Variante gering war, wurde der Mikrocontroller Arduino mit der Brennstoffzelle gekoppelt. Bei entsprechender Programmierung schaltet dieser je nach Spannungsbereich unterschiedlich viele LED-Lämpchen ein, sodass auch bei sehr niedriger Stromstärke die Funktionalität der Brennstoffzelle zusätzlich zur Anzeige von Zahlenwerten auf einem Multimeter visualisiert werden kann. Durch die Nutzung des Mikrocontrollers können in einem Schulversuch neben Komponenten der Biologie (z.B. Mikroorganismen, Stoffwechselspezifika) und Chemie (z.B. Potentialbildung) durch die notwendige Programmierung auch Aspekte der Informatik vereint werden.

### 4.4.5. Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-Aufbau

Angelehnt an didaktische Gänge wie etwa „Vom galvanischen Element zur Solarzelle“ von Bohrmann [88], bei dem ausgehend von einem galvanischen Element im Zwei-Topf-Aufbau photogalvanische Elemente in eben diesem und zur Leistungssteigerung auch in zunehmend kompakten Anordnungen realisiert worden sind, wurde der Versuch unternommen, eine Hefe-Brennstoffzelle in einem Kompakt-Aufbau zu betreiben. Durch einen zunehmend kompakten Aufbau wurde ein geringerer Innenwiderstand und damit verbunden eine höhere Zellleistung erhofft.
Die Intention der Messungen bestand darin,

- zu überprüfen, ob eine Hefe-Brennstoffzelle in einer kompakten Anordnung betrieben werden kann.
- durch den kompakteren Aufbau eine höhere Zellleistung zu erreichen.

Dazu wurde zunächst der in Abbildung 4.55 skizzierte Aufbau realisiert und vergleichend mit verschiedenen Elektrodenmaterialien vermessen, ehe ein an Ge u. a. [98] orientierter Stapelaufbau umgesetzt wurde.




(a) Schematisch

(b) Realansicht, Eisenbleche als Elektroden

Abbildung 4.55: Möglicher Kompaktaufbau der Hefe-Brennstoffzelle.

Hinsichtlich der Reproduzierbarkeit wurden selbige Maßnahmen wie bei Vermessung der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei- und Ein-Topf-Anordnung getroffen.

#### 4.4.5.1. Variation der Elektroden

Da aus vorangegangenen Versuchsreihen zur Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau bekannt war, dass Faltenfilter grundsätzlich zum Halten/Fassen der Hefe-Suspension geeignet sind, wurde zunächst ein Faltenfilter als Anodenfassung und Membran genutzt. Um geeignete Elektroden zu identifizieren, wurden neben den bewährten Eisen(-blechen) auch Kohlenstoff-basierte Materialien erprobt. Die Wahl flacher

Komponenten ist dem angestrebten flachen Gesamtaufbau geschuldet, wohingegen die Materialien der Literatur entlehnt sind, da in der technischen Umsetzung kompakter MFC bislang in der Regel Metall- oder Kohlenstoffelektroden verwendet werden.[36] Sofern möglich, wurden die Elektroden an die Maße der Eisenbleche von 1x8 cm angepasst.
Es konnten für alle als Elektroden eingesetzten Komponenten Spannungen gemessen werden (Abb. 4.56). Dabei fiel auf, dass die Zellspannung bei luftdichten Komponenten deutlich niedriger als bei durchlässigen war. Die höchste Zellspannung wurde bei der Kombination eines Eisenbleches als Anode und eines Stück Edelstahlschwamm als Kathode gemessen. Der Edelstahlschwamm ist durch den Aufbau als Maschen luftdurchlässig. Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass in dem kompakten Aufbau die Ausbildung eines Dreiphasenraums mit Luftsauerstoff, Elektrode und Elektrolyt auf die Kanten der gewählten Elektroden beschränkt ist, sofern diese nicht gitterartig oder luftdurchlässig sind. Diese These wird dadurch gestützt, dass bei Verwendung eines Objektträgers als Fassung des Kompaktaufbaus keine nennenswerte Spannung ausgebildet wurde.

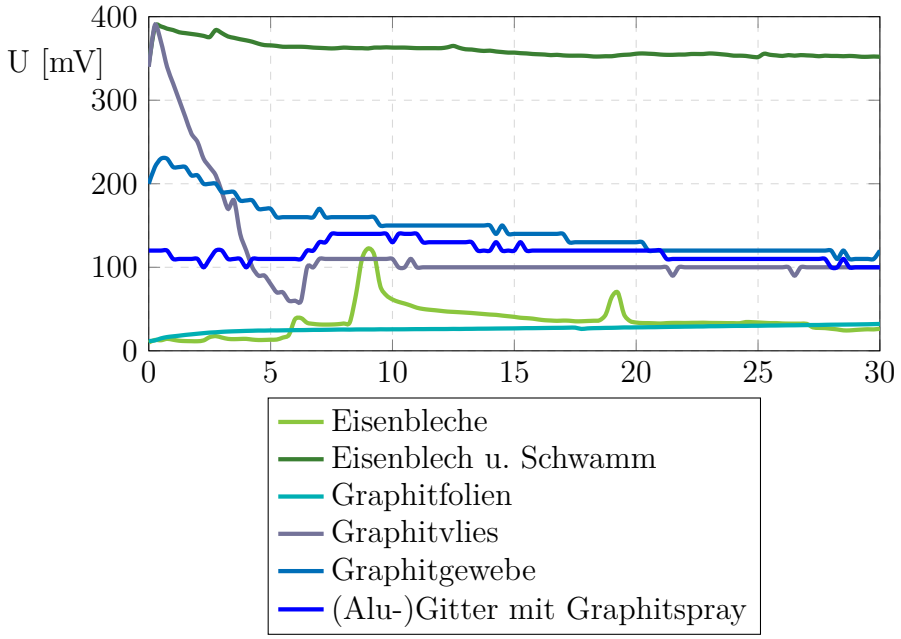



Abbildung 4.56: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Elektroden. T = 21 °C.

Damit ergab sich die Schwierigkeit, die Kathode auf dem Kompaktaufbau zu fixieren, ohne diesen luftdicht zu verschließen. Zusätzlich führte die Aktivität der Hefe dazu, dass Schaum aus dem Aufbau austrat. Der skizzierte Aufbau stellte daher keine Optimierung der in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Zellgeometrien da, zumal auch die Zellspannungen niedriger waren.

In Anlehnung an Versuche zur MFC mit Milchsäurebakterien und zur EFC wurde jedoch der Versuch unternommen, diesen Einschränkungen durch eine Realisation im Stapelaufbau unter Verwendung von Filterpapier-Elektroden zu begegnen, wie nachfolgend erläutert wird.

#### 4.4.5.2. Variation des Aufbaus

Da auch in der Forschung derzeit mit Kohlenstoff-Paste beschichtete Papierelektroden für den Einsatz in MFC erprobt werden,[36] schien die Überlegung naheliegend, den Stapelaufbau nach Ge u. a. [98] auch hinsichtlich des Elektrodenmaterials und nicht nur des Zusammenbaus zu adaptieren [10]. Bereits während des Trocknungsprozesses nach dem Auftragen trat eine Gasentwicklung auf den mit Hefe-Aktivkohle-Suspension beschichteten Filterpapierelektroden auf. Auch nach dem Stapeln des Aufbaus bei Betrieb der Brennstoffzelle war eine Gasentwicklung anhand austretenden Schaums ersichtlich. Diese ist mutmaßlich darauf zurückzuführen, dass in dem eingesetzten Trockenhefe-Granulat eine Kohlenstoffquelle enthalten ist. Es konnten zwar Spannungen gemessen werden, die jedoch kaum reproduzierbar waren. In Abbildung 4.57 sind daher drei Einzelmessungen aufgetragen, um zu verdeutlichen, wie sehr diese voneinander abwichen und die anliegenden Spannungen schwankten.

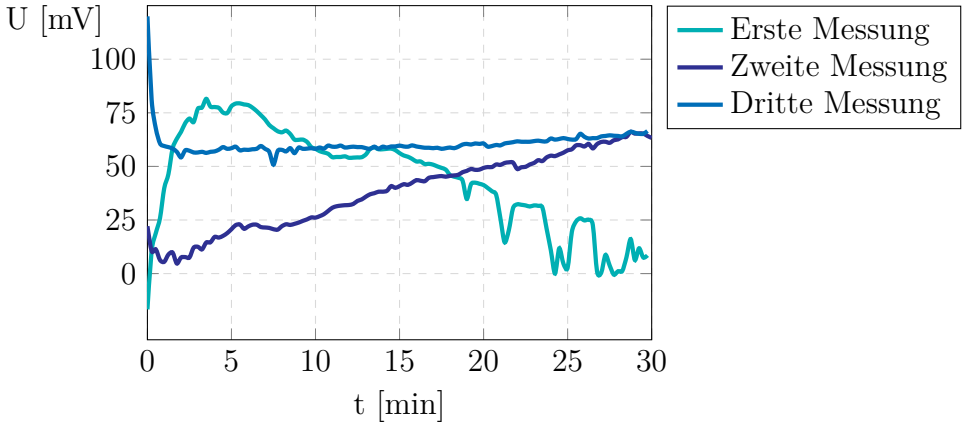



Abbildung 4.57: Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im kompakten Stapel-Aufbau. T = 21 °C.

Eine mögliche Erklärung besteht darin, dass in der Zellreaktion entstehende Gase schlecht einweichen konnten und während ihrer Anreicherung an der Elektrode einen negativen Effekt auf die Potentialausbildung hatten.

[10] Der Aufbau wird im Bereich der enzymatischen Brennstoffzelle in Kapitel 4.6 näher erläutert, die Durchführung findet sich in Kapitel B.

#### 4.4.5.3. Zwischenfazit zur Hefe-Brennstoffzelle im Kompaktaufbau

Da die gemessenen Zellspannungen in den erprobten Kompaktanordnungen der Hefe-Brennstoffzelle deutlich niedriger als in der Zwei- und Ein-Topf-Anordnung sowie nicht reproduzierbar waren und der Aufbau offenbar nicht für eine Reaktion unter Schaumbildung geeignet war, wurde der Ansatz zur Realisation einer Hefe-Brennstoffzelle im Kompaktaufbau für den Schulkontext verworfen.

## 4.5. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Milchsäure-Bakterien

Ergänzend zu den mikrobiellen Brennstoffzellen mit Bäckerhefe sollte ein Brennstoffzellsystem gefunden werden, das anstelle der Pilze als Biokatalysator mit Bakterien arbeitet. Dazu wurden Milchsäure-Bakterien erprobt, weil diese nicht als Gefahrstoff eingeordnet sind[78] und Milchsäure-Kulturen als Präparate in Kapseln in Drogerien erhältlich sind (Abb. 4.58 (a)). Zudem liegt ein hoher Alltagsbezug vor.
In den Kapseln sind laut Verpackungsaufschrift neben Glucose und Trennmitteln sowie Titandioxid als Farbstoff zweierlei verschiedene Milchsäure-Kulturen enthalten: *Lactobaccilus acidophilus*, LA-5® und *Bifidobacterium*, BB-12®. Das Präparat ist ein schwach lachsfarbenes Pulver (Abb. 4.58 (b)) und enthält gemäß Verpackungsaufschrift pro Kapsel eine Milliarde Lebendkulturen. Die stäbchenförmigen Bakterien sind im Mikroskop in der tausendfachen Vergrößerung schwach erkennbar (Abb. 4.58 (c)), da Bakterienzellen deutlich kleiner als eukaryotische Zellen sind. Daneben sind in dem heterogenen Präparat auch Zuckerkristalle und nicht eindeutig zuordenbare Komponenten sichtbar.




(a) Verpackung (b) Pulver (c) Wässrige Suspension

Abbildung 4.58: Ansichten des Milchsäure-Kulturen-Präparats.

Angelehnt an den Aufbau von Ge u. a. [98] für enzymatische Brennstoffzellen sollte daher eine Brennstoffzelle mit Milchsäure-Bakterien in der kompakten Stapelanordnung für den Einsatz im schulischen Kontext experimentell charakterisiert sowie weiterentwickelt werden.

Neben der Erfüllung bereits im Zusammenhang der mikrobiellen Brennstoffzellen mit Hefe angeführten schulpraktischen Kriterien (z.B. Abschnitt 4.4.3) bestand die Intention darin,

- Effekte einer Substrat-Priorisierung zu untersuchen.

- eine möglichst hohe auf die Stoffwechselaktivität der Milchsäure-Bakterien zurückführbare Zellspannung zu erreichen.
- zu überprüfen, ob durch Variation des Reservoir eine höhere Zellspannung erreicht und Brennstoff erneut appliziert werden kann.

Zunächst wurde durch vergleichenden Einsatz von Glucose, Lactose und handelsüblichen *Milchzucker* gleicher Konzentration als Substrat eine mögliche Substrat-Priorisierung untersucht. In anschließenden Messreihen wurde die Einwaage an Milchsäure-Kultur-Präparat und somit die Konzentration des Biokatalysators variiert, ehe das verwendete Tensid, die Elektrodenfläche und -beschichtung sowie das verwendete Reservoir verändert und die einhergehende Zellspannung vermessen wurde [11].

Da die Konzentrationen der Metaboliten in Mikroorganismen nicht exakt bekannt sind, kann auch an dieser Stelle kein konkreter Erwartungswert angegeben werden.[31] Die Bestrebungen der Versuchsreihe bestanden daher ebenfalls darin, eine möglichst hohe Zellspannung zu erreichen.

Weil die Aktivität von Mikroorganismen temperaturabhängig ist, wurden nur unter gleichen Bedingungen erfolgte Messungen zum Vergleich herangezogen. Das Temperaturoptimum von Milchsäure-Bakterien liegt im Bereich der Körpertemperatur von 37 °C.[99] Die bei den Messungen vorherrschende Raumtemperatur wird jeweils an den Messgraphen angegeben. Zunächst wurde zur Beschreibung der jeweiligen Varianten jeweils die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 30 min mit dem Messwerterfassungssystem „Pocket Cassy“ dreifach gemessen. Die Stromstärke wurde nach 10 min mit einem Digitalmultimeter vermessen, da sie zumeist außerhalb des Messbereiches des Pocket Cassy war. Die Berechnung eines Zellleistung war somit nur näherungsweise möglich, wie im Zwischenfazit in Tabelle 4.11 übersichtlich dargelegt. Bei allen Messungen wurden dieselben Kabel verwendet.

[11] Matthias Vieregge beschäftigte sich in seiner Bachelorarbeit, die im Rahmen dieser Promotionsarbeit betreut wurde, mit Mikrobiellen Brennstoffzellen mit Milchsäure-Bakterien. Die dort generierten Ergebnisse waren richtungsweisend für die hier dargestellten Messreihen.

### 4.5.1. Variation des Substrats

Obgleich im verwendeten Präparat bereits Glucose enthalten ist, wurde überprüft, ob ein substratspezifischer Effekt auf den Stoffwechsel der Milchsäure-Bakterien anhand der Spannung detektiert werden kann. Als Substrate wurden neben Glucose auch Lactose in Chemikalienqualität sowie *Milchzucker* aus einer Drogerie eingesetzt und eine Vergleichsmessung ohne Zusatz eines Substrats durchgeführt. Lactose beziehungsweise Milchzucker wurden gewählt, da Lactose als Abfallprodukt der Käserei seit Jahrzehnten als Substrat in mikrobiellen Brennstoffzellen mit *Kluyveromyces fragilis* als Biokatalysatoren eingesetzt wird[30,100] und somit ein authentisches Substrat ist.

Die in den Kapseln enthaltenen Bakterien der Gattung *Lactobaccilus acidophilus* betreiben *homofermentative Milchsäure-Gärung*, bei der Glucose zu mindestens 90 % zu Lactat umgesetzt werden[99][12]. Dagegen betreiben die Bifidobakterien *heterofermentative Gärung*, bei der neben Lactat auch Actetat, Ethanol und Kohlenstoffdioxid gebildet werden. Die Ursache liegt darin, dass Glucose in diesen Mikroorganismen nicht über Glykolyse, sondern über den Pentose-Phosphat-Weg abgebaut wird.[32]

Wird Lactose als Substrat eingesetzt, wird diese zunächst enzymatisch mit $\beta$-Galactosidase in Galactose und Glucose umgesetzt. Die beiden Monosaccharide werden in den Pentose-Phosphat-Weg eingespeist, wobei die freigesetzte Glucose schneller als die Galactose umgesetzt wird. Wird als Substrat Glucose eingesetzt, verläuft der katabole Stoffwechsel insgesamt schneller.[101]

In den Messreihen wird die MFC als Stapelanordnung realisiert (Abb. 4.59), ähnlich wie es im Kompaktaufbau der MFC mit Bäckerhefe intendiert war. Filterpapier stellt

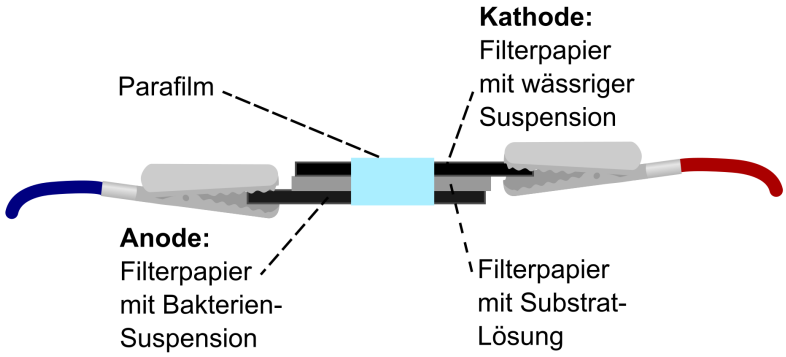



Abbildung 4.59: Stapelaufbau einer mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Bakterien.

dabei die Grundlage der Elektroden und des Reservoirs: Die Anode ist mit einer

[12] Als Produkte der homofermentativen Milchsäure-Gärung entstehen Lactat und Protonen. Da diese im Verhältnis 1:1 gebildet werden, ist der Ausdruck geläufig, es würde *Milchsäure* gebildet.

wässrigen Suspension aus Aktivkohle, Natriumlaurylsulfat und Milchsäure-Kulturen-Präparat beschichtet; die Kathode abzüglich der Milchsäure-Kulturen identisch. Das als Reservoir dienende, mittig situierte, Filterpapier wird vor Zusammenbau der MFC in einer übersättigten Substrat-Lösung getränkt. Die Einwaage an Milchsäure-Kulturen-Präparat betrug jeweils 100 mg pro drei Brennstoffzellen-Aufbauten, die detaillierte Durchführung ist im Anhang B aufgeführt.

Bei Verwendung der drei gewählten Substrate konnte jeweils die Brennstoffzelle betrieben und eine Spannung gemessen werden, wie in Abbildung 4.60 dargestellt.

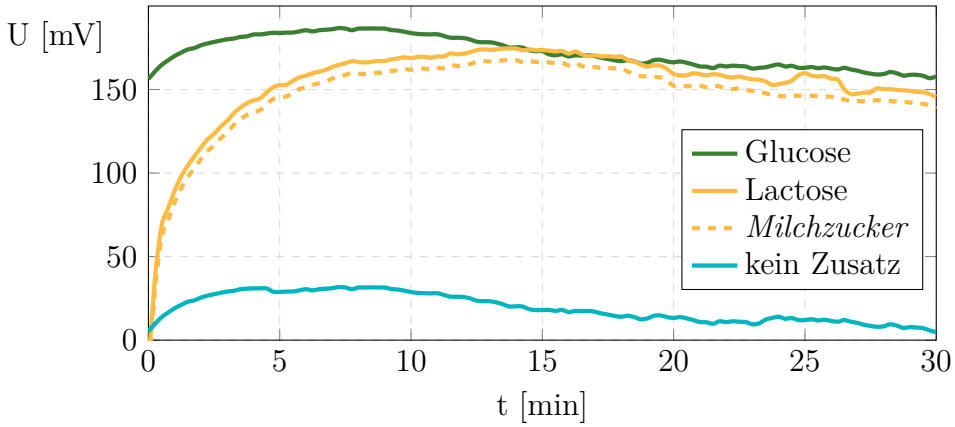



Abbildung 4.60: Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit des verwendeten Substrats. T = 22 °C.

Bei Einsatz von Glucose stellte sich unmittelbar eine hohe Spannung an, ein Spannungsmaximum von $U_{max}$ = 187 mV wurde nach 7 min erreicht, ehe die Spannung im Verlauf der Messung auf 158 mV sank. Bei Einsatz von Lactose stellte sich nach etwa 15 min ein Spannungsmaximum von $U_{max}$ = 175 mV ein. Mit Milchzucker als Substrat verlief die Spannung bei Betrieb der Brennstoffzelle sehr ähnlich. Auch ohne Zusatz eines Substrats war eine geringe Spannung messbar. Es ist anzunehmen, dass die in dem Milchsäure-Kulturen-Präparat enthaltene Glucose als Substrat wirkt und somit ein geringer Anteil der in den anderen Varianten gemessenen Zellspannung dadurch hervorgerufen wird.
Unter Verwendung von Glucose, Lactose und *Milchzucker* wurde nach 10 min eine Stromstärke von 2.4 $\mu$A gemessen.
Im Verlauf der Messung nahm die Spannung jeweils leicht ab, mutmaßlich aufgrund abnehmender Substrat-Konzentrationen. In nachfolgenden Messreihen in Abschnitt 4.5.6 wurde der Versuch unternommen, durch erneute Substrat-Zufuhr Einfluss auf

die Spannung zu nehmen. Schwankungen, wie sie um die Messzeit von 25 min für Lactose gemessen wurden, können in Erschütterungen der Brennstoffzelle und einhergehend variierenden Kontaktflächen der Elektroden begründet sein.

In dem gewählten Aufbau konnte die in der Literatur beschriebene Substrat-Priorisierung anhand der gemessenen Spannungen abgebildet werden. Da unter Verwendung von Glucose als Substrat schneller eine gegenüber Lactose-Einsatz leicht erhöhte Spannung gemessen wurde, wurde in nachfolgenden Messungen Glucose als Substrat genutzt.

### 4.5.2. Variation der Einwaage an Milchsäure-Kulturen-Präparat

Die Einwaage an Milchsäure-Präparat in der Beschichtung der Anode wurde zur Identifizierung eines Optimums variiert. Es wurden Einwaagen zwischen 50 mg und 300 mg gewählt. Da eine Kapsel 175 mg des Milchsäure-Kulturen-Präparats enthält, wurde entgegen der übrigen Mengen-Intervalle auch diese Einwaage einbezogen. Die Angaben beziehen sich auf die Einwaagen pro Ansatz für drei Brennstoffzellen, sodass unter Annahme einer gleichmäßigen Verteilung bei Auftrag mit einer Pipette pro Anode ein Drittel der Einwaage aufgetragen wurden, vgl. Tabelle 4.8.

| **Einwaage pro Ansatz [mg]** | 50 | 100 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Auftrag pro Anode [mg]** | 17 | 33 | 50 | 58 | 67 | 83 | 100 |

Tabelle 4.8: Übersicht über die Einwaagen beziehungsweise den Auftrag des Milchsäure-Kulturen-Präparats.

Der Inhalt mehrerer Kapseln des Milchsäure-Kulturen-Präparats wurde zunächst vermengt und anschließend die jeweilige Einwaage entnommen. Auf diese Weise sollte eine möglichst gleiche Zusammensetzung der Einwaagen erreicht werden.
Bei allen gewählten Einwaagen an Milchsäure-Kulturen-Präparat und entsprechend variierendem Auftrag auf der Anode konnten Zellspannungen gemessen werden (Abb. 4.61). Sowohl für die sehr niedrigen als auch die sehr hohen gewählten Einwaagen wurden eher niedrige Zellspannungen von etwa 50 mV über den Messzeitraum bestimmt. Hinsichtlich der Stromstärken zeigte sich ein ähnlicher Trend (Tab. 4.9). Für die Einwaage von 175 mg wurde unmittelbar zu Messbeginn ein Spannungsmaximum von $U_{max} = 288$ mV erreicht, die Spannung sank jedoch schnell ab. Dahingegen wurde bei einer Einwaage von 150 mg in wenigen Minuten ein Spannungsmaximum von

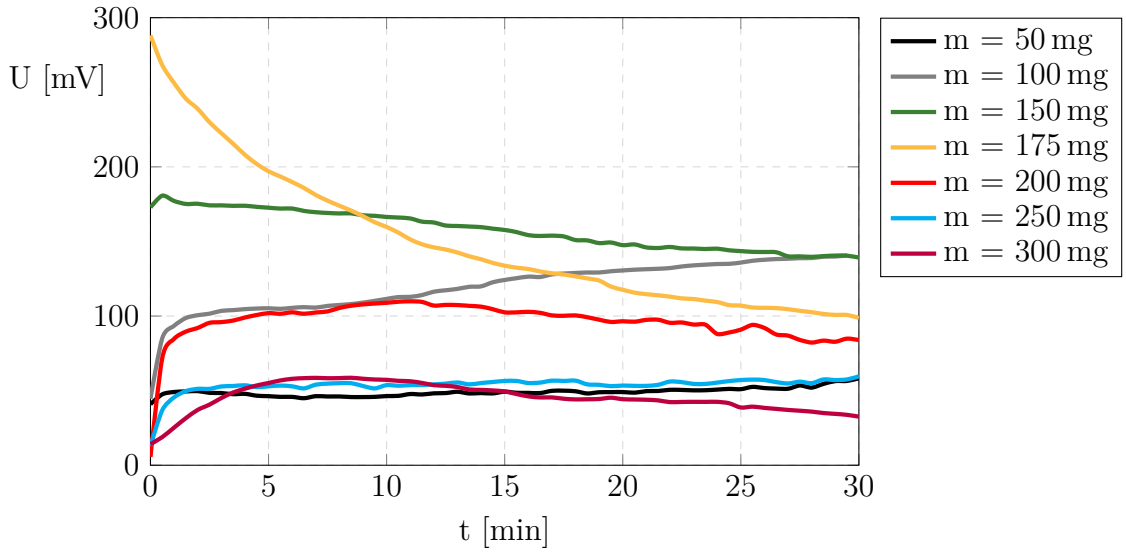



Abbildung 4.61: Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit der Einwaage des Milchsäure-Kulturen-Präparates. T = 22 °C.

$U_{max}$ = 180 mV erreicht, die Spannung nahm im Verlauf der Messung stetig bis auf 140 mV ab. Diese Einwaage von 150 mg schien am geeignetsten, um in dem gewählten Aufbau eine hohe und anhaltende Spannung auszubilden. Auch wurde in der Variante die höchste Stromstärke detektiert. Sie wurde daher für nachfolgende Messreihen im Rahmen dieser Arbeit genutzt.

| **Einwaage pro Ansatz [mg]** | 50 | 100 | 150 | 175 | 200 | 250 | 300 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Stromstärke [$\mu$A]** | 1.7 | 2.4 | 3.1 | 2.6 | 2.5 | 2.3 | 1.7 |

Tabelle 4.9: Übersicht der den Einwaagen des Milchsäure-Kulturen-Präparats entsprechenden Stromstärken. T = 22 °C.

Die gemessenen Effekte der Einwaage sind möglicherweise darauf zurückzuführen, dass zum Ausbau einer deutlichen Zellspannung und dem Elektronentransfer auf die Anode eine Mindestanzahl an Bakterien auf der Elektrode vonnöten ist. Eine zu hohe Einwaage bedingt jedoch eine entsprechend hohe Schichtdicke, die wiederum die Ausbildung des Potentials und den Elektronentransfer an die Anode hemmt.

Mit zunehmender Einwaage waren die Suspensionen viskoser und die Schaumbildung beim Vermengen und Auftragen entsprechend ausgeprägter. Dennoch ließen sich die Suspensionen augenscheinlich gleichmäßig auf die Filterpapier-Anoden auftragen.

### 4.5.3. Variation des Tensids

Nach Ge u. a. [98] wird das Tensid Natriumdodecylsulfat zur Herstellung einer gleichmäßig zusammengesetzten Suspension und somit zur gleichmäßigen Benetzung der Filterpapier-Elektroden mit der leitfähigen Suspension benötigt. Ein positiver Einfluss auf die Leitfähigkeit ist anzunehmen. Natriumdodecylsulfat findet gewöhnlich Einsatz als Detergens zur Lösung von Proteingemischen, da es fast alle zwischenmolekularen Wechselwirkungen innerhalb nativer Proteine zerstört.[31] Es ist davon auszugehen, dass die Stoffwechselaktivität von Mikroorganismen durch das Tensid beeinflusst wird. In dieser Versuchsreihe wurde daher untersucht, ob in dem Versuchsaufbau der Einsatz eines Tensids in den Suspensionen zur Beschichtung der Elektroden notwendig ist, und, ob das in der Literatur beschriebene Natriumdodecylsulfat[98] durch Spülmittel ersetzt werden kann. Dazu wurde der Aufbau mit einer Einwaage von 150 mg Milchsäure-Kulturen-Präparat und ohne beziehungsweise 15 mg Tensid-(-Gemisch) bezogen auf drei Brennstoffzellen realisiert und die Spannungen vermessen.

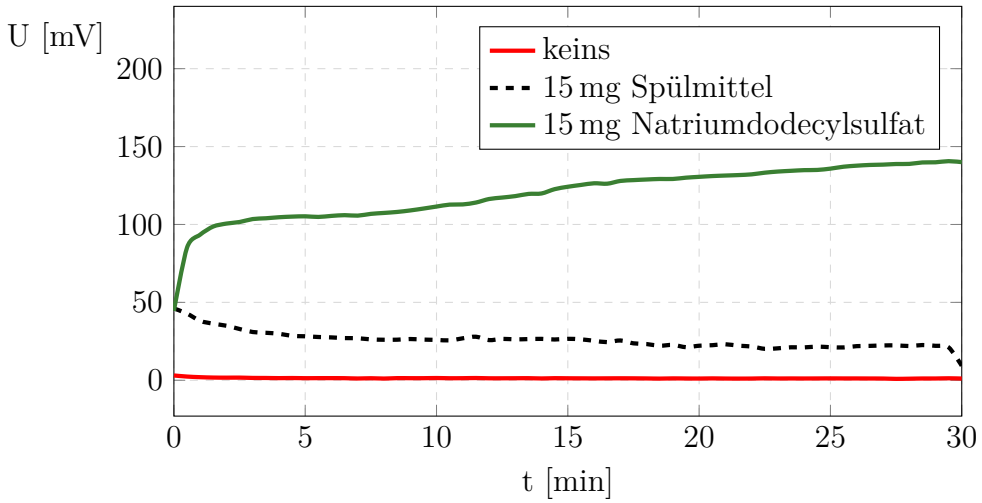



Abbildung 4.62: Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit des verwendeten Tensids. T = 22 °C.

In Abwesenheit eines Tensids konnte keine Stromstärke und Spannung gemessen werden (Abb. 4.62, rot). Unter Verwendung der gleichen Einwaage des Stoffgemischs Spülmittel (15 mg) wurde eine geringere Spannung mit $U_{max}$ = 46 mV gemessen, die im Verlauf der Messung kontinuierlich sank und schließlich einen Wert von 9 mV annahm. Nach 10 min wurde eine Stromstärke von 1.1 $\mu$A gemessen. Mit Natriumdodecylsulfat wurde eine deutlich höhere Spannung gemessen, die im Verlauf

der Messzeit bis auf einen Wert von $U_{max} = 140\,mV$ anstieg.
Die Notwendigkeit des Einsatzes eines Tensids im gewählten Aufbau der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen wurde experimentell anhand der gemessenen Spannungen bestätigt.
Augenscheinlich konnte unter Einsatz des handelsüblichen Spülmittels die Filterpapier-Elektrode gleichmäßig mit der leitfähigen Suspension benetzt werden, eine Spannung war messbar. Der geringe Betrag der Spannung sowie die kontinuierliche Abnahme können darin begründet sein, dass das Gemisch aus anionischen, nicht-ionischen und amphoteren Tensiden die Zellmembranen der Milchsäure-Bakterien beschädigt und somit die Stoffwechselaktivität zunehmend hemmt. Auch eine Beeinflussung des pH-Wertes zu Ungunsten der Aktivität der Milchsäure-Bakterien ist denkbar.
Natriumdodecysulfat als Reinsubstanz scheint benetzend und im Messzeitraum nicht in dem Maße hemmend auf den Metabolismus zu wirken, sodass es in nachfolgenden Messungen weiterhin zum Einsatz kommt.

### 4.5.4. Variation der Elektrodenflächen

Von Ge u. a. [98] wurde eine Elektrodenfläche von 2x2 cm vorgeschlagen. Da das ausgebildete Potential auch von der Fläche abhängt,[15] wurde untersucht, inwiefern eine Vergrößerung der Elektrodenfläche in dem gewählten Aufbau zu einem Anstieg der Zellspannung führt. Neben der quadratischen Elektrodenfläche von 2x2 cm wurden auch rechteckige Elektroden der Maße 2x3 cm untersucht. Die Menge an leitfähiger Suspension wurde proportional erhöht, um eine möglichst gleiche Schichtdicke und Benetzung der unterschiedlichen Flächen zu gewährleisten. Es war anzunehmen, dass durch die rechteckige Elektroden-Geometrie bei quadratischem Reservoir in der Stapelanordnung die Krokodilklemmen besser anzubringen und eine stabilere Kontaktfläche der Elektroden gegeben sei.

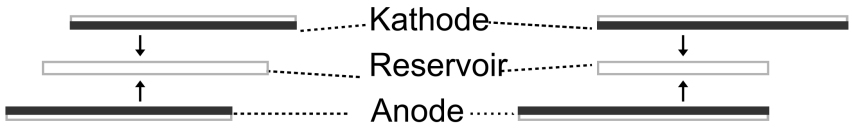



Abbildung 4.63: Stapelaufbau einer mikrobiellen Brennstoffzelle. Links entspricht die Reservoirfläche der Elektrodenfläche, rechts ist diese geringer.

In Abbildung 4.63 ist links die 2x2 cm-Variante schematisch aufgegriffen, bei der das Reservoir genauso groß wie die jeweiligen Elektrodenflächen ist. Rechts daneben ist die 2x3 cm-Variante dargestellt. Es wird deutlich, dass eine größere

Fläche über das Reservoir hinaus steht. Dadurch kann der Aufbau leichter mit Krokodilklammern versehen werden und die Kontaktfläche zwischen Reservoir und Elektroden in geringerem Ausmaß destabilisiert werden - etwa durch unbeabsichtigtes Anheben einer Elektrode beim Klammern. Die Reservoirfläche wurde nicht verändert, weil dadurch auch der Faktor der Substratverfügbarkeit verändert worden wäre.
In beiden Varianten konnte über den Zeitraum von 30 min eine Spannung gemessen werden (Abb. 4.64).

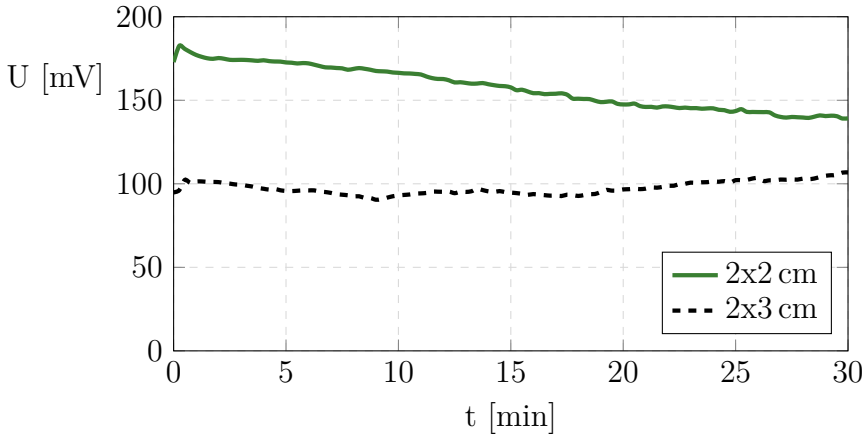



Abbildung 4.64: Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit der Elektrodenfläche. T = 22 °C.

Tatsächlich wurde bei Einsatz der Elektroden mit Flächen von 2x2 cm eine deutlich höhere Zellspannung gegenüber den anderen Varianten gemessen. Die Stromstärke beider Varianten betrug nach 10 min 2.9 $\mu$A.
Möglicherweise ist diese Diskrepanz darin begründet, dass die Fixierung nicht den Kontakt der gesamten Elektrodenfläche mit dem Reservoir stabilisiert. Da jedoch auch die Handhabbarkeit des Aufbaus mit rechteckiger Form nicht eklatant einfacher war, wurde auf eine entsprechende Anpassung verzichtet und weiterhin mit der Elektrodenfläche von 2x2 cm gearbeitet.

### 4.5.5. Variation der Elektrodenbeschichtung

Neben der Aktivkohle-Suspension wurde die Eignung von Bleistiftabrieb und Graphitspray als weitere Kohlenstoff-basierte Komponenten als Beschichtung der Filterpapier-Elektroden überprüft. Diese Auswahl wurde getroffen, da beiden letztgenannten Materialien schulüblich sind, kein Abwiegen im Milligramm-Bereich, keine Pipette zum Auftrag und keine beziehungsweise eine kurze Trocknungszeit nach Auftrag auf

das Filterpapier benötigt wird. Diese Eigenschaften wären im Schulkontext vorteilhaft gegenüber der Verwendung der Aktivkohle-Suspension.
Mit allen drei Varianten konnte über den Messzeitraum von 30 min eine Spannung gemessen werden (Abb. 4.65).

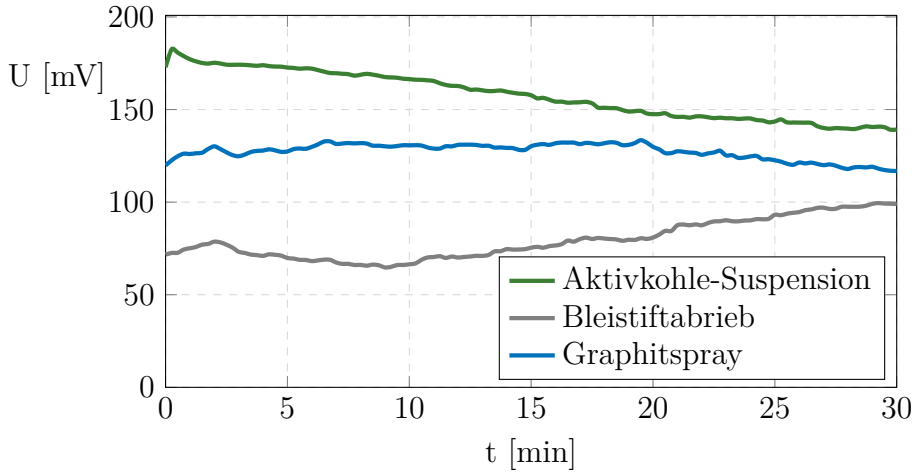



Abbildung 4.65: Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit der Elektrodenbeschichtung. T = 22 °C.

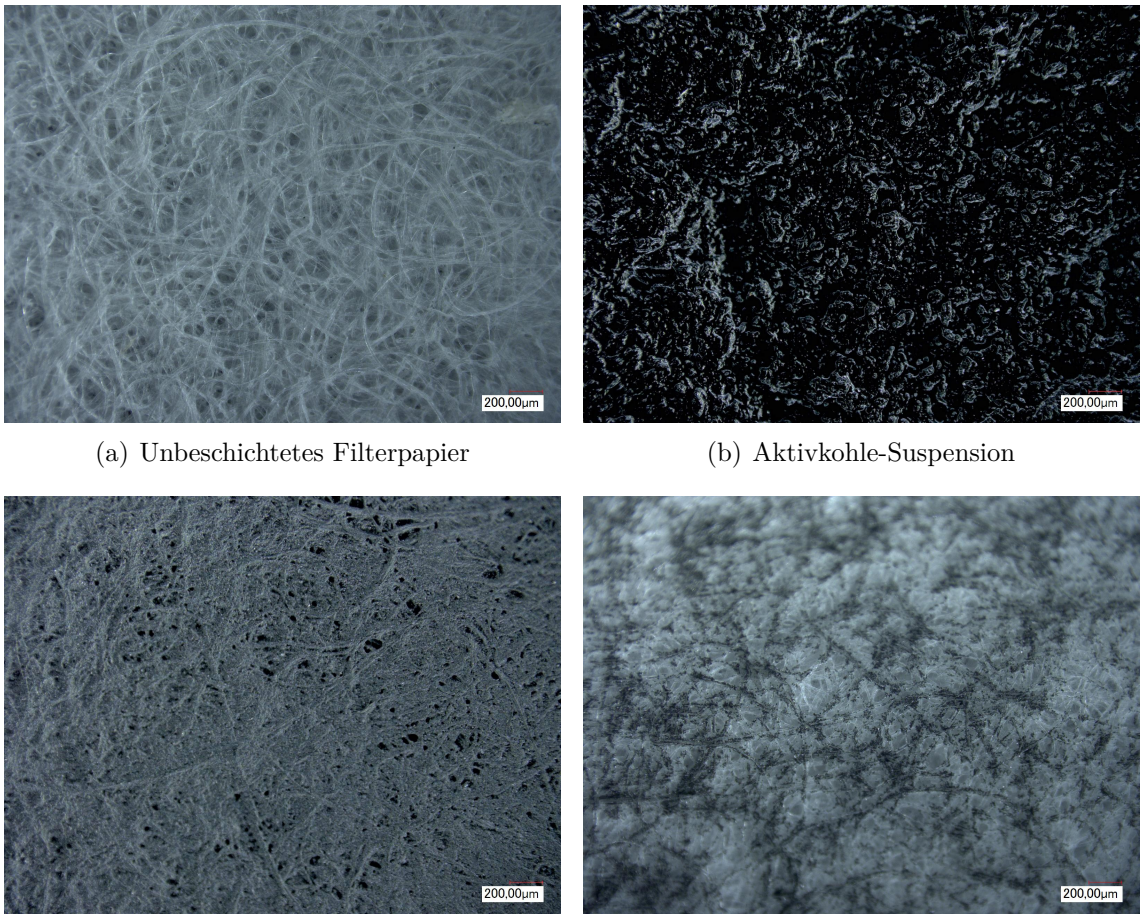
Unter Verwendung von Bleistiftabrieb als Elektrodenbeschichtung entsprach der Betrag der Spannung nur etwa 40 % der mit Aktivkohle-Suspension erreichten, unter Verwendung von Graphitspray etwa 80 %. Während mit Bleistiftabrieb nach 10 min eine Stromstärke von 2.3 $\mu$A anlag, wurde unter Verwendung von Graphitspray als Elektrodenbeschichtung eine Stromstärke von 3.3 $\mu$A und bei Aktivkohle von 2.9 $\mu$A gemessen.
Je nach verwendeter Komponente unterschied sich die aufgetragene Masse und der Widerstand (Tab. 4.10). Die mit Aktivkohle-Suspension versehenen Filterpapier-Elektroden wiesen im Vergleich den geringsten Widerstand auf, sodass die Leitfähigkeit entsprechend die höchste ist, was sich die Zellleistung begünstigt.

| | **Aktivkohle-Suspension** | **Bleistiftabrieb** | **Graphitspray** |
|---|---|---|---|
| **Auftrag [mg]** | 15 | 3 | 70 |
| **Widerstand** [$m\Omega$] | 8.26 | 89.38 | 41.85 |

Tabelle 4.10: Auftrag der Komponenten zur Beschichtung der Elektroden und Widerstand der Beschichtung. Abstand der Messfühler 1.5 cm.

Je nach Komponente waren die Dicke und der Grad der Beschichtung verschieden. Die in Abbildung 4.66 aufgeführten Mikroskop-Aufnahmen geben einen Hinweis

darauf, dass die Aktivkohle-Suspension und das Graphitspray die Oberfläche der Filterpapier-Elektrode gleichmäßiger als der Bleistiftabrieb beschichteten. Während insbesondere bei Auftrag von Aktivkohle-Suspension (Abb. 4.66 (b)) die Oberflächenstruktur des Filterpapier (Abb. 4.66 (a)) überlagert wurde, blieb sie bei Auftrag von Bleistiftabrieb (Abb. 4.66 (d)) gut erkennbar.




(a) Unbeschichtetes Filterpapier

(b) Aktivkohle-Suspension

(c) Graphitspray

(d) Bleistiftabrieb

Abbildung 4.66: Mikroskopische Ansicht verschiedener Filterpapierbeschichtungen.

Es ist anzunehmen, dass der Bleistiftabrieb in den Vertiefungen der Oberflächenstruktur des Filterpapiers eingelagert wird und keine durchgängige, leitfähige Schicht über die gesamte Elektrodenfläche ausbildet. Dadurch stellte sich beim Betrieb der Brennstoffzelle mit Bleistiftabrieb-Elektroden eine vergleichsweise geringere Zellspannung ein.

Trotz der eingangs beschriebenen Vorteile von Bleistiftabrieb und Graphitspray in der schulischen Praxis wurde aufgrund der deutlich höheren Spannungsmesswerte für weitere Messungen die Aktivkohle-Suspension als Elektrodenbeschichtung genutzt.

### 4.5.6. Variation des Reservoirs

In den bisherigen Messungen wurde ein mit Substrat-Lösung getränktes Stück Filterpapier als Reservoir genutzt. Dieses wurde durch ein Stück Schwammtuch beziehungsweise Bierdeckelfilz gleicher Grundfläche substituiert, um durch die höhere Schichtdicke zum einen den Aufbau zu stabilisieren und zum anderen eine Wiederbefüllbarkeit des Reservoirs mithilfe von Spritzen zu ermöglichen. Auf diese Weise könnte die kontinuierliche Funktionsweise von Brennstoffzellen verdeutlicht werden. Unter Verwendung der drei gewählten Materialien als Reservoir konnte eine Zellspannung gemessen werden. Nach jeweils 10 min sind mithilfe einer Spritze anodenseitig am Reservoir 0.5 mL der Substrat-Lösung eingebracht worden, wie in Abbildung 4.67 durch die blaue Schattierung verdeutlicht.

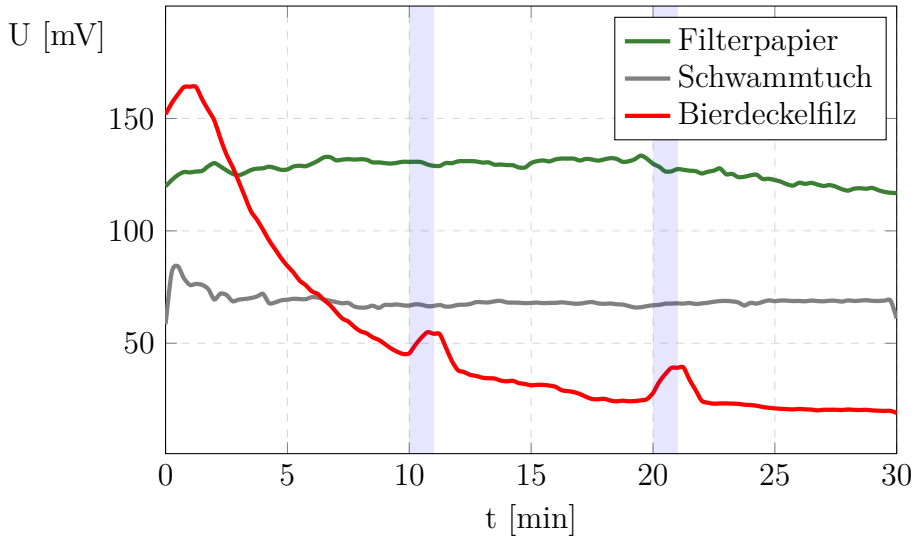



Abbildung 4.67: Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit des verwendeten Reservoirs. T = 22 °C.

Ein Effekt auf die gemessene Spannung zeigte sich nur bei Verwendung von Bierdeckelfilz als Reservoir (Abb. 4.67). Dabei war nach einer Minute ein Spannungsmaximum von $U_{max}$ = 165 mV messbar, die Spannung sank innerhalb von fünf Minuten um beinahe die Hälfte auf 84 mV ab. Nach 10 min war weder bei Verwendung des Schwammtuches noch des Bierdeckelfilzes eine Stromstärke messbar. Bei Nutzung von Filterpapier als Reservoir betrug sie 3.1 $\mu$A.
Bei Verwendung von Schwammtuch als Reservoir wurde maximal eine Spannung von 84 mV gemessen. Ein Effekt wiederholter Substrat-Zufuhr auf die Spannung wurde nicht beobachtet.

Die gemessenen Werte lassen sich nicht logisch stringent diskutieren. Zu bedenken könnten Faktoren wie etwa die reaktive Oberfläche, die Schichtdicke und Polarität des jeweiligen Materials sein.

Unter Verwendung von Bierdeckelfilz als Reservoir konnte ein stabilerer Aufbau realisiert werden, bei dessen Betrieb kurzzeitig eine vergleichsweise hohe Spannung und ein Effekt wiederholter Substrat-Lösungszufuhr auf die Ruheklemmspannung gemessen werden kann.

### 4.5.7. Zwischenfazit zu mikrobiellen Brennstoffzellen mit Milchsäure-Kulturen-Präparat

In den Versuchsreihen konnte ein Schulversuch unter Verwendung von Milchsäure-Bakterien als Biokatalysator in Ergänzung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Versuche zu mikrobiellen Brennstoffzellen unter Verwendung von Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* als Vertreter der Pilze gefunden werden. In Tabelle 4.11 ist eine Übersicht ausgewählter Varianten der MFC mit Milchsäure-Kulturen-Präparat gegeben, die im Rahmen dieser Arbeit vermessen worden sind. Darin sind die anhand der Messwerte und praktischen Handhabbarkeit als beste Varianten identifizierten jeweils grau hinterlegt. Aus der nach zehnminütiger Messzeit anliegenden Spannung und Stromstärke wurde ergänzend die Zellleistung P berechnet.

| | **Variante** | **U [mV]** | **I [$\mu$A]** | **P [mW]** |
|---|---|---|---|---|
| **Substrat** | Glucose | 184 | 2.4 | 0.44 |
| | Lactose | 169 | 2.4 | 0.41 |
| | Milchzucker | 162 | 2.4 | 0.39 |
| **Einwaage d. Präparats** | 100 mg | 112 | 2.4 | 0.27 |
| | 150 mg | 166 | 3.1 | 0.51 |
| | 200 mg | 160 | 2.5 | 0.40 |
| **Tensid** | Natriumdodecylsulfat | 112 | 2.1 | 0.24 |
| | Spülmittel | 26 | 1.1 | 0.03 |
| | keins | 1 | - | - |
| **Elektrodenflächen** | 2x2 cm | 166 | 2.9 | 0.48 |
| | 2x3 cm | 93 | 2.9 | 0.27 |
| **Elektrodenbeschichtung** | Aktivkohle-Suspension | 166 | 2.9 | 0.48 |
| | Bleistiftabrieb | 66 | 2.3 | 0.15 |
| | Graphitspray | 131 | 3.3 | 0.43 |
| **Reservoir** | Filterpapier | 131 | 3.1 | 0.41 |
| | Schwammtuch | 66 | - | - |
| | Bierdeckelfilz | 46 | - | - |

Tabelle 4.11: Übersicht über die Zellleistung ausgewählter Varianten der MFC mit Milchsäure-Kulturen-Präparat. t = 10 min.

Unter Verwendung von Glucose als Substrat, einer Einwaage an Milchsäure-Kulturen-Präparat von 150 mg, Aktivkohle-Suspension als Elektrodenbeschichtung und Elektrodenflächen von 2x2 cm konnten in dem Kompakt-Aufbau die besten Zellleistungen realisiert werden. In dem Aufbau konnten Effekte einer Substrat-Priorisierung gezeigt werden. Weiterhin wurde deutlich, dass der Einsatz von Natri-

umdodecylsulfat notwendig ist. Zudem konnte Bierdeckelfilz als Reservoir bestimmt werden, bei dem die erneute Applikation von Brennstoff möglich ist und zu einem Anstieg der Zellspannung führt. Da jedoch die Zellspannung nach kurzer Zeit geringer als bei Verwendung eines Filterpapier-Reservoirs ist, kann je nach didaktischer Intention das geeignetere Reservoir gewählt werden.
Zur Auswertung des Versuchs im schulischen Kontext empfiehlt es sich, die Komplexität der Inhalte durch Auswahl didaktisch zu reduzieren:[102] So kann die Auswertung anhand der Reaktionsgleichungen der homofermentativen Milchsäure-Gärung besprochen werden, bei der aus Glucose ausschließlich Lactat und Protonen (*Milchsäure*) gebildet werden.[32]
Stark vereinfacht kann der Betrieb der MFC mit Milchsäure-Kulturen-Präparat durch die Gleichungen 4.12 beschrieben werden.

$$\begin{array}{ll} \text{Anode} & \mathrm{C_6H_{12}O_6} \xrightarrow{\text{Milchsäure-Kulturen}} 2\,\mathrm{C_3H_5O_3^-} + 2\,\mathrm{H^+} + 2\,\mathrm{e^-} \\ \text{Kathode} & \mathrm{O_2} + 4\,\mathrm{H^+} + 4\,\mathrm{e^-} \longrightarrow 2\,\mathrm{H_2O} \\ \hline & 2\,\mathrm{C_6H_{12}O_6} + \mathrm{O_2} \xrightarrow{\text{Milchsäure-Kulturen}} 4\,\mathrm{C_3H_5O_3^-} + 2\,\mathrm{H_2O} \end{array} \tag{4.12}$$

Tatsächlich werden die bei der Oxidation von Glucose freiwerdenden Elektronen zur Regeneration von $NAD^+$ genutzt, sodass davon auszugehen ist, dass diese in einem zyklisch verlaufenden Redox-Prozess an die Anode übertragen werden, wie nachfolgend in Abschnitt 4.7.5 näher erläutert wird.

## 4.6. Enzymatische Brennstoffzelle mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase

Von Ge u. a. [98] wurde eine mit Glucose betriebene enzymatische Brennstoffzelle vorgestellt, die mit $\beta$-Glucoseoxidase beziehungsweise Laccase und *Carbon Nano Tubes* (CNTs) beschichtete Filterpapierstücke als Elektroden und als Substrat-Reservoir nutzt (Abb. 4.68).

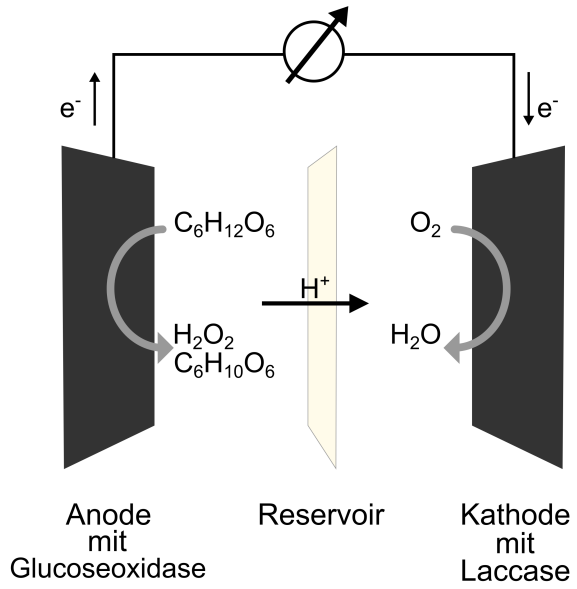



Abbildung 4.68: Schematischer Aufbau und Funktionsweise der EFC mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase.

Neben der Erfüllung bereits im Zusammenhang der mikrobiellen Brennstoffzellen angeführten schulpraktischen Kriterien (z.B. Abschnitt 4.4.3) bestand die Intention der Versuchsreihen darin,

- die Kurz- und Langzeitvariante des Versuchs vergleichend nachzuvollziehen.
- zu überprüfen, ob CNTs durch kostengünstigere Alternativen substituiert werden können.
- den Zusammenbau durch Vergleich einer Stapel- und Faltvariante zu erleichtern.
- die Notwendigkeit der Auftragszyklen der leitfähigen Tinte der Elektroden zu prüfen.
- die Zeit der Versuchsdurchführung an den Umfang von Schulstunden anzunähern.

Der Versuch zunächst nachvollzogen, ehe er in der Art der Beschichtung und der Anzahl der Auftragszyklen variiert wurde [13].

Das Zellpotential dieser EFC unter Standardbedingungen kann als Erwartungswert berechnet werden, indem die Differenz des Standardpotentials von Anoden- und Kathodenreaktion gebildet wird (vgl. Gleichung 4.13).[98]

$$E^0 = \Delta E^0 = E^0_{Kathode} - E^0_{Anode} = 1.23\ V - (-0.45\ V) = 1.68\ V \tag{4.13}$$

Der Wert hat jedoch nur unter Standardbedingungen Gültigkeit, sodass er in den Messreihen nur bedingt zum Vergleich herangezogen werden kann.
Zur Beschreibung der jeweiligen Varianten wurde jeweils zunächst die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 10 min mit dem Pocket Cassy dreifach bestimmt. Die Stromstärken lagen in allen vermessenen Zellanordnungen unterhalb des Messbereiches des Pocket Cassy, sodass keine entsprechenden Messreihen aufgenommen wurden.

### 4.6.1. Funktionsweise des enzymatischen Systems

Das von Ge u. a. [98] für didaktische Zwecke beschriebene Brennstoffzellsystem basiert auf Funktionsprinzipien, die auch für den Einsatz von Biosensoren zum Monitoring von Blutzucker genutzt werden, da die Leistung abhängig von der Substrat-Konzentration ist.[61,66,98] An der Anode katalysiert $\beta$-Glucoseoxidase die Reaktion von Glucose zu Gluconsäurelacton. Die freigesetzten Elektronen gelangen über die Anode in den externen Stromkreis, ehe sie an der Kathode zur Reduktion genutzt werden. Das Enzym Laccase an der Kathode katalysiert dort eine Reaktion, bei der auch Sauerstoff-Moleküle, Protonen und Elektronen zu Wasser-Molekülen reagieren (Gleichung 4.14).

$$\begin{aligned}
&\text{Anode} \quad && 2\,C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\beta\text{-Glucoseoxidase}} 2\,C_6H_{10}O_6 + 4\,H^+ + 4\,e^- \\
&\text{Kathode} \quad && O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \xrightarrow{\text{Laccase}} 2\,H_2O \\
&\hline \\
& && 2\,C_6H_{12}O_6 + O_2 \xrightarrow{\text{Enzyme}} 2\,C_6H_{10}O_6 + 2\,H_2O
\end{aligned} \tag{4.14}$$

[13] Einige der Messergebnisse wurden im Vertiefungspraktikum von Jonas Sterr ermittelt, das im Rahmen dieser Promotionsarbeit betreut wurde.

Laccasen katalysieren oxidative Kopplungsreaktionen. Diese laufen in drei Teilschritten ab: Im ersten Schritt wird das Enzym vom Substrat - gewöhnlich ein Aromat - reduziert. Es kommt zu einem internen Elektronentransfer im Enzym. Im zweiten Teilschritt wird molekularer Sauerstoff am aktiven Zentrum der Laccase zu Wasser reduziert. Das Substrat verlässt das Enzym schließlich als kationisches Radikal, das Kupplungs- oder Polymerisationsreaktionen eingehen kann.[103] Die beschriebene Kathodengleichung stellt somit nur eine Nebenreaktion dar.[104] Welche Substanz in dem vorgestellten und nachfolgend vermessenen Aufbau als eigentliches Substrat wirkt, wird in der Literatur nicht benannt.[66,98]

### 4.6.2. Vergleich der Lang- und Kurzversion nach Ge u. a. [98]

Von Ge u. a. [98] wurde der Aufbau der EFC in zwei verschiedenen Varianten vorgeschlagen: Die Lang- und die Kurzversion. In der hier als Langversion bezeichneten Variante erfolgten bei der Präparation der Elektroden fünf Auftragszyklen bei einer Trocknungszeit von 20 min, in der als Kurzversion bezeichneten vier Auftragszyklen bei einer Trockungszeit von jeweils 10 min. In beiden Durchführungsversionen wurde insgesamt die gleiche Menge leitfähiger Tinte aufgetragen. Nach Ge u. a. [98] gilt die Langversion als Demonstrationsversuch in didaktischen Kontexten, da eine höhere Zellleistung messbar sei. Die Kurzversion hingegen eigne sich zur Durchführung durch Studierende oder Lernende aus dem Schulkontext. Wenngleich sich sowohl die Anzahl an Auftragszyklen als auch die Trocknungszeiten unterscheiden, sollten nun dem Vorschlag von Ge u. a. [98] beide Varianten vergleichend vermessen werden. Im Rahmen dieser Arbeit galt es zu überprüfen, ob eine höhere Zellleistung den deutlich erhöhten Zeitaufwand der Langversion rechtfertigt.

Da beim Eintauchen des Brennstoffzellstapels in Glucose-Lösung augenscheinlich CNTs von der Elektroden abgetragen wurden, wurde für die Messungen entgegen der Vorschrift das Filterpapier-Reservoir separat in der Glucose-Lösung getränkt und die Zelle im Anschluss gestapelt. In Ermangelung eines leitfähigen Klebstoffes, der auf feuchtem Filterpapier haftet, wurde auf die Verwendung von Kupferdrähten als Verbindung zwischen Elektrode und Krokodilklemme verzichtet.

Dennoch war sowohl in der Lang- als auch der Kurzversion der Elektroden-Präparation eine Ruheklemmspannung messbar (Abb. 4.69).

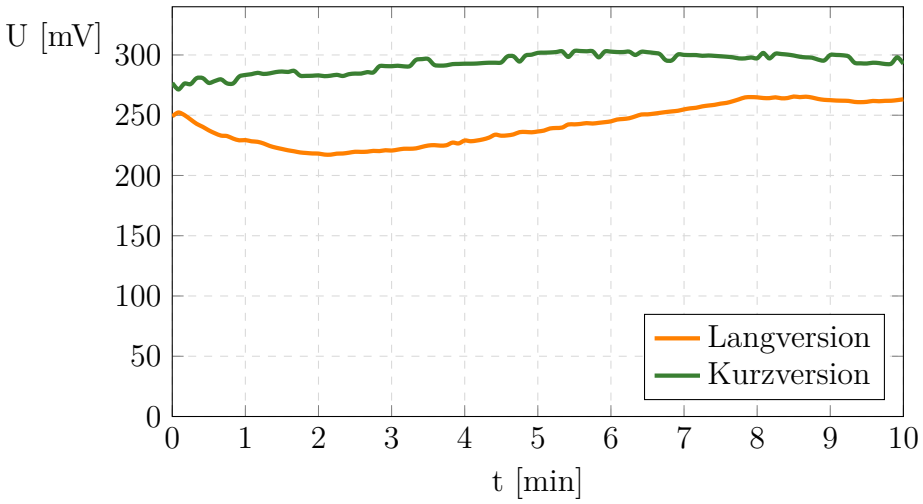



Abbildung 4.69: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in den Varianten der langen sowie kurzen Vorbereitung. T = 29 °C.

Mit dem Aufbau in der Kurzversion wurde eine leicht höhere Spannung gemessen. Zu Beginn der Messung betrug sie 277 mV, nahm bis auf 303 mV zu, ehe sie zum Ende der Messzeit auf 292 mV sank. Im weiteren zeitlichen Verlauf wäre aufgrund der abnehmenden Substrat-Konzentration ein Rückgang der Spannung zu erwarten. Die Schwankungen der gemessenen Spannung können mutmaßlich über eine veränderte Kontaktfläche der Elektroden zum Reservoir durch geringfügige Erschütterungen erklärt werden. Die im Vergleich etwas niedriger ausgeprägte Zellspannung bei Vorbereitung in der Langversion könnte darüber erklärt werden, dass mit der Anzahl der Auftragszyklen die Schichtdicke der Elektroden-Beschichtung zunimmt und der Elektronentransfer vom Enzym auf die Elektrode erschwert wird, während gleichzeitig nahe der Elektrode befindliche Enzyme sterisch von dem Substrat getrennt sind.

Aus den Messungen ging hervor, dass die Kurzversion der Elektroden-Präparation nicht nur weniger zeitaufwendig ist, sondern auch zu einer höheren Zellspannung führte. Daher wurde diese Vorgehensweise für die nachfolgenden Messreihen aufgegriffen.

Eine weitere zeitliche Optimierung des Versuchs wird in Abschnitt 4.6.5 geschildert.

### 4.6.3. Variation der Elektrodenbeschichtung

Im Aufbau nach Ge u. a. [98] werden zur Herstellung der leitfähigen Tinte CNTs genutzt. Diese gelten aufgrund der Biokompatibilität, der Struktur und Leitfähigkeit als geeignetes Material für enzymatische Brennstoffzellen. Der geringe Durchmesser der CNTs bewirkt direkten Kontakt zwischen den aktiven Zentren von Enzymen, wodurch MET und DET begünstigt werden. Unter Verwendung von CNTs konnten in der Forschung die bislang leistungsstärksten EFC realisiert werden.[105]
Es wird jedoch angenommen, dass diese Vorteile nur bei Immobilisierung der CNTs und Enzyme gelten - wohingegen nach Ge u. a. [98] keine Immobilisierung vorgesehen ist. Im praktischen Umgang fiel beim Aufbau der EFC auf, dass die CNTs in der leitfähigen Tinte schlecht homogenisiert werden konnten. Zudem bildete sich beim Pipettieren der tensidhaltigen Tinte Schaum aus, was neben dem gelegentlichen Verstopfen der Pipettenspitzen problematisch schien. Weiterhin sind CNTs in der Anschaffung sehr kostspielig, weswegen es sich nicht um schultaugliche Materialien handelt. Bei einem Preis von 136 $\frac{Euro}{g}$ käme es bei 30 Lernenden allein an CNTs zu einem Finanzaufwand von 41 Euro. Deswegen wurde im Rahmen dieser Arbeit Aktivkohle anstelle der CNTs zum Erstellen der leitfähigen Tinte vergleichend vermessen. Aktivkohle ist kostengünstig verfügbar (ca. 0.1 $\frac{Euro}{g}$) und weist eine sehr große Oberfläche pro Masseneinheit auf. Zusätzlich wurden Messungen unter Verzicht eines Trägermaterials durchgeführt.

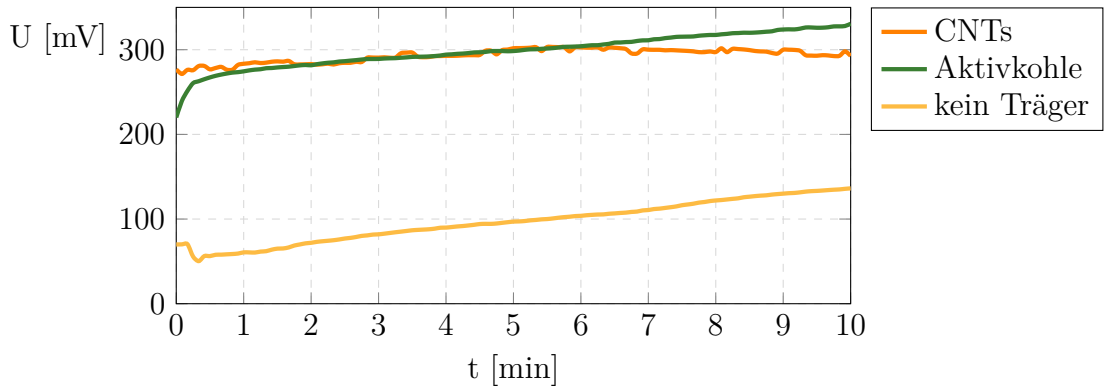
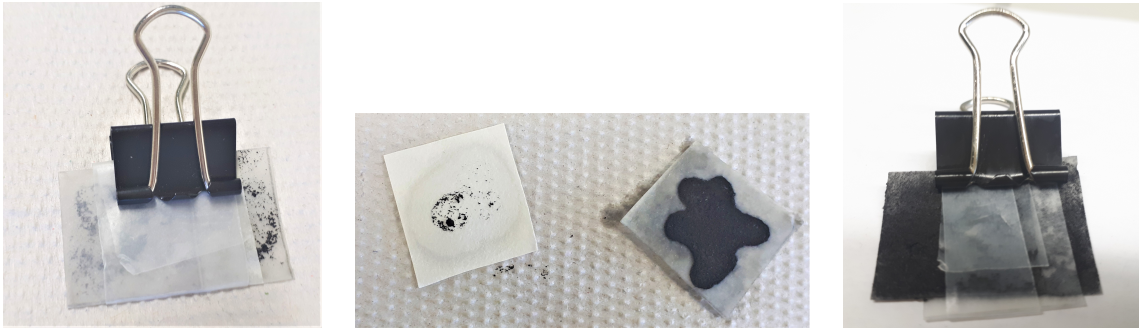



Abbildung 4.70: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit der Elektroden-Beschichtung. T = 29 °C.

Unter Verwendung von Aktivkohle wurde eine ähnlich hohe Spannung wie unter Verwendung von CNTs gemessen. Ab einer Messzeit von 6 min lag eine etwas höhere Spannung an, die Spannung stieg insgesamt über den Messzeitraum von 10 min an (vgl. Abb. 4.70). Die Spannung schwankte insgesamt weniger als unter Einsatz

von CNTs, was an der gleichmäßigeren Verteilung und somit Kontaktfläche der Aktivkohle-Beschichtung liegen könnte (vgl. 4.71).



(a) Aufbau mit CNTs (b) Elektrode mit CNTs bzw. AK nach einmaligem Auftrag (c) Aufbau mit AK

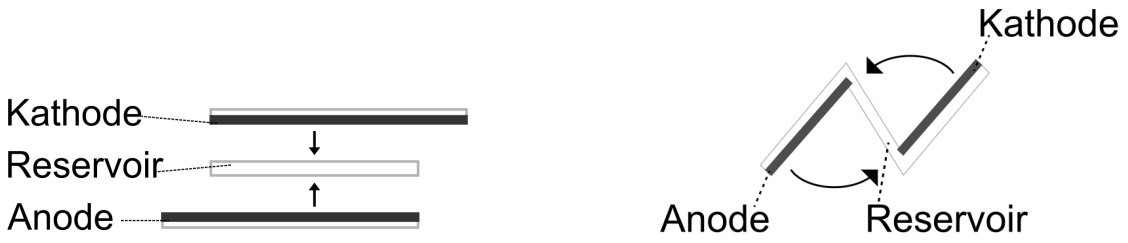
Abbildung 4.71: Variation des Materials zur Elektrodenbeschichtung. *AK steht für Aktivkohle.*

Auch ohne Einsatz einer Kohlenstoff-Komponente in der leitfähigen Tinte lag eine Spannung an. Diese war jedoch wesentlich geringer als mit Kohlenstoff-Komponente, sodass ein Verzicht im Schulexperiment nicht sinnvoll erscheint.

Im Gegensatz zur Handhabung der CNTs lies sich mit Aktivkohle gut eine Suspension herstellen, die ohne Schaumbildung und ohne Zusetzen der Pipettenspitze gleichmäßig auf die Filterpapieroberfläche pipettiert werden konnte. In Kombination mit den guten Messwerten und dem geringeren Finanzaufwand überwogen die Vorteile der Verwendung von Aktivkohle zum Ansetzen der leitfähigen Tinte. Daher wurde in nachfolgenden Messreihen mit Aktivkohle anstelle der CNTs gearbeitet.

### 4.6.4. Variation des Zusammenbaus

Da der Stapelaufbau der Brennstoffzelle viel feinmotorisches Geschick erfordert und eine Variation der genauen Kontaktflächen von Elektroden und Reservoir nicht auszuschließen ist, wurde in Anlehnung an Fischer u. a. [66] ein Faltaufbau getestet. Während Fischer u. a. [66] die Segmentierung eines Filterpapierstreifens durch Beschichtung mit Wachs durch einen Drucker vorsieht, wurde aus Gründen der praktischen Umsetzbarkeit die Segmentierung durch Knicken herbeigeführt. Der Filterpapierstreifen wies die Maße 7x2 cm auf, sodass die aktiven Flächen im Stapel- und Faltaufbau identisch zueinander sind (vgl. Abb. 4.72).




(a) Stapelaufbau (b) Faltaufbau

Abbildung 4.72: Möglichkeiten des Zusammenbaus der EFC.

Nach dem Falten erfolgte die Beschichtung und die Trocknungszeit gemäß der Kurzversion nach Ge u. a. [98] unter Verwendung von Aktivkohle. Zum Betrieb der Zelle wurde der Streifen zusammengefaltet und mithilfe von Parafilm und einer Foldback-Klammer fixiert. In beiden Varianten des Zusammenbaus konnte eine Zellspannung gemessen werden (Abb. 4.73).

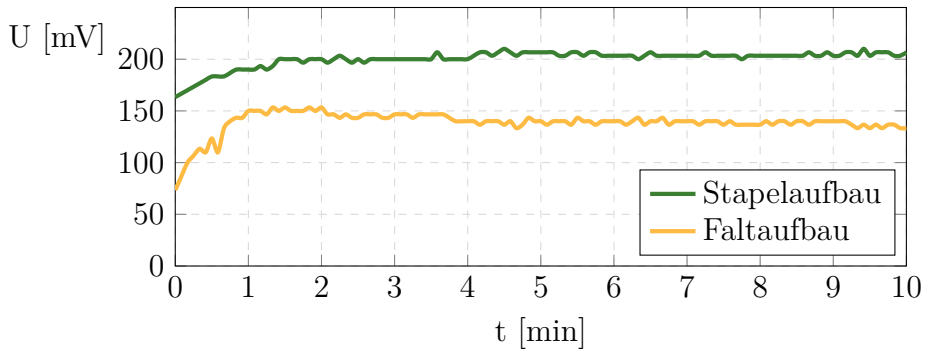



Abbildung 4.73: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit des Zusammenbaus. T = 22 °C.

Bei Betrieb der im Faltaufbau realisierten Brennstoffzellen war eine geringere Ruheklemmspannung messbar, als bei den im Stapelaufbau gefertigten. Die Spannung schwankte in ähnlichem Ausmaß wie bei der Stapelvariante, sodass offenbar auch keine Stabilisierung der Kontaktflächen herbeigeführt wurde.
Rückmeldungen von Studierenden und wissenschaftlichen Hilfskräften ergaben, dass die sachgemäße Beschichtung des Filterpapierstreifens für den Faltaufbau kognitiv und feinmotorisch anspruchsvoller als der Stapelaufbau sei. Ursächlich sei, dass die zum Reservoir zeigenden Bereiche beschichtet werden mussten (vgl. Abb. 4.72). Somit wurde die Idee des Faltaufbaus verworfen und für nachfolgende Messreihen Stapelaufbauten genutzt.

### 4.6.5. Anzahl der Auftragszyklen

Um den Aufbau der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase zeiteffizienter zu gestalten, wurde überprüft, welchen Einfluss die Anzahl der Auftragszyklen der leitfähigen Tinte auf die beim Betrieb ausgebildete Zellspannung nimmt. Dazu wurden zwischen einem und fünf Auftragszyklen durchgeführt. Unabhängig von der Anzahl der Auftrags- und somit auch Trocknungszyklen wurden pro Elektrode 500 $\mu$L der leitfähigen Tinten aufgetragen.
Es zeigte sich, dass die Anzahl der Auftragszyklen einen deutlichen Einfluss auf die Ausbildung der Zellspannung bei Betrieb der Brennstoffzelle nahm (Abb. 4.74):

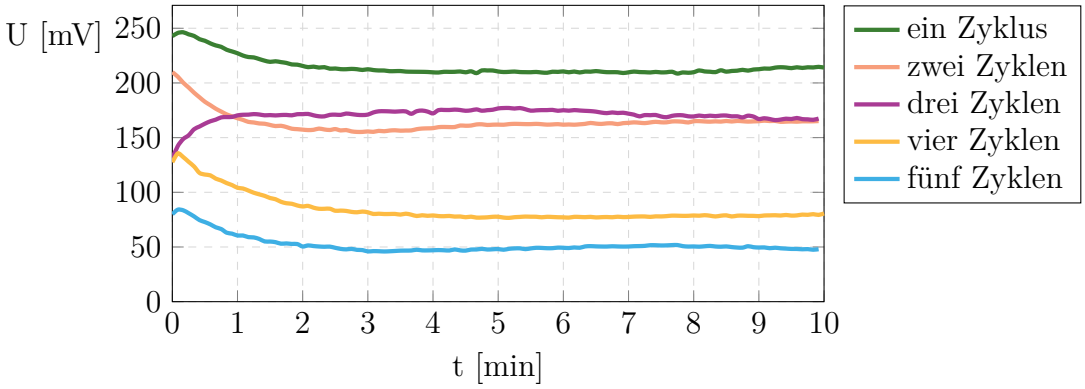



Abbildung 4.74: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit der Auftragszyklen. T = 22 °C.

Wurden die leitfähigen Tinten in einem Zyklus aufgetragen, wurde im Vergleich die höchste Zellspannung erreicht. Je mehr Auftrags- und Trocknungszyklen durchgeführt wurden, umso niedriger war die messbare Spannung bei Betrieb der Brennstoffzelle. Ursächlich dafür könnte sein, dass durch den versetzten Auftrag von kleinen Mengen der leitfähigen Tinten eine ungleichmäßige Schicht auf der Elektrode mit unterschiedlichen Schichtdicken entsteht, die auch durch den unterschiedlichen Trocknungszustand in der Leitfähigkeit beeinträchtigt ist.
Da der Auftrag der Gesamtmenge an leitfähiger Tinte in einem Zyklus deutlich weniger zeitintensiv war und auch zur Ausbildung der vergleichsweise höchsten Spannung führte, wurde diese Vorgehensweise für nachfolgende Messreihen übernommen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass im laborpraktischen Vorgehen auf eine Eppendorf-Pipette verzichtet und stattdessen häufig in Schulen verfügbare Kunststoff-Pipetten genutzt werden können.

### 4.6.6. Notwendigkeit der Tensidzugabe

Um den Aufbau auf die zum Betrieb notwendigen Komponenten zu reduzieren, wurde geprüft, inwiefern das anionische Tensid Natriumdodecylsulfat zur Ausbildung einer Spannung essentiell ist. Dazu wurde eine Messreihe mit sowie ohne Zugabe des besagten Tensids durchgeführt.
Es zeigte sich, dass sowohl mit als auch ohne das Tensid eine Spannung bei Betrieb der Brennstoffzelle anlag (Abb. 4.75). Ohne Tensid wurde eine höhere Spannung als mit gemessen, die maximale Spannung betrug 380 mV.

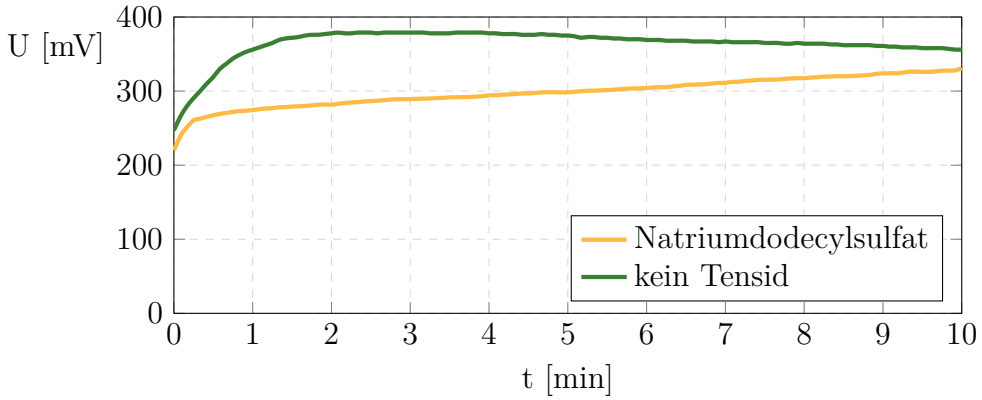



Abbildung 4.75: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit des Tensids. T = 29 °C.

Diese Beobachtung könnte darauf zurückzuführen sein, dass die zwischenmolekularen Wechselwirkungen in den an Anode und Kathode eingesetzten Enzymen durch das Detergens Natriumdodecylsulfat aufgehoben wurden[31] und dieser spannungsmindernde Effekt den positiven Beitrag des Tensids auf die Potentialbildung durch die Oberflächenbenetzung aufhebt.
Demnach wurde beim Aufbau der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase nachfolgend vom Einsatz der Tensid-Komponente abgesehen.

### 4.6.7. Notwendigkeit der Laccase

Da die Oxidationsaktivität des Enzyms an der Anode elementar zur Ausbildung der Spannung ist,[106] wurde vermessen, inwiefern ein Einsatz von Laccase an der Kathode zur Ausbildung der Spannung notwendig ist. Dazu wurden bei 29 °C vergleichende Messreihen mit beziehungsweise ohne Laccase an der Kathode durchgeführt. In beiden Varianten lag eine Zellspannung an. Unter Einsatz von Laccase war diese um ein Drittel höher, als ohne Laccase.

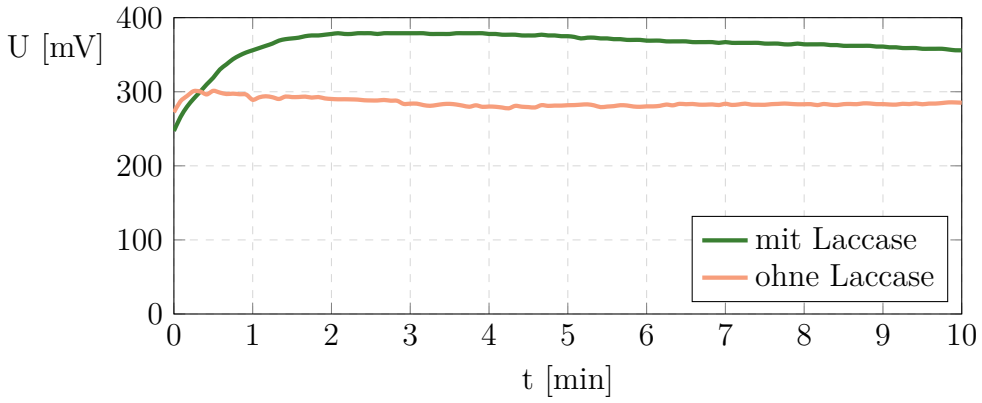



Abbildung 4.76: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase (und Laccase). T = 29 °C.

Da in der Literatur nicht beschrieben ist, welche Substanz in dem vorliegenden Aufbau als eigentliches Substrat wirkt,[66,98] kann an dieser Stelle nur festgehalten werden, dass der Einsatz von Laccase zur Ausbildung einer höheren Spannung führt. Der Einsatz von Laccase in der Schule ist somit fragwürdig, da sie recht teuer und ein kognitives Erschließen des Versuchs nicht vollständig möglich ist, was für Lernende unbefriedigend sein kann.
Dennoch wurde die Verwendung von Laccase für nachfolgende Messreihen zunächst beibehalten.

### 4.6.8. Variation der Elektrodenflächen

Da die Aufbau des Versuchs zur enzymatischen Brennstoffzelle in dem geringen Maßstab hohe feinmotorische Kompetenzen voraussetzt, wurde eine Hochskalierung des Aufbaus erwogen. Es war von Interesse, inwiefern es zu einer Leistungssteigerung der Brennstoffzelle käme.
Dazu wurden Elektroden der Maße 2x2 cm, 2x3 cm und 3x3 cm zum Aufbau der Zelle genutzt. Die zum Beschichten benötigten Volumina an leitfähigen Tinten wurden entsprechend angepasst.
In allen gewählten Maßstäben lag bei Betrieb der Brennstoffzelle eine messbare Spannung an. Mit dem herkömmlichen Format der Elektroden der Maße 2x2 cm wurde eine deutlich höhere Zellspannung gegenüber den größeren erprobten Formate vermessen. Auffällig war, dass innerhalb der Einzelmessungen starke Schwankungen der Messwerte auftraten und kaum kohärente Messkurven aufgenommen werden konnten. Eine mögliche Ursache kann in der Alterung der Enzyme während der Lagerung im Gefrierfach bestanden haben.

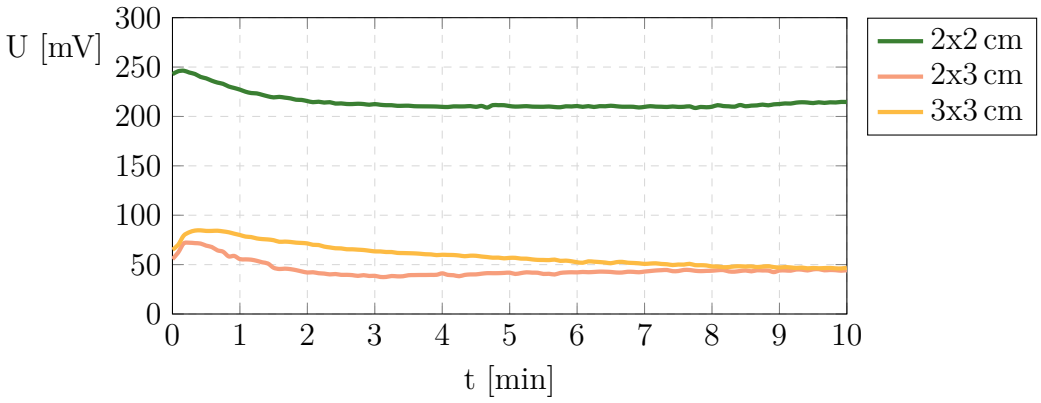



Abbildung 4.77: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit der Elektrodenflächen. T = 22 °C.

Daher wurde vermutet, dass neben der zur Verfügung stehenden Elektrodenfläche die Fixierung, mit der der Brennstoffzell-Stapel gehalten wird, von Bedeutung war: Beim Aufbau der Grundmaße 2x2 cm werden die Kontaktflächen zwischen Elektroden und Reservoir offenbar besser stabilisiert, als bei den Aufbauten der größeren Maße. Daher wurde bei Fixierung mithilfe von Foldback-Klammern weiterhin eine Grundfläche von 2x2 cm an Elektroden verwendet.

### 4.6.9. Zwischenfazit zur enzymatischen Brennstoffzelle mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Ansatz von Ge u. a. [98] einer enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase mit Filterpapier-Elektroden hinsichtlich einiger Aspekte variiert und hinsichtlich schulrealer Begebenheit angepasst. So konnte die Zeit zur Präparation der Elektroden durch die Reduktion von mindestens vier auf **einen** Auftrags- und Trocknungszyklen und somit von mindestens 40 min auf 10 min verkürzt werden. Durch dieses Vorgehen ist es auch möglich, anstelle der sonst zur Präparation hilfreichen Kolbenhub-Pipette eine einfache Kunststoff-Pipette zu verwenden. Weiterhin wurde Aktivkohle als geeignetes Substitut für die kostspieligen CNTs gefunden. Durch die vorgenommenen Veränderungen ist der Kostenaufwand pro Klassensatz für 30 Lernende von etwa 55 Euro auf 15 Euro reduziert.
Als geeignetste Variante wurde der Stapelaufbau identifiziert, bei dem die 2x2 cm großen Filterpapier-Elektroden in einem einmaligen Auftrags- und Trocknungszyklus mit einer leitfähigen Tinte aus destilliertem Wasser, Aktivkohle und dem entsprechendem Enzym beschichtet wird.

Es spiegelte sich in den Messdaten sehr deutlich wieder, dass die Temperatur einen erheblichen Einfluss auf die Aktivität der genutzten Enzyme hat, da sich in vergleichbaren Versuchsaufbauten bei 29 °C höhere Zellspannungen als bei 22 °C einstellten (vgl. Abb. 4.69 grün, Abb. 4.74 gelb).
Bezogen auf die maximale Spannung des beschriebenen Aufbaus bei 22 °C wurde ein Spannungswirkungsgrad $\eta_U$ berechnet[14]

$$\eta_U = \frac{0.246\ V_{max}}{1.68\ V} = 0.15 \tag{4.15}$$

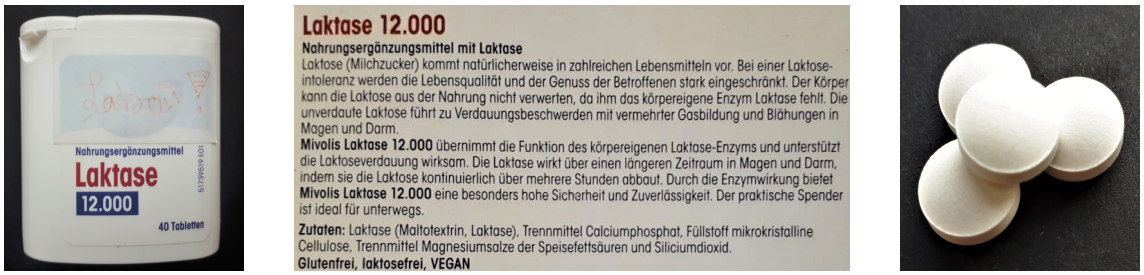
Dem niedrigen mit dem einfachen Versuch erreichten Spannungswirkungsgrad ist hinzuzufügen, dass die benötigten Enzyme kostenintensiv in der Anschaffung (ca. 15 Euro pro Klassensatz) und zeitlich begrenzt, tiefgekühlt lagerfähig sind.

Daher wird im nachfolgenden Abschnitt eine Brennstoffzelle vorgestellt, die mit Enzymen aus der Drogerie auskommt.

[14] Es handelt sich um eine (grobe) Näherung, da die Messungen im Rahmen der Arbeit nicht unter (Temperatur-)Standardbedingungen erfolgten.

## 4.7. Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase

Der im vorherigen Kapitel vorgestellte und weiterentwickelte Stapelaufbau einer enzymatischen Brennstoffzelle bleibt durch die notwendigen Enzyme (zu) kostenintensiv für den Einsatz im schulischen Regelunterricht. Da die genutzten Enzyme $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase zudem empfindlich und schwierig zu lagern sind, bestand im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Intention, alternative enzymatische Reaktionen zum Betrieb einer Brennstoffzelle zu nutzen.
Die Idee war das Enzym Lactase zu verwenden, da dieses in Tablettenform kostengünstig in Drogerien und Apotheken erhältlich sowie in dieser Form bei Raumtemperatur einige Zeit lagerfähig ist. Neben Lactase sind in der Tablette Maltotextrin, Calciumphosphat, Cellulose, Magnesiumsalze aus Speisefettsäuren und Siliciumdioxid als Begleitstoffe enthalten (vgl. Abb. 4.78, (b)). Die enthaltene Lactase wird vermutlich aus der Hefe *Kluyveromyces lactis* gewonnen,[107,108] der Ursprung ist jedoch nicht explizit gekennzeichnet.




(a) Verpackung (b) Inhaltsstoffe (c) Tabletten

Abbildung 4.78: Ansichten des für die Messreihen genutzten Lactase-Präparats.

Der Zahlenwert 12.000 auf der Verpackung gibt an, dass 12 000 *Food Chemical Codex-Einheiten* (FCC) pro Tablette enthalten sind. Dieser Wert bemisst die Enzymaktivität. Es gilt der Richtwert, dass 1000 FCC-Einheiten Lactase bei 37 °C pro Minute 5 g Lactose spalten können[109] [15].
Für die Messreihen wurden die Tabletten mit dem höchsten verfügbaren Lactase-Anteil und somit der höchsten Enzymaktivität gewählt, um die Einwaagen in die leitfähigen Tinten zur Elektrodenbeschichtungen der Brennstoffzellen möglichst gering zu halten und möglichst geringe Mengen an Begleitstoffen in die Zelle einzubringen. Neben der Erfüllung bereits im Zusammenhang anderer biologischer Brennstoffzellen angeführten schulpraktischen Kriterien (z.B. Abschnitt 4.4.3) bestand die Intention der Messreihen zum Stapelabbau in Abschnitt 4.7.3 darin,

[15] Wissenschaftlich gebräuchlich zur Angabe der Enzymaktivität ist die Einheit Katal (kat). Ein Katal entspricht dabei dem Umsatz eines Mol Substrats pro Sekunde.[110]

- Möglichkeiten zur Stabilisierung der Elektroden-Kontaktflächen zu finden.
- zu überprüfen, ob die im Leitungswasser befindlichen Ionen Einfluss auf die Enzymaktivität und somit Zellspannung nehmen.

Dazu wurden zunächst Vorversuche zur Überprüfung der Aktivität von Lactase-Präparat sowie vergleichend reiner Lactase durchgeführt. Ebenso wie mutmaßlich die in den Tabletten eingesetzte Lactase stammt die genutzte, reine Lactase aus der Hefe *Kluyveromyces lactis*. Sie liegt in Glycerin gelöst vor. Anschließend wurde mit dem Lactase-Präparat ein Stapelaufbau einer EFC realisiert, der hinsichtlich der Enzymeinwaage, der Fixierung des Stapels, des verwendeten Tensids und des Lösemittels variiert wurde.

Zur Beschreibung der jeweiligen Varianten wurde jeweils zunächst die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 10 min mit dem Messwerterfassungssystem „Pocket Cassy“ dreifach bestimmt. Die Stromstärken lagen unterhalb des Messbereiches des Pocket Cassy, sodass keine entsprechenden Messreihen aufgenommen wurden.

### 4.7.1. Aufbau und Wirkungsweise des Enzyms Lactase

Das Metallionen-aktivierte Enzym Lactase ist eine $\beta$-D-Galactosidase[110,111] [16]. Es kommt sowohl in Hefen, tierischen Dünndarmepithelzellen als auch in Bakterien vor.[31,110] Je nach Herkunft weist die $\beta$-Galactosidase eine Molmasse zwischen 90 000 und 700 000 $\frac{g}{mol}$ auf.[107] Die $\beta$-D-Galactosidase ist ein Tetramer aus vier identisch aufgebauten Polypeptidketten, die je nach Herkunft aus unterschiedlich vielen Aminosäuren bestehen.[112] Aus der Hefe *Kluyveromyces lactis* extrahierte Lactase, wie sie auch in handelsüblichen Tabletten enthalten ist, setzt sich aus vier identischen Polypeptidketten zu je 1024 Aminosäuren zusammen.

In Abbildung 4.79 A ist die Struktur der $\beta$-Galactosidase aus der Hefe *Kluyveromyces lactis* schematisch dargestellt, wobei jeder der vier identischen Polypeptidketten eine Farbe zugeordnet ist. In B sind die Bereiche einer Polypeptidkette nach Funktionalität koloriert. Der blaue gekennzeichnete Bereich (Domain 3) erstreckt sich von der Aminosäure 333 bis 642, bildet eine 20 $\AA$ tiefe, taschenförmige Einkerbung und entspricht dem katalytisch aktiven Zentrum.[108] Dadurch ist offenbar eine Spezifität für das Disaccharid-Substrat gegeben. Alle katalytisch relevanten Komponenten sind in der Nähe dieser Einkerbung lokalisiert. Dort finden sich Bereiche zur Bindung mono- und divalenter Ionen, wie Natrium-, Kalium- sowie Magnesium-Kationen.[113]

[16] In der vorliegenden Arbeit werden die Begriffe *Lactase* und *$\beta$-Galactosidase* synonym verwendet.

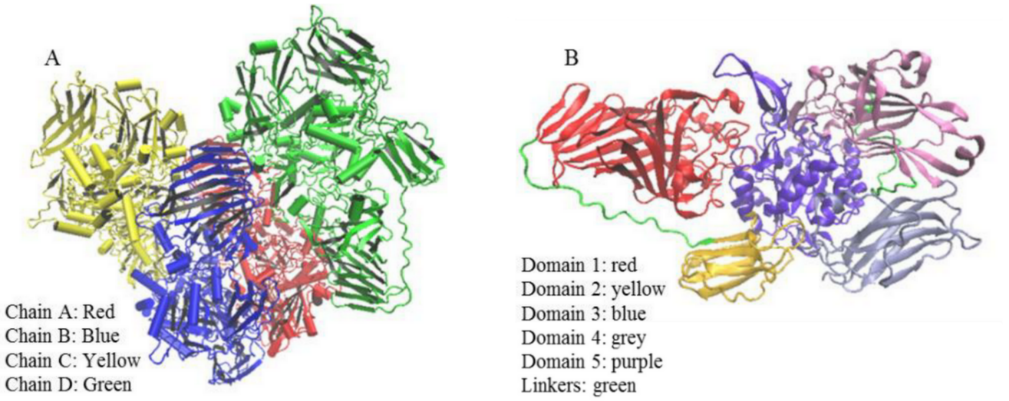



Abbildung 4.79: Strukturen der $\beta$-Galactosidase aus der Hefe *Kluyveromyces lactis*. Entnommen aus Porciúncula González u. a. [108, S. 79].

Die Magnesium-Ionen werden als Co-Faktoren benötigt und erhöhen die Enzymaktivität um den Faktor 1000.[108,114] Es gibt zwei überlappende, aber unterschiedliche Bindungsbereiche für die Galactosyl-Gruppe des Substrats, einen oberflächlicheren und einen weiter innen gelegenen mit spezifischen Wasserstoffbrücken zwischen Enzym und Substrat. Der Bindungsbereich der Glucosyl-Gruppe ist bislang nicht definiert.[113]

Die Aufgabe des Enzyms $\beta$-D-Galactosidase besteht in der hydrolytischen Spaltung des Disaccharids Lactose in die Monosaccharide Galactose und Glucose[31,112,113] sowie der Überführung von Lactose in das Disaccharid Allolactose.[31,112,113,115,116] Insbesondere in Gegenwart von Glucose können auch andere Di- und Polysaccharide in geringem Maße gebildet werden.[113] Dabei spaltet die $\beta$-D-Galactosidase $\beta$-glykosidische Bindungen von Oligosacchariden spezifisch an Galactoseresten.[31] Der Hydrolyse von Lactose durch $\beta$-Galactosidase ist $K_M$-Wert von 4.0 zugeordnet, was einer mittleren Affinität des Enzyms zum Substrat entspricht[110][17].

Bei der Hydrolyse von Lactose liegen die Produkte nach einer zweischrittigen Umsetzung (Abb. 4.80) in der gleichen stereochemischen Anordnung wie die Edukte vor.[113] Der in Abbildung 4.80 skizzierte Zwei-Schritt der Reaktion wurde bereits im Jahr 1953 von Koshland [117] vorgeschlagen, der Ablauf ist jedoch noch nicht im Detail entschlüsselt.[113] Das aktive Zentrum beinhaltet zwei Glutaminsäure-Reste. Einer liegt protoniert vor und unterstützt durch Übertrag des Protons an das Sauerstoff-Atom des anomeren Kohlenstoffatoms und die Bildung eines ionischen Enzym-Carbenium-Intermediates die Abspaltung eines Aglycons vom Galactosyldo-

[17] Mit der Michaelis-Konstante $K_M$ wird die Substratkonzentration bezeichnet, bei der die Reaktionsgeschwindigkeit die Hälfte des Maximalwertes erreicht. Der Wert wird einzelnen Enzymreaktionen spezifisch zugeordnet.[31]

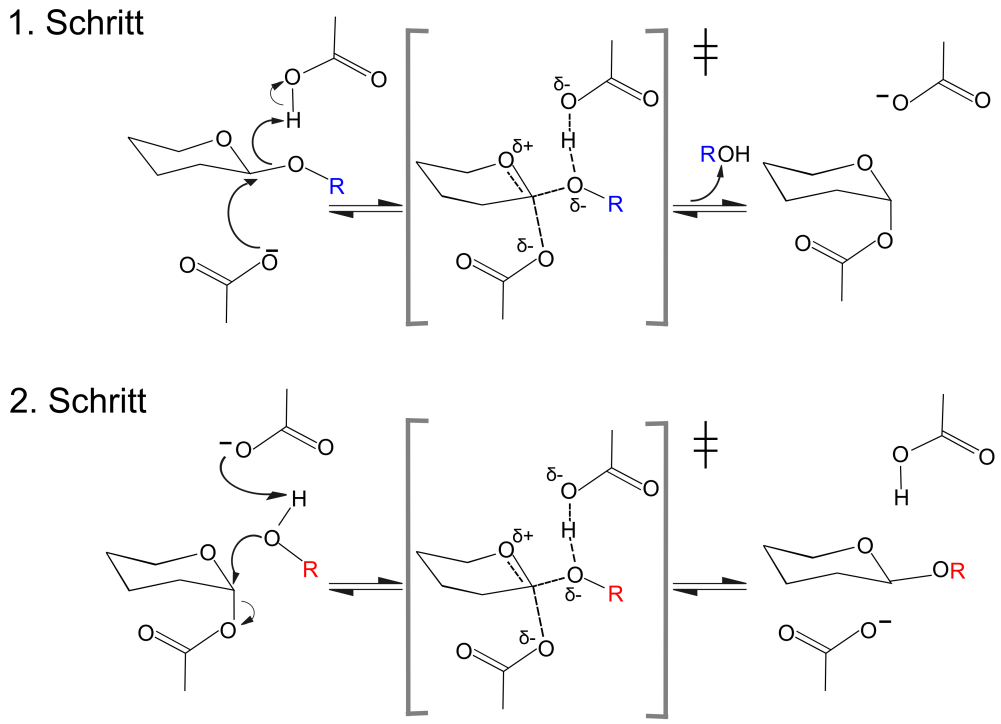



Abbildung 4.80: Mechanismus der Hydrolyse von Lactose durch $\beta$-Galactosidase aus der Hefe. Adaptiert nach Porciúncula González u. a. [108, S. 82].

nor, im Falle von Lactose als Substrat also die Freisetzung von Glucose. Zeitgleich stabilisiert der zweite Glutaminsäure-Rest das Oxonium-Ion. Anschließend greift Wasser oder ein anderes Nucleophil an, sodass sich ein neues Glycosyl ausbildet.[108,113]

Weiterhin ist bekannt, dass Galactose-Moleküle als kompetitive Inhibitoren und Glucose-Moleküle als nicht kompetitive Inhibitoren wirken.[111] Spezielle Heferasen können Lactose zu Ethanol umsetzen.[118] Das pH-Optimum bei Lactase aus Hefen ist im Bereich von pH 6.5-7,[107,108] das Temperaturoptimum ist im Bereich von 30-35 °C verortet.[108]

### 4.7.2. Nachweis der Aktivität von Lactase-Darreichungsformen

Bislang ist nicht in der Literatur beschrieben, in welchem Schritt der enzymatischen Aktivität der Lactase Protonen beziehungsweise Elektronen freigesetzt werden. Jedoch gilt $NAD^+$ als häufiger Co-Faktor, der während der Substratoxidation reduziert und nach Elektronenübertrag an eine Elektrode regeneriert vorliegt.[61] NAD(P)-abhängige, konjugierte Redox-Prozesse zur enzymatischen Transformierung von Lactose wurden als aussichtsreich hinsichtlich einer Nutzung in technischen Verfahren gekennzeichnet.[119] Dennoch ist bislang nicht belegt, ob $NAD^+$ diese Funktion in Zusammenhang mit der $\beta$-Galactosidase-Aktivität erfüllt.
Die Entstehung von Säuren beim Abbau der Lactose ist jedoch beschrieben, sodass in der Mikrobiologie der pH-Indikator Phenolrot zur Differenzierung zwischen (nicht-) Galactosidase-produzierenden Mikroorganismen genutzt wird.[107] Moleküle des Farbstoffes Phenolrot weisen zwei Hydroxy-Gruppen und einen kaum stabilen Soltonring auf, sodass im wässrigen Medium eine chinoide Struktur vorliegt (vgl. Abb. 4.81). Durch Protonierung des Moleküls setzt ein Farbwechsel von rot zu gelb ein, der dem pH-Bereich zwischen 8.2 und 6.4 zugeordnet ist.[120]

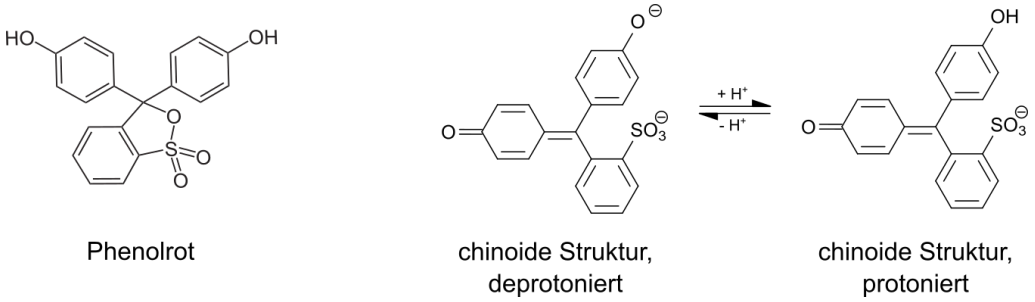
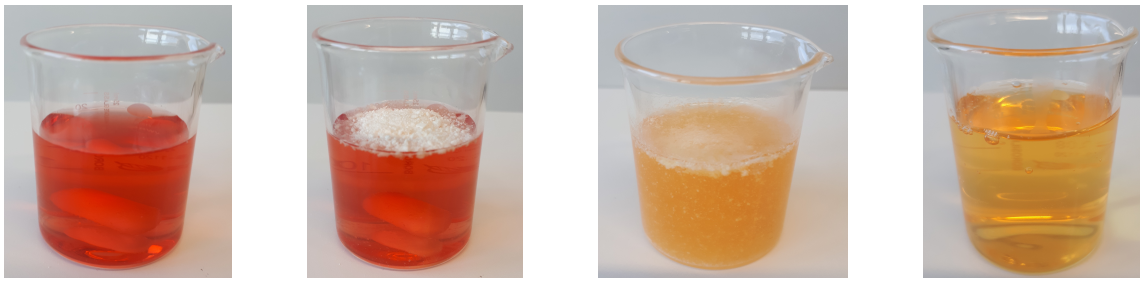



Abbildung 4.81: Strukturen des Phenolrot-Moleküls.

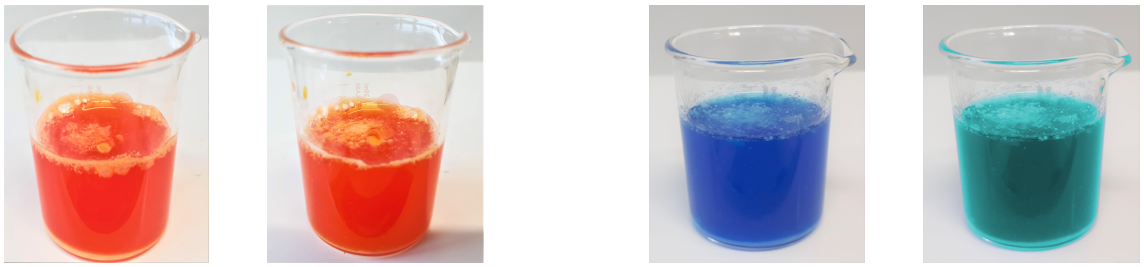
Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst die Aktivität des Lactase-Präparates in Tablettenform sowie die von in Glycerin gelöster reiner Lactase aus der Hefe *Kluyveromcyces lactis* untersucht. Dazu wurde ebenfalls Phenolrot genutzt, um zu überprüfen, ob die jeweiligen Enzym-Präparate enzymatisch aktiv sind.
Anhand der in Abbildung 4.82 dokumentierten Farbveränderung der Indikator-Lösung wurde eine Galactosidase-Aktivität des Enzym-Präparats in Tablettenform nahegelegt, da ein Farbwechsel von rot zu gelb stattfand. Dieser Farbwechsel setzte bei 37 °C nach etwa 20 s ein, bei Raumtemperatur von 22 °C nach etwa 70 s.
Um auszuschließen, dass die Begleitstoffe des Enzyms im Präparat maßgeblich für die detektierte pH-Änderung ursächlich sind, wurde selbiger Versuch mit Enzym-



(a) Indikator-Lösung (b) Enzym-Zugabe (c) Farbumschlag (d) Filtrierte Lösung

Abbildung 4.82: Nachweis der pH-Aktivität von Lactase-Präparat mit Phenolrot in verschiedenen Stadien.

Präparat wiederholt, das zuvor mit dem Ziel der Inaktivierung thermisch behandelt worden war. In diesem Fall setzte über einen Zeitraum von 30 min keine Farbänderung der Lösung ein (vgl. Abb. 4.83, links).



(a) t = 0 min (b) t = 30 min (c) t = 0 min (d) t = 240 min

Abbildung 4.83: *Links:* Test der pH-Aktivität mit zuvor thermisch behandeltem Enzym-Präparat; *rechts:* Nachweis der Redox-Aktivität mit Methylenblau.

Bei Verwendung von reiner Lactase aus der Hefe *Kluyveromcyces lactis* setzte ebenfalls ein entsprechender Farbwechsel ein. Dieser trat jedoch bei 37 °C nach etwa 5 min ein, bei Raumtemperatur von 22 °C nach etwa 15 min.
Ursächlich für diese Differenz gegenüber des Versuchs mit der gemörsterten Enzym-Präparat-Tablette kann die jeweilige Enzymaktivität sowie das Vorhandensein des Co-Faktors Magnesium im Enzympräparat sein: In einer Tablette des Enzympräparats sind 12 000 FCC-Einheiten enthalten, was etwa 342 kat entspricht, sodass pro Sekunde 342 mol beziehungsweise 1 g Lactose umgesetzt werden können. Laut Herstellerangabe verfügt die reine Lactase in Glycerin über eine Enzymaktivität von 2600 $\frac{units}{g}$, was wiederum $4.3 \cdot 10^{-5}$ $\frac{kat}{g}$ entspricht. Ein Hochskalieren der Menge eingesetzter reiner Lactase und somit der einhergehenden Aktivität war wirtschaft-

lich nicht vertretbar. Sie kam vielmehr als Indikator zum Einsatz, ob beobachtete Effekte oder Messwerte auch in der Lactase und nicht ausschließlich in Begleitstoffen des Präparats begründet sind. In anschließenden Aufbauten der EFC wurde das Lactase-Präparat gegenüber der reinen Lactase bevorzugt genutzt.

Zusammenfassend konnte experimentell bestätigt werden, dass die Aktivität der Lactase ursächlich für die Absenkung des pH-Wertes und den einhergehenden Farbwechsel der Indikator-Lösung war. Die genaue Herkunft der während der enzymatischen Aktivität freigesetzten Protonen ist nicht bekannt.

Darüber hinaus sollte überprüft werden, ob durch die Aktivität der Lactase Elektronen freigesetzt werden, wie es zum Betrieb einer enzymatischen Brennstoffzelle erforderlich ist. Zu diesem Zweck wurden anstelle des pH-Indikators Phenolrot die Redox-Indikatoren Methylenblau sowie Neutralrot eingesetzt (vgl. Abb. 4.29 und Abb. 4.30). Eine mit Neutralrot versetzte Suspension änderte kurz nach Zugabe des Enzym-Präparats ihre Farbe von rot zu karminrot, was auf einen Elektronenübertrag hinwies.[121] Eine mit Enzym-Präparat versetzte Methylenblau-Lösung hingegen wurde binnen vier Stunden nicht farblos. Zwar ist im Vergleich der Methylenblau-Lösung vor Zugabe des Enzym-Präparats mit dem nach vier Stunden erstellten Filtrat ein Unterschied der Intensität der Blaufärbung zu erkennen (Abb. 4.83, rechts), der jedoch auch auf Adsorption von Methylenblau an im Präparat vorhandene Begleitstoffe zurückzuführen sein könnte. Bei Einsatz reiner Lactase in Glycerin setzte kein Farbwechsel der Indikator-Lösung ein.

Ergänzend zu diesen makroskopischen Beobachtungen wurden mit dem Spektralphotometer *Specord 200 Plus* Absorptionsspektren im Bereich von 350-800 nm analoger Ansätze zum Test der Redox-Aktivität von Lactase-Präparat sowie reiner Lactase mit Methylenblau über einen Zeitraum von 90 min aufgenommen (Abb. 4.84 und Abb. 4.85). Es sollte überprüft werden, ob sich die Absorption am Absorptionsmaximum des Methylenblaus von 660 nm[122] und somit die Konzentration im zeitlichen Verlauf verändert. Dies könnte ein Indiz für die Reduktion von Methylenblau-Molekülen zu Leukomethylenblau-Molekülen und somit eine Redox-Aktivität von Lactase sein.
Die Konzentration der Indikator-Lösung wurde so angepasst, dass das Absorptionsmaximum des Methylenblaus im Spektrum gut ersichtlich war. In den Ansätzen lag Methylenblau in der Konzentration von 0.00004 $\frac{mol}{L}$ vor. Daher wurde vorab die Absorption einer Methylenblau-Lösung selbiger Konzentration als Referenzspektrum aufgenommen. Der Testansatz mit Lactase-Präparat wurde zunächst filtriert, ehe

im Intervall von 5 min die Absorption im Bereich von 350-800 nm bestimmt wurde. In Abbildung 4.84 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht alle Messreihen aufgenommen worden.

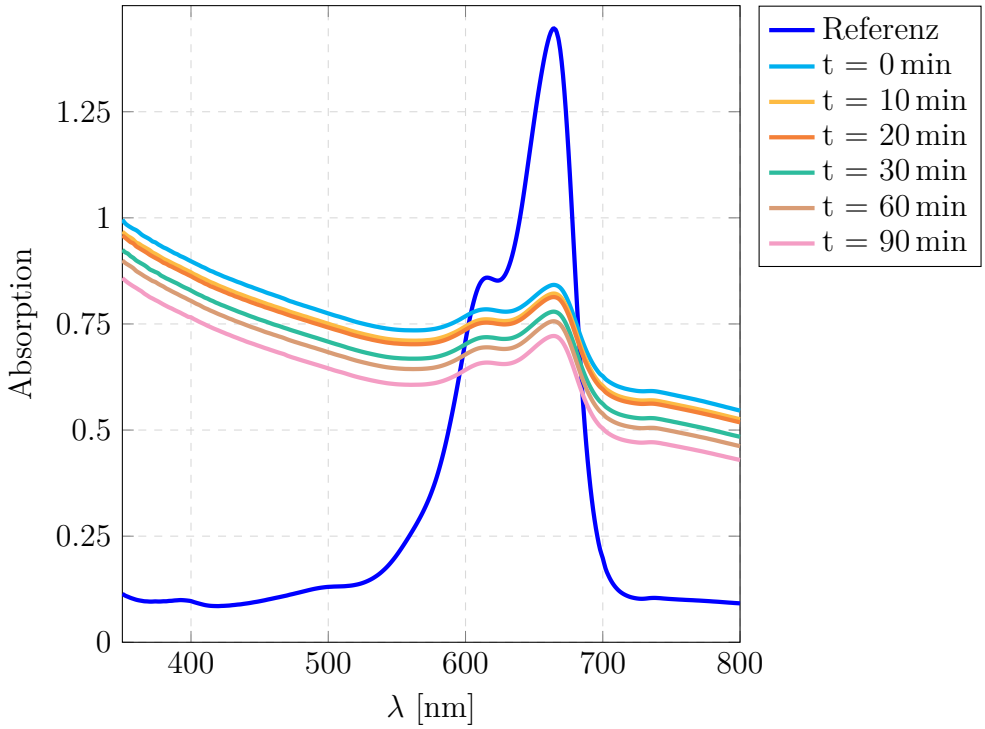



Abbildung 4.84: Absorptionsspektren zum Test der Redox-Aktivität von Lactase-Präparat unter Verwendung von Methylenblau-Indikator.

Es wurde jedoch deutlich, dass bereits zum Messzeitpunkt t = 0 min das Absorptionsmaximum von Methylenblau deutlich geringer ausgeprägt war. Ursächlich kann neben der Reduktion von Methylenblau-Molekülen wiederum die Adsorption von Methylenblau an Begleitstoffen aus dem Enzym-Präparat sein, die durch den Filtrationsschritt aus der Suspension entfernt worden sind. Im Verlaufe der Messzeit nahm die Absorption am Maximum des Methylenblaus und somit die Konzentration an Methylenblau jedoch weiter ab - was wiederum auf eine fortschreitende Reduktion von Methylenblau-Molekülen hinweisen kann.
Da scheinbar Begleitstoffe des Enzym-Präparats mindestens im Bereich von 350-600 nm absorbieren, wurde der Versuch ebenfalls mit reiner Lactase durchgeführt. Auf den Filtrationsschritt konnte hier verzichtet werden, da die reine Lactase gelöst vorlag. Das genaue Vorgehen ist in Anhang B dokumentiert. In Abbildung 4.85 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit ebenfalls nicht alle Messreihen dargestellt.
Auch in dieser Versuchsanordnung nahm die Absorption der Probe bei einer Wellenlänge von 660 nm im Verlauf der Zeit ab.

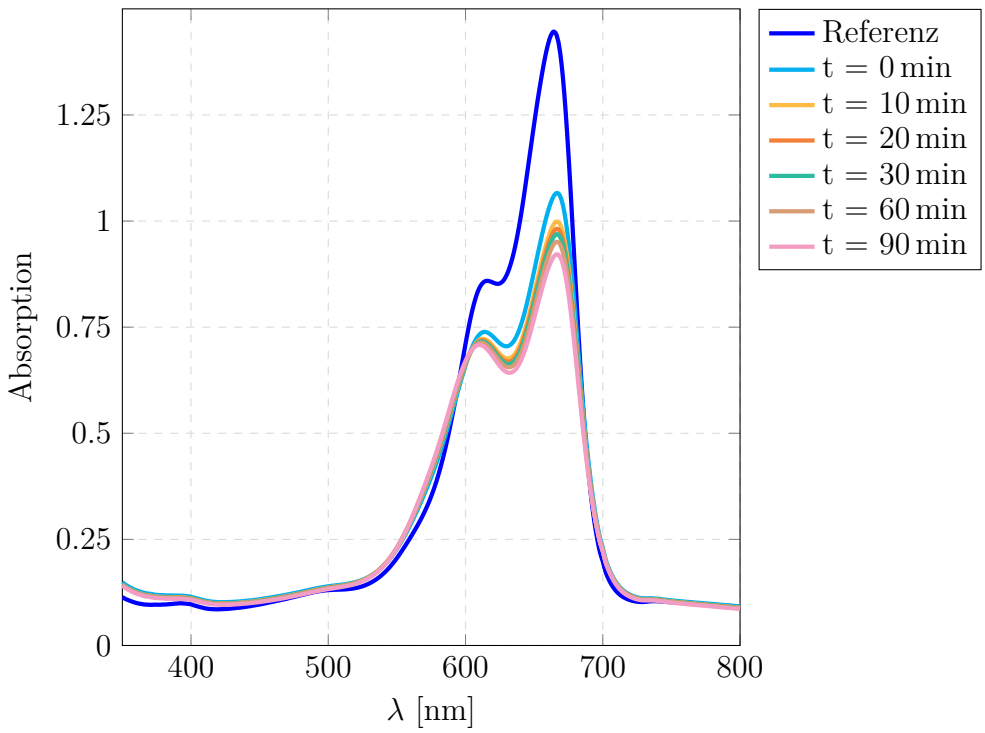



Abbildung 4.85: Absorptionsspektren zum Test der Redox-Aktivität von reiner Lactase unter Verwendung von Methylenblau-Indikator.

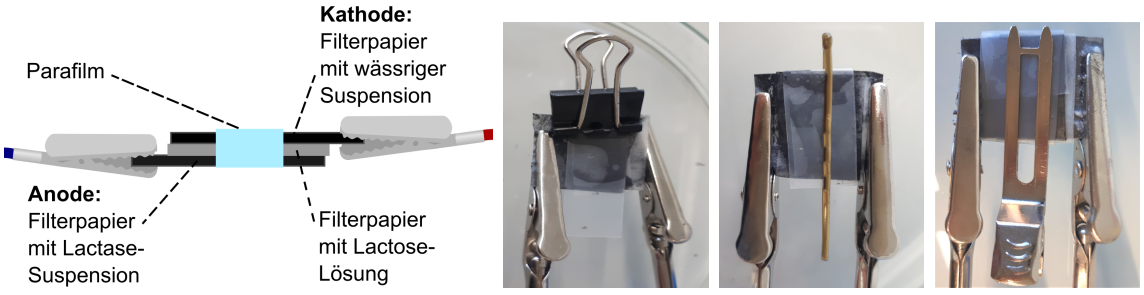
Die verringerte Methylenblau-Konzentration könnte in beiden Szenarien auf die Reduktion von Methylenblau-Molekülen und somit eine Redox-Aktivität der Lactase zurückzuführen sein.

Da eine Freisetzung von Protonen bei der enzymatischen Aktivität nachgewiesen und die von Elektronen nicht ausgeschlossen wurde, ist das Lactase-Präparat zur Realisation von lowcost EFC im Stapelaufbau erprobt worden.

### 4.7.3. EFC mit Lactase im Stapelaufbau

#### 4.7.3.1. Variation der Zellfixierung

In Anlehnung an Ge u. a. [98] wurde zur Fixierung des mit einem Parafilmstreifen ummanteltem Stapelaufbaus eine Foldback-Klammer genutzt. Trotz Platzierung der EFC auf einer umgedrehten Petrischale zur Stabilisierung stellten sich meist keine konstanten Spannungen ein, sie schwankten bereits bei geringen Erschütterungen. Daher wurde die Art der Fixierung dahingehend variiert, möglichst über die gesamte Elektrodenbreite eine gleichmäßige Kontaktfläche zwischen den Elektroden und dem Reservoir zu gewährleisten.
Dazu wurden Aufbauten sowohl mit der Foldback-Klammer als auch mit einer Haarnadel sowie einer Haarklemme als alltagsnahe Materialien zur Zellfixierung getestet (vgl. Abb. 4.86).




(a) Schematischer Aufbau (b) Foldback-Klammer (c) Haarnadel (d) Haarklemme

Abbildung 4.86: Variation der Zellfixierung der EFC mit Lactase im Stapelaufbau.

In allen drei Varianten waren Spannungen messbar, die in Abbildung 4.87 dargestellt sind. Sowohl mit der Haarnadel als auch der Haarklemme wurden etwa doppelt so hohe Zellspannungen gemessen wie bei Fixierung mit einer Foldback-Klammer. Scheinbar wurde in diesen Fällen ein besserer Kontakt zwischen den Elektroden und dem Reservoir erzielt. Insbesondere die Messungen mit der Fixierung des Stapelaufbaus durch die Haarklemme unterlagen weniger Schwankungen, sodass diese Art der Fixierung insgesamt am stabilsten zu sein schien. Unter Verwendung einer Foldback-Klammer wurde nach 10 min eine Stromstärke von 1.4 $\mu$A, beziehungsweise von 2.8 $\mu$A bei Nutzung einer Haarnadel und 3.4 $\mu$A bei Fixierung des Aufbaus mit einer Haarklemme gemessen. Die ergänzende Idee, den gesamten Aufbau auf einem Objektträger wurde aufgrund sehr niedriger Messwerte verworfen. Ursächlich dafür könnte eine Beteiligung von Luftsauerstoff an der Kathodenreaktion sein, dessen Zufuhr bei Verwendung eines Objektträgers verringert wird.

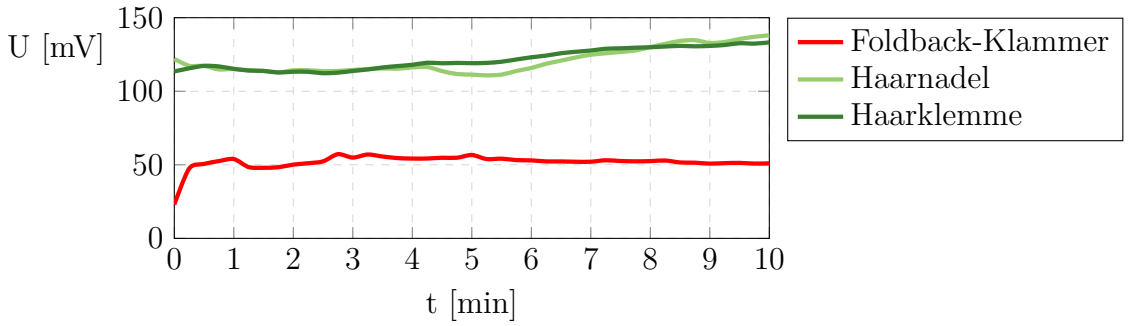



Abbildung 4.87: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit der Fixierung. T = 20 °C.

Da zudem der praktische Umgang mit der Haarklemme deutlich einfacher war als mit der Haarnadel, wurden die Stapelaufbauten nachfolgender Messreihen damit fixiert.

#### 4.7.3.2. Variation der Einwaage des Enzym-Präparats

Zur Überprüfung der Beteiligung des Enzym-Präparats am Aufbau einer Zellspannung wurde die Einwaage dessen zwischen 0 mg und 350 mg variiert, wobei letzteres der Masse einer Tablette entspricht. Die Einwaage bezieht sich auf den Ansatz zur Fertigung dreier Elektroden, sodass bei letztgenannter Einwaage etwa 115 mg tatsächlich auf eine Filterpapier-Anode aufgetragen wurde (vgl. Tab. 4.12).

| **Einwaage pro Ansatz [mg]** | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Auftrag pro Anode [mg]** | 0 | 17 | 33 | 50 | 67 | 83 | 100 | 117 |

Tabelle 4.12: Übersicht über die Einwaagen beziehungsweise den Auftrag des Lactase-Präparats.

Die gemessenen Zellspannungen sind in Abbildung 4.88 aufgeführt. Wurde kein Enzym-Präparat genutzt, lag kurzzeitig eine negative Spannung an, die ab etwa 1.5 min gegen Null ging. Bei Einsatz des Enzym-Präparats an der Anodenseite konnte hingegen für jede der Einwaagen eine unterschiedlich ausgeprägte Spannung gemessen werden. Dabei war kein proportionaler Zusammenhang ersichtlich: Sowohl bei den niedrigen gewählten Einwaagen als auch der höchsten Einwaage wurden geringere Spannungen gemessen. Bei einer Einwaage von 300 mg wurde die höchste Spannung mit $U_{max} = 230$ mV erreicht, die über die Dauer der Messung annähernd konstant blieb.

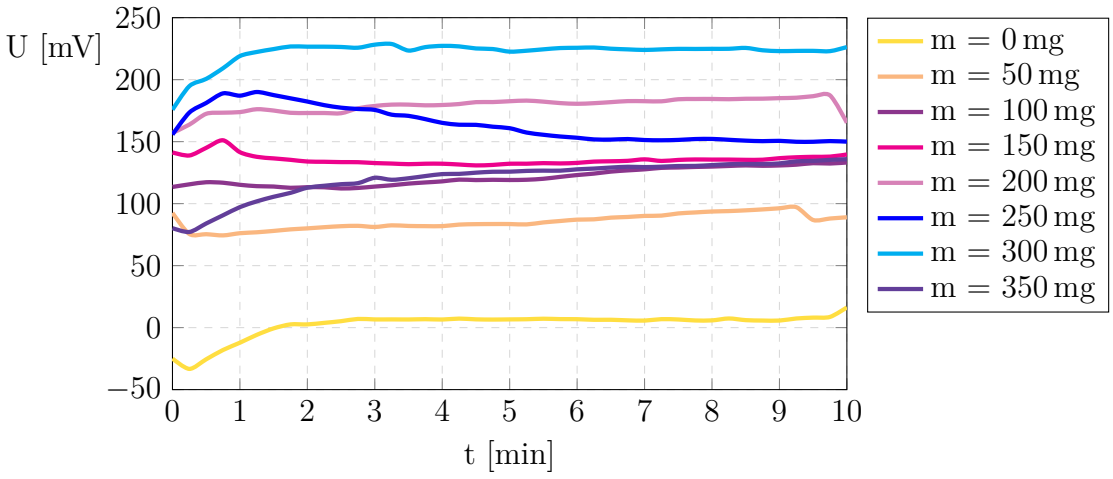



Abbildung 4.88: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase unter Verwendung einer Haarklemme in Abhängigkeit der Einwaage. T = 20 °C.

Die Messdaten lieferten einen Hinweis darauf, dass eine Mindest-Dichte an Enzym-Präparat zum Ausbilden einer Zellspannung nötig war. Bei der höchsten gewählten Einwaage könnte die Schichtdicke des aufgetragenen Enzyms einen effizienten Elektronentransfer auf die Elektrode und somit auch die Ausbildung der Zellspannung beeinträchtigt haben. Die nach zehn Minuten mit einem Digitalmultimeter vermessenen Stromstärken sind in Tabelle 4.13 aufgeführt. Daraus ist ebenfalls kein eindeutiger Trend ersichtlich.

| **Einwaage pro Ansatz [mg]** | 0 | 50 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Stromstärke [$\mu$A]** | - | - | 2.1 | 2.6 | 3.4 | 3.1 | 3.4 | 2.3 |

Tabelle 4.13: Übersicht der den Einwaagen des Lactase-Präparats entsprechenden Stromstärken. T = 20 °C.

Weitere Messreihen wurden mit der Einwaage von 300 mg Enzym-Präparat bezogen auf die Fertigung dreier Brennstoffzellen fortgeführt.

#### 4.7.3.3. Verwendung thermisch behandelter Enzym-Präparate

Es blieb unklar, ob die Ausbildung der Spannung tatsächlich auf die enzymatische Aktivität der Lactase zurückzuführen war. In den Tabletten sind gemäß Herstellerangaben neben Lactase auch Maltodextrin, Calciumphosphat, Cellulose, Magnesiumsalze von Speisefettsäuren und Siliciumdioxid enthalten. Es wurde vergleichend ein

Ansatz der Einwaage von 300 mg Enzym-Präparat bezogen auf die Fertigung dreier Brennstoffzellen angesetzt und für zwei Minuten gekocht. Durch diese thermische Behandlung wurden die enthaltenen Enzyme denaturiert und somit deaktiviert.[123] Tatsächlich lag bei anodenseitiger Verwendung des thermisch behandelten Enzym-Präparats eine niedrigere Spannung an (Abb. 4.89 orange). Zu Beginn der Messung wurde ein Spannungsmaximum von 45 mV erreicht, ehe die Spannung auf einen Wert von 20 mV abnahm.

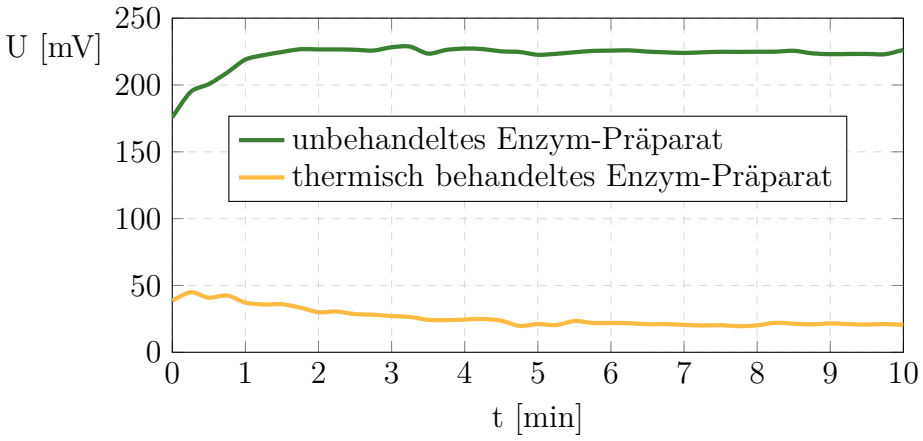



Abbildung 4.89: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit der vorausgehenden Behandlung des Enzym-Präparats. T = 20 °C.

Diese Messungen legen nahe, dass die in den Enzym-Präparat enthaltenen Begleitstoffe nur einen geringen Anteil auf die Potentialbildung in der vorgestellten EFC haben. Die eingesetzten Lactase-Enzyme scheinen maßgeblich an der Ausbildung und Höhe der Zellspannung beteiligt zu sein.

#### 4.7.3.4. Variation des Tensids

Wie auch bei der MFC mit Milchsäure-Kulturen-Präparat und der EFC mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase wurde in diesem System überprüft, ob Natriumdodecylsulfat essentiell an der Ausbildung der Zellspannung beteiligt ist oder durch Spülmittel substituiert werden kann. Es zeigte sich, dass ohne Verwendung eines Tensids in der leitfähigen Tinte bei Betrieb der Brennstoffzelle nur etwa die Hälfte der mit Natriumdodecylsulfat anliegenden Spannung gemessen wurde (Abb. 4.90 orange). Bei Verwendung eines handelsüblichen Spülmittels war die ausgebildete Spannung noch geringer, sie nahm im Verlauf der Messung etwa den Wert der Messung ohne Tensid an.

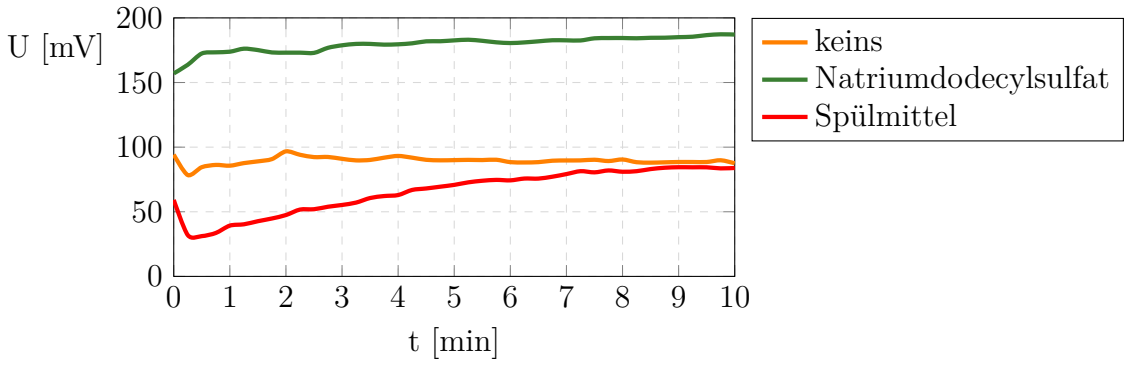



Abbildung 4.90: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit des verwendeten Tensids. T = 19 °C.

In dem Stoffgemisch Spülmittel können neben Tensiden auch Enthärter enthalten sein, die etwa Magnesium-Ionen komplexieren und somit die Enzymaktivität herabsetzen.[124] Auch weitere hemmende oder denaturierende Wirkungen auf das Enzym Lactase können ein Erklärungsansatz dafür sein, dass die Zellspannung nur in geringem Maße ausgebildet wurde.
Die Verwendung des Natriumdodeylsulfats wurde beibehalten, offenbar überwogen die Effekte der Benetzung mögliche denaturierende Effekte.

#### 4.7.3.5. Vergleichender Einsatz von destilliertem Wasser und Leitungswasser

Da in Leitungswasser beispielsweise Magnesium-Ionen vorliegen, die als Co-Faktoren zur $\beta$-Galactosidase-Aktivität benötigt werden, wurde überprüft, inwiefern sich die Spannung bei Einsatz von Leitungswasser anstelle des destillierten Wassers in den leitfähigen Tinten unterscheidet. Während eine höhere Zellspannung durch Zuführen des Co-Faktors erwartbar war, zeigten die Messungen Gegenteiliges (Abb. 4.91): Bei Verwendung von Leitungswasser bildete sich eine deutlich geringere Zellspannung aus, als bei den Vergleichsmessungen unter Einsatz von destilliertem Wasser.
Die Aktivität des Lactase-Enzyms wird von verschiedenen Metall-Ionen beeinflusst. Während Magnesium- und Mangan-Ionen die Aktivität begünstigen, senken und Calcium- und Schwermetall-Ionen die Aktivität.[108,123] Mutmaßlich war im Leitungswasser folglich eine Stoffmenge an hemmenden Ionen enthalten, sodass bei Betrieb

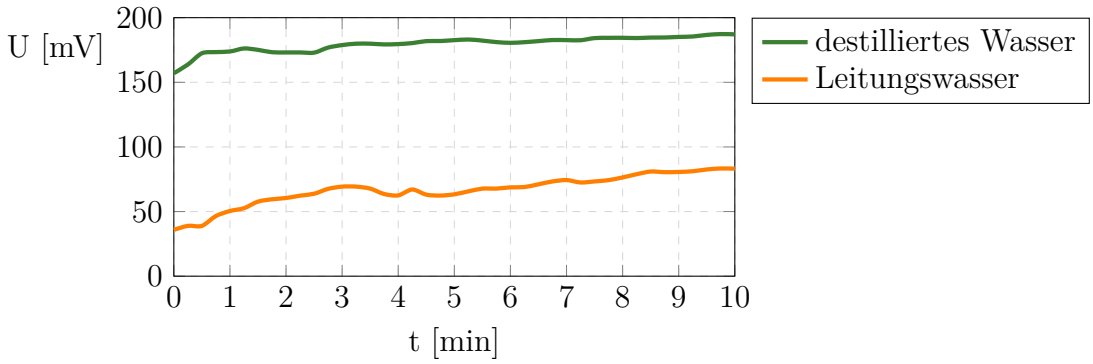
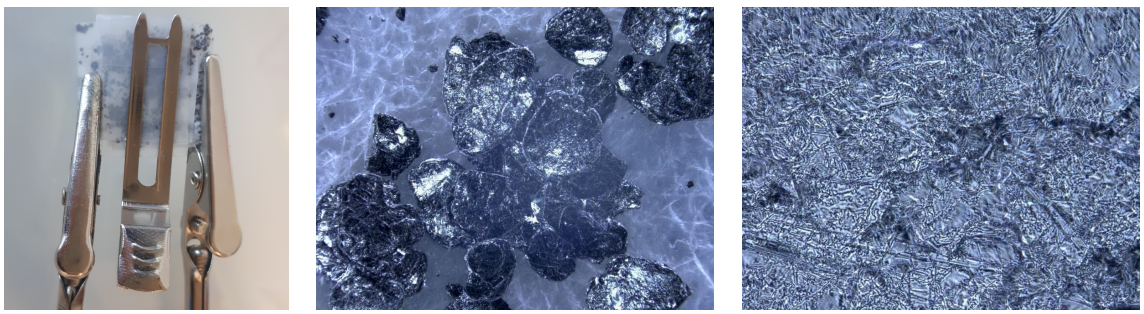



Abbildung 4.91: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit des verwendeten Wassers. T = 19 °C.

der EFC eine geringere Spannung ausgebildet wurde. Somit schien die Nutzung von destilliertem Wasser vorteilhaft, zumal in dem Lactase-Präparat als Begleitstoffe auch Magnesiumsalze enthalten sind, die offenbar bereits Magnesium-Ionen als Co-Faktor stellen.

#### 4.7.3.6. Einsatz verschiedener Elektrodenmaterialien

Neben der genutzten Aktivkohle-Suspension wurde eine Graphitflocken-Suspension als Elektrodenbeschichtung beziehungsweise Graphitfolien als Elektrodenmaterialien erprobt. Die Graphitflocken-Suspension konnte ähnlich schlecht wie eine CNTs-Suspension gleichmäßig aufgetragen werden (vgl. Abb. 4.92).



(a) Aufbau mit Graphitflocken

(b) Graphitflocken, 100fach vergrößert

(c) Graphitflocken, 1000fach vergrößert

Abbildung 4.92: Ansichten der eingesetzten Graphitflocken.

Dahingegen waren die Graphitfolien-Elektroden gut handhabbar und stabilisierten den Aufbau. In jeder der Variationen konnte eine Zellspannung gemessen werden.

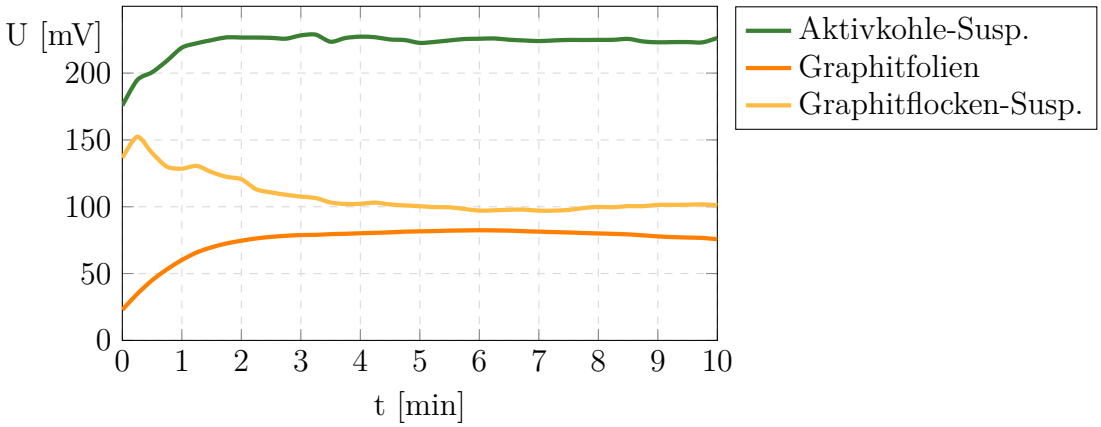
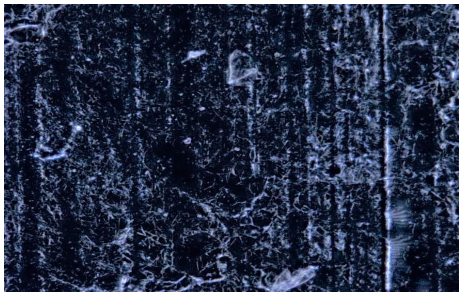



Abbildung 4.93: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit der verwendeten Elektrodenbeschichtung. *Susp. steht für Suspension.* T = 20 °C.

Sie unterschieden sich in der Höhe deutlich voneinander (Abb. 4.93): Bei Verwendung der Graphitflocken-Suspension stellte sich zu Messbeginn ein Spannungsmaximum von $U_{max} = 150\,\text{mV}$ ein. Im Verlauf der Messzeit nahm die Spannung auf 100 mV ab. Es kam zusätzlich zu Spannungsschwankungen. Bei Einsatz von Graphitfolie als Elektroden wurde die geringste Zellspannung mit einem Maximum von $U_{max} = 80\,\text{mV}$ gemessen. Die Spannungen innerhalb einer Messreihe schwankten jedoch am geringsten. Ursächlich für die unterschiedlichen gemessenen Ruheklemmspannungen könnte zum einen der geringe Bedeckungsgrad bei gleichzeitig großer Oberfläche der Flocken bei Verwendung der Graphitflocken und zum anderen die vergleichsweise geringe Oberfläche von Graphitfolie sein.



(a) Aufbau mit Graphitfolie



(b) Graphitfolie, 1000fach vergrößert

Abbildung 4.94: Mikroskopische Ansichten der eingesetzten Elektroden (-beschichtungen).

Unter dem Mikroskop wurde die ausgeprägte dreidimensionale Struktur der Graphitflocken (Abb. 4.92) verglichen mit der der Graphitfolie deutlich (Abb. 4.94), wodurch sich die unterschiedliche Potentialausbildung erklären ließe. Da Aktivkohle nicht nur eine große Oberfläche aufwies, sondern auch bei gewählter Einwaage die gesamte Elektrodenfläche benetzte und von Elektrolyt und Aktivkohle durchdrungen wurde, war im Vergleich eine höhere Spannung messbar.

#### 4.7.3.7. Zwischenfazit zur EFC mit Lactase im Stapelaufbau

Es wurde ein kostengünstiger Aufbau zur qualitativen Veranschaulichung der Funktionsweise einer enzymatischen Brennstoffzelle entwickelt. Als geeignetste Variante wurde der Stapelaufbau mit einer Einwaage an Enzym-Präparat von 300 mg bezogen auf drei Brennstoffzellen, Natriumdodecylsulfat als benetzendes Tensid, Aktivkohle als Trägermaterial und destilliertes Wasser identifiziert, dessen Elektroden-Kontaktflächen durch die Fixierung mit einer Haarklemme stabilisiert sind.
Dabei wurde eine maximale Spannung von 229 mV und eine maximale Stromstärke von 3.4 $\mu$A bei einer Temperatur von 20 °C vermessen. Näherungsweise kann mit den nach zehnminütiger Messzeit bestimmten Werten eine Leistung von 0.78 mW berechnet werden. Diese Zellleistung ist bei ähnlichem Aufbau deutlich höher als die für die MFC mit Milchsäure-Bakterien in Abschnitt 4.5.7 bestimmten Leistungen.

Sowohl Vorbereitung, Aufbau und Betrieb sind zeitlich in eine Schulstunde integrierbar. Da der Materialaufwand pro Klassensatz unter einen Euro beträgt und das Enzym-Präparat gut lagerfähig ist, stellt diese Variante eine schultaugliche Alternative zur EFC mit $\beta$-Galactosidase und Laccase dar.

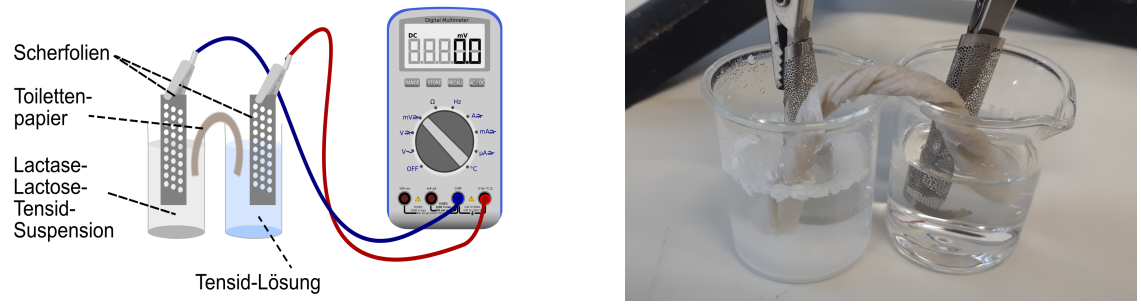
Da jedoch die ablaufenden Prozesse bislang nicht literaturbekannt waren, wurde anschließend eine Annäherung an die fachlichen Hintergründe durch Realisation und Untersuchung eines höher skalierten Zwei-Topf-Aufbaus intendiert.

### 4.7.4. EFC mit Lactase(-Präparat) im Zwei-Topf-Aufbau

Um die in einer EFC mit Lactase als Biokatalysator ablaufenden Prozesse besser untersuchen zu können, wurde selbiges System als nass-chemischer Zwei-Topf-Aufbau umgesetzt. In Ergänzung zum Stapelaufbau der EFC bestand die Intention der Versuchsreihen darin,

- eine EFC in der Zwei-Topf-Anordnung funktionsfähig aufzubauen.
- Lactase-Präparat und reine Lactase vergleichend als Biokatalysator einzusetzen.
- den pH-Wert der Flüssigkeit im Anodenraum über die anvisierte Betriebsdauer von zehn Minuten zu dokumentieren.
- den Sauerstoffgehalt der Lösung im Kathodenraum über die anvisierte Betriebsdauer zu vermessen.
- Effekte des Einleitens von Umgebungsluft in die Lösung des Kathodenraums zu vermessen.
- durch Zusammenführen der Messergebnisse Hinweise auf die in der EFC ablaufenden Prozesse zu erlangen.

Es wurde zunächst eine Zwei-Topf-Anordnung einer EFC mit Lactase-Präparat beziehungsweise reiner Lactase in Glycerin realisiert. Darin wurde die Änderung des pH-Wertes der Flüssigkeit im Anodenraum sowie der Sauerstoffgehalt der Lösung im Kathodenraum bestimmt, ehe der Effekt von Luftzufuhr in die Lösung des Kathodenraums gemessen wurde.




(a) Schematisch

(b) Realaufbau

Abbildung 4.95: Ansichten der EFC mit Lactase-Präparat im Zwei-Topf-Aufbau.

Die Zellleistung des Systems war von untergeordneter Bedeutung, da in erster Linie Hinweise auf ablaufende Prozesse bei Betrieb der Brennstoffzelle gewonnen werden sollten.
Da die Aktivität von Enzymen temperaturabhängig ist, wurden nur unter gleichen Bedingungen erfolgte Messungen zum Vergleich herangezogen. Die bei den Messungen vorherrschende Raumtemperatur wird jeweils an den Messgraphen angegeben. Zunächst wurde Beschreibung der jeweiligen Varianten jeweils die Ruheklemmspannung über einen Zeitraum von 10 min mit dem Messwerterfassungssystem „Pocket Cassy“ dreifach gemessen. Im Anschluss wurde die Stromstärke bestimmt. Weitere Messgeräte sind im Experimentalteil in Kapitel B aufgeführt.

Der Abstand zwischen den Elektroden betrug jeweils 5 cm. Weiterhin wurden für alle Messungen dieselben Scherfolien und Kabel verwendet.

#### 4.7.4.1. Betrieb des Zwei-Topf-Aufbaus

Die Komponenten des Stapelaufbaus der EFC mit Lactase dienten als Orientierung zur Realisation einer Zwei-Topf-Anordnung (Abb. 4.95): In die als Anoden- und Kathodenhalbzellfassung genutzten Bechergläser wurden gleiche Mengen in destilliertem Wasser gelöstes Natriumdodecylsulfat gegeben. Gerollte Scherfolien bildeten die Elektroden, verdrilltes Toilettenpapier die Elektrolyt-Brücke. In den Anodenraum wurden zusätzlich das als Biokatalysator genutzte Enzym in der jeweiligen Darreichungsform sowie die als Substrat fungierende Lactose eingebracht. Bei Verwendung beider Darreichungsformen der Lactase konnte eine geringe Zellspannung und Stromstärke gemessen werden (siehe Abb. 4.96 und Tab. 4.14).

| | Lactase-Präparat | | reine Lactase | |
|---|---|---|---|---|
| | ohne Rühren | mit Rühren | ohne Rühren | mit Rühren |
| t = 10 min | 0.7 $\mu A$ | 1.6 $\mu A$ | 0.5 $\mu A$ | 1.5 $\mu A$ |

Tabelle 4.14: Stromstärke der EFC mit Lactase in der Zwei-Topf-Anordnung. *Rühren bezieht sich jeweils auf die Anodenhalbzelle.* T = 22 °C.

Aufgrund des verglichen mit dem Stapelaufbau größeren Zellvolumen war möglicherweise der Kontakt zwischen Biokatalysator und Elektrode eingeschränkt, da die Enzyme nicht an der Elektrode immobilisiert wurden. Daher wurde weitere Versuchsreihen mit selbigen Systemen durchgeführt, bei dem durch Rühren im Anodenraum

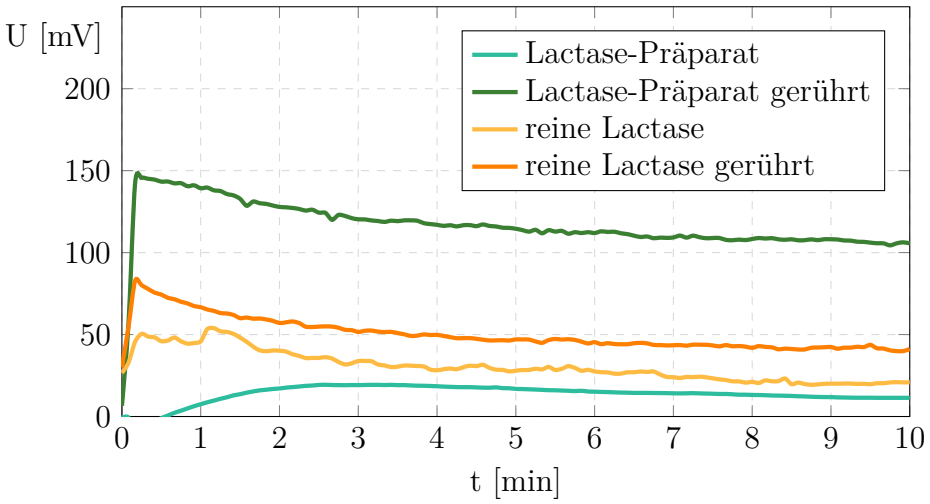



Abbildung 4.96: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase im Zwei-Topf-Aufbau. *Rühren* bezieht sich auf den Anodenraum. T = 22 °C.

die Stoßwahrscheinlichkeit zwischen Enzym und Substrat sowie Enzym und Elektrode erhöht werden sollte. Tatsächlich zeigte sich ein positiver Effekt auf die Zellspannung und Stromstärke, wie ebenfalls in Abbildung 4.96 und Tabelle 4.14 erkenntlich ist. Das Anliegen einer Spannung und Stromstärke wurde als Indiz für die erfolgreiche Inbetriebnahme der EFC gewertet. Zusätzlich wurde zur Bestätigung hydrolytischer Aktivität der Enzyme zu Beginn der Messung und anschließend im Abstand von 1 min mithilfe von Teststreifen der Gehalt von Glucose als Produkt enzymatischer Aktivität in der Flüssigkeit im Anodenraum bestimmt. Während zu Beginn der Messung keine Glucose nachweisbar war, betrug unter Verwendung des Lactase-Präparats nach 1 min der Glucose-Gehalt mindestens 2000 $\frac{mg}{L}$, wohingegen dieser maximal mit Teststreifen abbildbare Wert bei Verwendung von reiner Lactase in Glycerin erst nach 4 min erreicht wurde [18].

Die enzymatische Aktivität von $\beta$-Galactosidase in der jeweiligen Darreichungsform scheint in Zusammenhang mit der Ausbildung einer Spannung und Stromstärke zu stehen. Daher wurden in diesem Aufbau weitere Messungen zur Gewinnung von Hinweisen auf ablaufende Prozesse durchgeführt.

[18] Erläuterungen zu der unterschiedlichen Enzymaktivität der Darreichungsformen finden sich in Abschnitt 4.7.2.

#### 4.7.4.2. Monitoring des pH-Wertes während der $\beta$-Galactosidase-Aktivität

Die Veränderung des pH-Wertes in der Anodenhalbzelle der EFC mit Lactase wurde für die anvisierte Betriebsdauer von 10 min quantitativ vermessen. Sowohl bei Einsatz des Lactase-Präparat als auch der reinen Lactase in Glycerin nahm der pH-Wert bei Betrieb der EFC innerhalb der ersten Minute ab, wie zuvor durch die Zugabe von Phenolrot als Indikator bereits qualitativ nachgewiesen wurde.
Bei Verwendung des Lactase-Präparats nahm der pH-Wert innerhalb der ersten 1.5 min um beinahe eine Einheit ab, wohingegen er bei Nutzung der reinen Lactase in Glycerin um etwa eine halbe Einheit sank (Abb. 4.97). Welche Faktoren

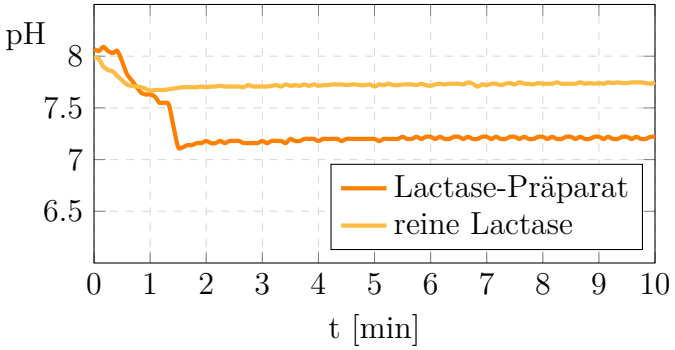



Abbildung 4.97: pH-Wert in Lösung während der $\beta$-Galactosidase-Aktivität verschiedener Darreichungsformen. T = 22 °C.

neben der Enzymaktivität und der Co-Faktor-Verfügbarkeit Einfluss nahmen, kann ohne die fachlichen Hintergründe genauer zu kennen, nicht erörtert werden. Eine offene Frage blieb, warum nach etwa zwei Minuten Messzeit der pH-Wert annähernd konstant blieb. Das pH-Optimum bei Lactase aus Hefen ist im Bereich von pH 6.5-7 angesiedelt,[107,108] sodass durchaus eine weitere Stoffwechselaktivität und damit einhergehend eine Abnahme des pH-Wertes erwartbar gewesen ist. Durch das Monitoring des pH-Wertes wurde jedoch bestätigt, dass bei der enzymatischen Aktivität der $\beta$-Galactosidase (zunächst) Protonen freigesetzt werden.

#### 4.7.4.3. Monitoring des Sauerstoffgehalts in der Lösung des Kathodenraums

Die Veränderung des Sauerstoffgehaltes in der Lösung der Kathodenhalbzelle der EFC mit Lactase wurde für die anvisierte Betriebsdauer von 10 min unter Verwendung des Sauerstoffmessgeräts *VWR OX 4100 H* quantitativ vermessen. Zur besseren Übersichtlichkeit ist das Vorgehen in Abbildung 4.98 skizziert.

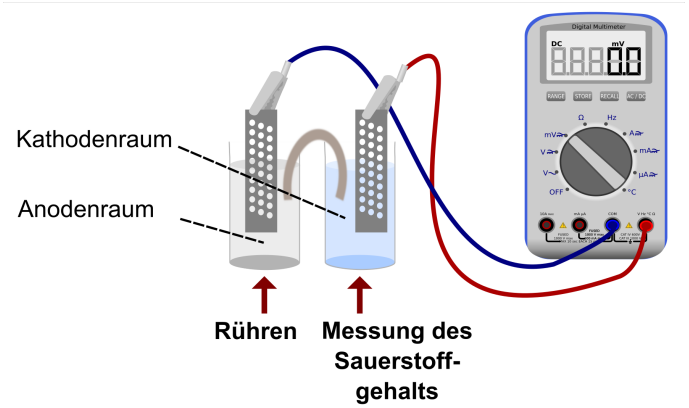



Abbildung 4.98: Vorgehen bei dem Monitoring des kathodenseitigen Sauerstoffgehaltes in der EFC mit Lactase.

Sowohl bei Einsatz des Lactase-Präparats als auch der reinen Lactase in Glycerin nahm der Sauerstoffgehalt bei Betrieb der EFC ab. Vergleichend wurden die Messungen ohne beziehungsweise mit Rühren der Lösung im Anodenraum durchgeführt, um zu überprüfen, ob die bei Rühren detektierte höhere Leistung der Zelle mit einem größeren Stoffumsatz einhergeht. Tatsächlich nahm der Sauerstoffgehalt bei

| | Lactase-Präparat | | reine Lactase | |
|---|---|---|---|---|
| | ohne Rühren | mit Rühren | ohne Rühren | mit Rühren |
| t = 0 min | 7.5 | 8.2 | 7.8 | 8.2 |
| t = 10 min | 7.0 | 7.2 | 7.0 | 7.3 |

Tabelle 4.15: Gehalt an gelöstem Sauerstoff $[\frac{mg}{L}]$ im Elektrolyt des Kathodenraums der EFC mit Lactase in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt. *Rühren bezieht sich jeweils auf die Anodenhalbzelle.* T = 22 °C.

allen Betriebsarten im Laufe der Messung ab (Tab. 4.15). Unter Rühren der Lösung in der Anodenhalbzelle war eine ausgeprägtere Abnahme messbar, was neben der Beteiligung von Sauerstoff an der Kathodenreaktion auch auf einen höheren Umsatz hindeutet: Bei Verwendung des Lactase-Präparats nahm der Sauerstoffgehalt in der Lösung im Kathodenraum durchschnittlich doppelt so stark ab, wenn die Lösung in der Anodenhalbzelle gerührt wurde.

#### 4.7.4.4. Effekt des Einleitens von Umgebungsluft in den Kathodenraum

Die Abnahme des Sauerstoffgehalts in der Lösung im Kathodenraum während des Betriebs der EFC ließ auf eine Beteiligung von Luftsauerstoff an der Kathodenreaktion schließen. Daher wurde nachfolgend der Effekt des Einleitens von Umgebungsluft an die Kathode auf die Zellspannung untersucht. Dazu wurde im Rhythmus von

einer Minute jeweils 60 mL Umgebungsluft in den Kathodenraum der EFC im Zwei-Topf-Aufbau eingepulst. Die Messungen erfolgten vergleichend mit Lactase-Präparat beziehungsweise reiner Lactase als Biokatalysator.
In beiden Varianten war bei Luftzufuhr ein Anstieg der Spannung messbar (Abb. 4.99). Dabei war sowohl die absolute Spannung als auch der relative Anstieg der Spannung während der Luftzufuhr bei Nutzung des Lactase-Präparates höher gegenüber den Messdaten bei Verwendung der reinen Lactase.

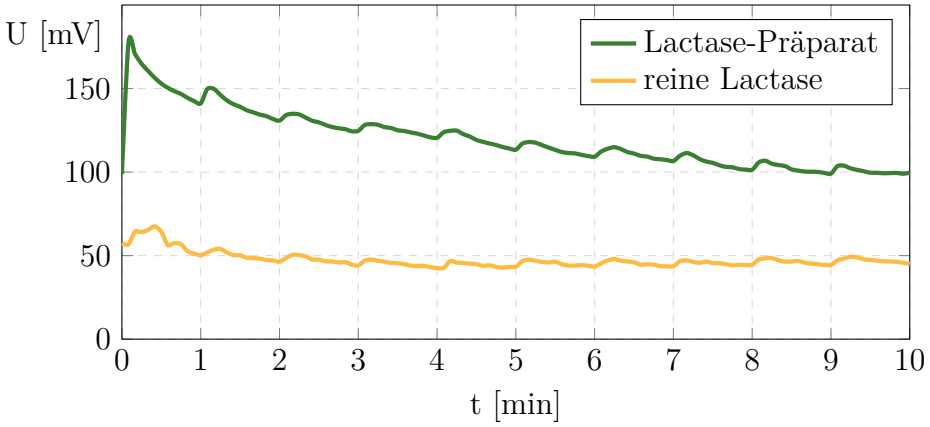



Abbildung 4.99: Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der Luftzufuhr. T = 20 °C.

Dass in beiden Varianten ein Effekt der Luftzufuhr an die Kathode gemessen wurde, bestärkt die Annahme, dass die Kathodenreaktion unter Verbrauch von Sauerstoff abläuft.

### 4.7.5. Zwischenfazit zur enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase

Es wurde gezeigt, dass die Lactase-Aktivität mit der Freisetzung von Protonen einhergeht und Hinweise auf die Freisetzung von Elektronen bestehen. Daher wurde eine enzymatische Brennstoffzelle unter Nutzung von kostengünstigem Enzym-Präparat aus der Drogerie im Stapelaufbau realisiert und hinsichtlich aufgestellter Kriterien optimiert (Abschnitt 4.7.3). Die genauen Prozesse der Potentialbildung sind bislang nicht fachwissenschaftlich ergründet, sodass der Versuch eher qualitativ und phänomenologisch zu verstehen ist. Gegenwärtig existiert zu den Prozessen keine Fachliteratur. Gespräche mit Fachwissenschaftlern bestätigten diese Forschungslücke. Zur Generierung von Hinweisen auf die in der EFC ablaufenden Prozesse wurde diese mit Lactase-Präparat beziehungsweise reiner Lactase als Biokatalysator im Zwei-Topf-Aufbau betrieben und verschiedene Parameter untersucht: Es wurde bestätigt, dass bei Betrieb der EFC in der Anodenhalbzelle der pH-Wert sinkt und in der Lösung der Kathodenhalbzelle der Sauerstoffgehalt. Dies deutet darauf hin, dass in der Anodenreaktion Protonen freigesetzt und in der Kathodenreaktion Sauerstoff verbraucht werden. Zur schematischen Auswertung wurden daher die stark vereinfachten Gleichungen 4.16 für die ablaufenden Prozesse formuliert, in denen in Anlehnung an Belitz u. a. [125] S für Substrat steht:

$$\begin{aligned} &\text{Anode} && \mathrm{SH_2} \xrightarrow{\beta\text{-Galactosidase}} \mathrm{S + 2\,H^+ + 2\,e^-} \\ &\text{Kathode} && \mathrm{O_2 + 4\,H^+ + 4\,e^- \longrightarrow 2\,H_2O} \\ &\hline \\ & && \mathrm{2\,SH_2 + O_2} \xrightarrow{\beta\text{-Galactosidase}} \mathrm{2\,S + 2\,H_2O} \end{aligned} \tag{4.16}$$

In dem Zusammenhang könnte zusätzlich die zyklische Funktion des $NAD^+$ zum EET auf die Elektrode thematisiert werden, die in den Reaktionsgleichungen 4.17 und 4.18 beschrieben wird.

$$\mathrm{NAD^+ + 2\,H^+ + 2\,e^- \longrightarrow NADH + H^+} \tag{4.17}$$

$$\mathrm{NADH + H^+ \longrightarrow NAD^+ + 2\,H^+ + 2\,e^-} \tag{4.18}$$

Im Anschluss an die vorliegende, fachdidaktische Arbeit werden weitere Schritte zur Aufklärung der fachlichen Hintergründe erfolgen.

# 5. Didaktische Betrachtungen

In diesem Kapitel werden Kerngedanken und Konstrukte in ihren Grundzügen dargestellt, die im Rahmen dieser Arbeit für die Erarbeitung von Lernarrangements von Bedeutung waren. So werden zunächst das Leitbild *Bildung für Nachhaltige Entwicklung* und einhergehende Begriffe definiert, die Verankerung in Bildungseinrichtungen begründet und charakterisiert (Abschnitt 5.1). Anschließend wird die *Perspektive MINT* dargelegt (Abschnitt 5.2), weil ursprünglich geplant war, alle Lerneinheiten im MINT-Klassenraum der Universität Tübingen zu situieren, sodass die entstandenen Einheiten nun zum Teil interdisziplinär verschiedene MINT-Aspekte aufgreifen (siehe Kapitel 7.3). Nachfolgend werden die Notwendigkeit und strukturelle Bemerkungen zur *Digitalisierung* von Lernorten beschrieben (Abschnitt 5.3). Diese Betrachtungen werden durch eine *didaktische Standortbestimmung* abgerundet, in der die Situierung des Themas Brennstoffzellen in Lehrplänen, Schulbüchern und der fachdidaktischen Literatur beleuchtet wird (Abschnitt 5.4).

## 5.1. Bildung für Nachhaltige Entwicklung

### 5.1.1. Begriffserläuterungen

Da die Ausdrücke rund um das Thema *Nachhaltigkeit* inflationär in verschiedenen Zusammenhängen gebräuchlich sind,[126] wird ihr Verständnis für diese Arbeit definiert: Obwohl die Begriffe *Nachhaltige Entwicklung* und *Nachhaltigkeit* häufig synonym verwendet werden, unterscheiden sie sich in ihrer Bedeutung: *Nachhaltige Entwicklung* (NE) meint den Prozess der gesellschaftlichen Veränderung, der notwendig ist, um die *Nachhaltigkeit* als Zustand zu erreichen.[126] Die NE ist ein normatives Leitbild, dem intergenerationelle und globale Gerechtigkeit als Basis zugrunde liegt.[126] Sie ist (mindestens) in die Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales untergliedert. Zur Beschreibung werden unterschiedliche Modelle genutzt, etwa Schnittmengenmodelle wie in Abbildung 5.1: Die drei Dimensionen werden darin als Bereiche dargestellt, deren Überlappung der NE entspricht.[127] Der Grundgedanke, dass die drei Dimensionen gleichberechtigt sind, ist bisweilen strittig. Die Dimensionen bedingen zum Teil Zielkonflikte, die ein individuelles Abwägen beim Entscheidungen im Sinne einer

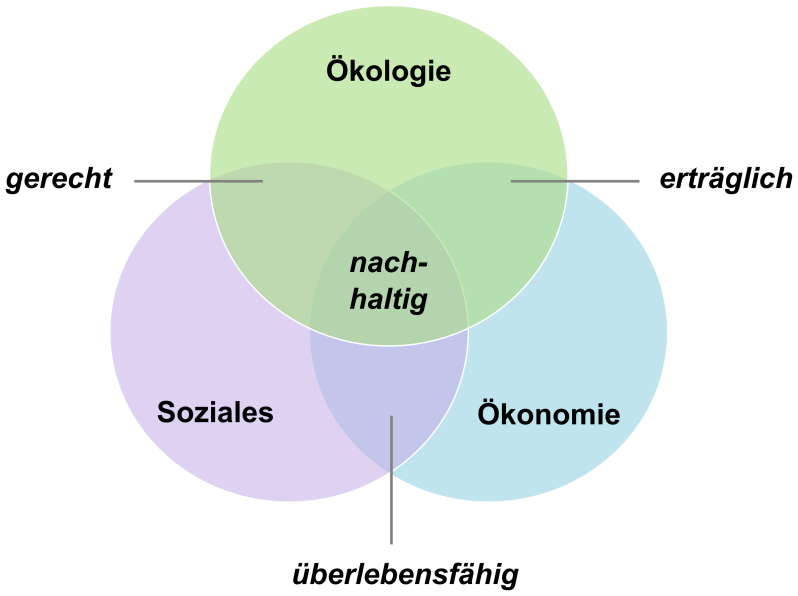



Abbildung 5.1: Schnittmengenmodell zur Beschreibung von NE. Eigene Darstellung in Anlehnung an Pufé [127, S. 110]

NE erfordern.[126] Der Begriff *Bildung für Nachhaltige Entwicklung* (BNE) beschreibt ein Bildungskonzept, dessen übergeordnetes Ziel es ist, Menschen die Kompetenzen für zukunftsfähiges Denken und Handeln zu vermitteln.[126]
Diese Kompetenzen werden nach Haan [128] als Gestaltungskompetenzen bezeichnet. Sie können in drei Kategorien und insgesamt zehn Teilkompetenzen untergliedert werden (siehe Tabelle 5.1):[128] Die Teilkompetenzen sind dabei den Nachhaltigkeitswissenschaften, der Zukunftsforschung und der sozialen Praxis entlehnt, beziehungsweise begründet durch ihren normativen Charakter der Gerechtigkeit.[128]
Die Legitimation und Verankerung zur Vermittlung dieser BNE-Kompetenzen wird nachfolgend knapp dargelegt.

### 5.1.2. Strukturelle Anlage von Bildung Nachhaltiger Entwicklung

Nachdem Umweltschutz als grenzüberschreitende Aufgabe erkannt wurde, hielten die Vereinten Nationen 1972 die erste Weltumweltkonferenz in Stockholm ab. Es wurde ein erster Aktionsplan zur NE verabschiedet, der in nachfolgenden Konferenzen durch Protokolle ausdifferenziert wurde. Diese enthalten neben ökologischen Aspekten wie etwa der Festlegung verbindlicher Emissionsgrenzen für Treibhausgase der Industrienationen auch wirtschaftliche und soziale Ausprägungen wie beispielsweise Generationengerechtigkeit und Gleichberechtigung.[129–133] Besonders wegweisend in

| **Kompetenzkategorie** | **Teilkompetenz** |
|---|---|
| *Interaktive Verwendung von Medien und Tools* | 1. weltoffen und neue Perspektiven integrierend Wissen aufbauen |
| | 2. vorausschauend Entwicklungen analysieren und beurteilen |
| | 3. interdisziplinär Erkenntnisse gewinnen und handeln |
| *Interagieren in heterogenen Gruppen* | 4. gemeinsam mit anderen planen und handeln |
| | 5. an Entscheidungsprozessen teilhaben |
| | 6. andere zur Aktivität motivieren |
| *Eigenständiges Handeln* | 7. eigene Leitbilder reflektieren |
| | 8. selbstständig planen und handeln |
| | 9. Empathie und Solidarität zeigen |
| | 10. sich selbst zur Aktivität motivieren |

Tabelle 5.1: Übersicht der Gestaltungskompetenzen nach Haan [128, S. 23].

Hinsicht auf die vorliegende Arbeit ist die Agenda 21 aus dem Jahr 1992, die als wichtigste Maßnahme hin zu einer NE die BNE benennt.[131] Auch nach der UN-Dekade von 2004 - 2014 zur Verankerung von BNE in allen Bildungsbereichen hielt der explizite Bildungsauftrag 2015 Einzug in die Agenda 2030, die 17 Nachhaltigkeitsziele mit 169 Unterzielen aus verschiedenen Lebensbereichen enthält.[4]
Die Formulierung und Umsetzung konkreter Maßnahmen zum Erreichen der mehrdimensionalen Ziele ist dabei Ländersache.[6] So wurde auch ein entsprechender Plan zur strukturellen Verankerung von BNE in allen Bildungsbereichen Deutschlands entworfen. Den allgemein- und berufsbildenden Schulen kommt demzufolge aufgrund ihres enormen Einflusses auf individuelle Bildungsbiografien eine besondere Bedeutung in der Vermittlung zu. Als geeignete Maßnahmen gilt beispielsweise die Aufnahme von BNE in Aus-, Fort- und Weiterbildung von Lehrkräften sowie die Rahmen- und Bildungslehrpläne der Länder. Die genaue, explizite Verankerungen von BNE ist wiederum Sache der Bundesländer.[7] Im Land NRW erschien 2019 die „Leitlinie Bildung für nachhaltige Entwicklung“, die bei der Integration von BNE in reguläre Unterrichtsfächer aller Schulformen unterstützt. Das Charakteristikum der Mehrdimensionalität spiegelt sich in der vorgesehenen Art der Einbindung von BNE

wider: So gelten in der Leitlinie neben der exemplarischen Relevanz der Fragestellungen, der Erwerb vernetzten Wissens, das Führen von Diskursen zu Zielkonflikten, auch eine Multiperspektivität und Mehrdimensionalität in der Betrachtung von Themenkomplexen sowie eigenverantwortliche und partizipative Ansätze als Merkmale von BNE-Lernprozessen. Die Dimensionalität der NE wird hier auf fünf Bereiche erweitert: Neben Ökologie, Ökonomie und Sozialem sind Politik und Kultur als weitere Dimensionen aufgeführt (siehe Abb. 5.2). Jedes Thema eignet sich mit entsprechender

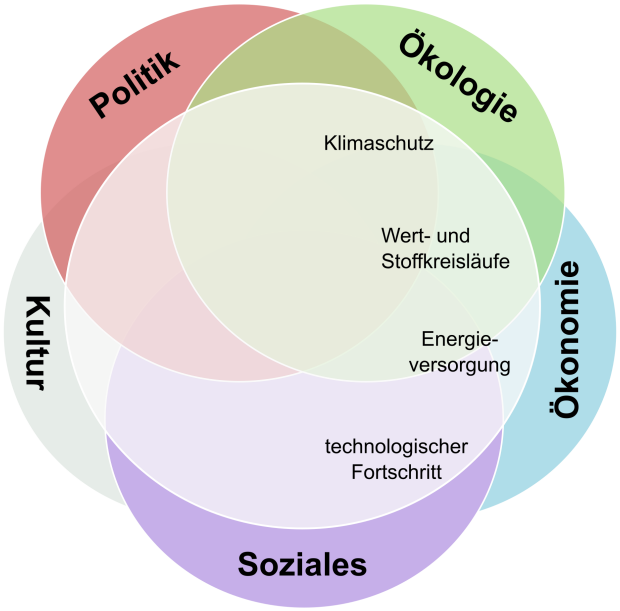



Abbildung 5.2: Dimensionen von Nachhaltiger Entwicklung mit ausgewählten Inhaltsaspekten nach Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen [134, S. 18]. Eigene Darstellung.

Fragestellung zur Verwendung in BNE-Lernprozessen. Dabei muss das Thema nicht in der Schnittmenge aller, sondern einiger Dimensionen verortet sein.
Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Lernarrangements bewegen sich inhaltlich in der Schnittmenge zwischen Ökologie, Ökonomie und Sozialem - wie in Abbildung 5.2 durch Integration von Schlagworten zu den Themen veranschaulicht. Diese Arbeit liefert somit einige Anstöße für BNE-Lernprozesse aus dem MINT-Bereich.

## 5.2. Perspektive MINT

Das Initialwort MINT besteht aus den Anfangsbuchstaben der Disziplinen **M**athematik, **I**nformatik, **N**aturwissenschaft und **T**echnik. Der Begriff MINT wird zur Beschreibung von Unterrichts- und Studienfächern beziehungsweise Berufen der genannten

Disziplinen genutzt.[135] In der zunehmend digital geprägten Welt kommt der Bildung im MINT-Bereich nach Ansicht des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) besondere Bedeutung zu. Technik, digitale Anwendungen und Dienstleistungen betreffen dabei auch den Alltag derer, die nicht in MINT-Berufen arbeiten.[135] Gut ausgebildete MINT-Fachkräfte sind für Deutschland unerlässlich, um international über wirtschaftliche Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit zu verfügen.[135] Die Grenzen zwischen den MINT-Fächern sind fließend, sodass die Berufsfelder eng vernetzt und MINT-Teildisziplinen als gebündelte Perspektive zu verstehen sind.[136] Die MINT-Nachwuchskräftesituation in Deutschland ist jedoch bedenklich: Lernende zeigen bereits während der Schulzeit wenig Interesse an Leistungskursen in MINT-Fächern und sie ziehen es kaum in Betracht, nach der Schullaufbahn einen MINT-Beruf zu ergreifen.[137]
Insgesamt entscheiden sich jährlich knapp 40 % der Studienanfänger für einen MINT-Studiengang. Bei der Wahl des konkreten Studienfaches besteht die Motivation hauptsächlich in dem eigenen Fachinteresse, einem guten Einkommen sowie guten Arbeitsplatzchancen. Selten handelt es sich um eine Ausweichlösung.[137] Um bundesweit eine gelingende MINT-Bildung sicherzustellen und einhergehend auch MINT-Nachwuchskräfte zu gewinnen, soll bereits in Kindergarten und Primarschule das Interesse an MINT geweckt werden.[135] Beginnend mit der Sekundarstufe I soll der Unterricht in den MINT-Fächern der zentrale Ort zum naturwissenschaftlichen Kompetenzerwerb und darüber hinaus zum Herausbilden und Erhalt von Interesse sein. In besonderem Maße kann dieses durch direkten Lebensweltbezug durch fächerübergreifende Konzepte, Experimentieren, kooperatives Lernen und den Einsatz digitaler Medien angestrebt werden.[138] Schulen können ihren Schwerpunkt auf MINT legen und in diesem Bereich Angebote, wie AGs, Wahlkurse oder die Teilnahme an Schülerwettbewerben in erhöhtem Maße schaffen. Entsprechen sie den jeweiligen Regularien, können sich die Schulen entsprechend als MINT-Schule (Sek. I) oder MINT-EC-Schule (Sek. II) zertifizieren lassen.[139,140] Die schulischen Angebote werden durch außerschulische Angebote, wie etwa Schülerlabore und Industriekooperationen, unterstützt.[141]

Die Lernangebote aus der vorliegenden Dissertation liefern einen Beitrag zur MINT-Bildung für Lernende verschiedener Altersklassen. Während der Großteil der Lernarrangements für außerschulische Lernorte konzipiert ist, sind zusätzlich auch kürzere MINT-Sequenzen für den Einsatz an Regelschulen entstanden.

Insbesondere für den MINT-Bereich eröffnet das Lernen mit digitalen Medien auf Grundlage geeigneter pädagogischer Konzepte neue Chancen und Möglichkeiten,[142] weswegen nachfolgend auf die Digitalisierung eingegangen wird.

## 5.3. Digitalisierung

Auf die Schulen als Bildungseinrichtungen wirkt ein Innovationsdruck durch veränderte Mediengewohnheiten der Lernenden: So besaßen im Jahr 2019 über 90 % der Jugendlichen zwischen 12 - 19 Jahren ein eigenes Smartphone und verfügten über uneingeschränkten WLAN-Zugriff.[143] 97 % der Befragten gaben an, ihr Smartphone mehrfach die Woche in ihrer Freizeit zu nutzen, etwa 90 % um Online-Videos zu schauen. Der Anteil der Bücherlesenden erreichte 2019 mit etwa einem Drittel ein Rekordtief.[143] Zudem wurde die kommerziell betriebene Plattform YouTube in einer repräsentativen Studie im Jahr 2019 von fast der Hälfte der befragten Lernenden als *wichtig* bis *sehr wichtig* für schulische Belange eingeordnet. Insbesondere zum Anfertigen von Hausaufgaben, zur Wiederholung oder Prüfungsvorbereitung werden Angebote der Plattform genutzt.[143,144] Aus diesen Befunden ergibt sich die Notwendigkeit, die analoge und die digitale Welt sinnhaft durch Lehrpersonen gesteuert zu verschränken, etwa proaktiv Möglichkeiten und Grenzen von YouTube-Videos zu thematisieren und diese Formate und Überlegungen in das Unterrichtsgeschehen einzubinden. Die Digitalisierung ist als kultureller Prozess zu begreifen.[144] Auch die Ausstattung an Schulen muss entsprechend angepasst werden. Wenngleich Videos als beliebtestes Lernmedium von Lernenden identifiziert und das Interesse von Lehrkräften an digitalen *Open Educational Ressources* (OER) bekräftigt wurde, so wurde dem Schulsystem 2017 auch attestiert, den Wert digitalen Lernens zu verkennen, kaum über Strategien zur Digitalisierung sowie schlechte WLAN-Netze vor Ort zu verfügen.[145] In der Corona-Krise wurde deutlich, dass nur wenige Schulen gut auf die Bereitstellung digitaler Lernangebote vorbereitet waren. Sowohl in der Ausstattung der Schulen, der Lehrkräfte und Lernenden als auch der Schulung des Lehrpersonals im Umgang mit digitalen Formaten bestanden und bestehen Bedarfe.[146]
Der 2019 vom BMBF entworfene *Digitalpakt Schule* kann daher als Innovationsimpuls am Lernort Schule verstanden werden. Mithilfe der - auf Antrag einmalig bereitgestellten - Mittel soll an Schulen die zur Digitalisierung notwendige Infrastruktur aufgebaut werden.[147] Deutschlandweit wurden Medienkompetenzen als Schlüsselqualifikation anerkannt, die Lernende benötigen, um ihr Leben in der zunehmend medialisierten Welt bestreiten zu können. Auf Ebene der Bundesländer wurden daher Kompetenzrahmen geschaffen, die von den Schulen als neue Vermittlungsaufgabe

umzusetzen sind (z.B.[148]). In einer umfangreichen Metastudie wurde bestätigt, dass digitale Medien neben der sich aus den Mediengewohnheiten der Lernenden ergebenden Notwendigkeit auch einen Mehrwert für schulischen Unterricht haben können. Dieser Effekt zeigte sich einheitlich in den untersuchten Unterrichtsfächern Mathematik, Physik, Biologie und Chemie. Im direkten Vergleich mit Klassen, in denen analoge Unterrichtsmaterialien verwendet wurden, wiesen die Lernenden, die mit digitalen Medien gearbeitet hatten, eine höhere Motivation und bessere Ergebnisse in Leistungstests auf. Mit der Dauer des Einsatzes digitaler Medien flacht dieser Neuheitseffekt ab, aber auch bei langfristigem Einsatz bleibt ein geringer positiver Effekt bestehen. Zudem wurde erwiesen, dass Lernende insbesondere vom Einsatz digitaler Medien profitieren, wenn sie nicht einzeln, sondern paarweise an einem Endgerät arbeiten.[149]

Neben Videos zum flexiblen Einsatz in verschiedenen didaktischen Situationen sind im Rahmen dieser Arbeit auch umfassende Lernarrangements in Form interaktiver E-Books umgesetzt worden, sodass ein Arbeiten ohne Medienbruch ermöglicht wird (vgl. Kapitel 6). Diese Dissertation liefert einen Beitrag zur Digitalisierung von Lernarrangements im MINT-Bereich an außerschulischen und schulischen Lernorten für Lernende der Sekundarstufe I und II sowie für Lehrkräfte.

## 5.4. Didaktische Standortbestimmung

Im Folgenden wird die Verankerung des Begriffes *Brennstoffzelle* in den Lehrplänen der Sekundarstufe I und II dargelegt. Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Lernarrangements wurden unter anderem an der Junior Uni Wuppertal praktisch erprobt [1]. Das Angebot richtete sich an 14 - 20 Jährige aller Schulformen. Um eine Zielgruppenanpassung der Lernarrangements vorzunehmen, war daher die Kenntnis der Lehrpläne des Faches Chemie an der Haupt- und Realschule, sowie der Sekundarstufe I an Gymnasien in Nordrhein-Westfalen notwendig.
Da jedoch ansonsten Lernende der Sekundarstufe II die priorisierte Zielgruppe der zu entwickelnden Lernarrangements waren, erfolgt in Abschnitt 5.4.2 eine Betrachtung der bundesweiten Lehrpläne für Chemieunterricht in der Sekundarstufe II an Gymnasien mit Ausblick auf die im Jahr 2020 von der KMK beschlossenen *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeinen Hochschulreife*,[150] deren bundesweite

[1] Eine Charakterisierung der Lernumgebung erfolgt in Kapitel 7.3.5.1.

Umsetzung nun im Prozess ist. Der Entstehungsort dieser Arbeit legitimiert einen detaillierten Einblick in den Lehrplan und die Schulbücher Nordrhein-Westfalens in Abschnitt 5.4.3. Die didaktische Standortbestimmung wird durch die Darlegung in fachdidaktischer Literatur präsenter Beiträge zu Brennstoffzellen abgerundet (Abs. 5.4.4).

### 5.4.1. Brennstoffzellen in den Lehrplänen der Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen

Neben einer Frequenzanalyse zum Begriff *Brennstoffzelle* wurden die Lehrpläne hinsichtlich der Einführung von Konzepten der Elektrochemie allgemein untersucht, weil diese eine mögliche theoretische Basis zum besseren Verständnis der Lernarrangements bilden könnten. Zusätzlich zur Ausführung in Textform findet sich zur besseren Übersichtlichkeit eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Tabelle 5.2:

| **Schulform** | **Klasse** | **Inhaltsfeld** | **Schwerpunkte** |
|---|---|---|---|
| Hauptschule | 9. | Mobile Energiespeicher | - Elektrische Energie aus chemischen Reaktionen<br>- Batterie und Akkumulator<br>- Brennstoffzelle<br>- Elektrolyse |
| Realschule | 10. | Mobile Energiespeicher | - Elektrische Energie aus chemischen Reaktionen<br>- Batterie und Akkumulator<br>- Brennstoffzelle<br>- Elektrolyse |
| Gesamtschule | 9./10. | Elektrische Energie aus chemischen Reaktionen<br>*Fachunterricht* | - Batterie und Akkumulator<br>- Brennstoffzelle<br>- Elektrolyse |
| Gymnasium | 8. | Freiwillige und erzwungene Elektronenübertragungen | - Elektronenübertragungs-reaktionen<br>- Elektrolyse |
| | 9 | Energie aus chemischen Reaktionen | - Batterie<br>- Brennstoffzelle<br>- Energiebilanzen |

Tabelle 5.2: Übersicht über die Verankerung der für die Lernarrangements zur Brennstoffzelle wichtigen Fachinhalte in den Lehrplänen der Sekundarstufe I in NRW.

In Hauptschulen soll der Unterricht des Lernbereiches *Naturwissenschaften* kontext- und praxisorientiert an möglichst lebensweltlichen Situationen ausgerichtet werden. Das Inhaltsfeld *Elektrische Energie aus chemischen Reaktionen (7)* vermittelt Wissen über Elektronenübertragungsreaktionen und Brennstoffzellen im Kontext Nachhaltigkeit. Im Rahmen dieses Inhaltsfeldes erlernen die Schüler den Aufbau und die grundlegende Funktionsweise von Brennstoffzellen.[151] Die jeweiligen Hauptschulen legen fest, in welchen Jahrgangsstufen Chemieunterricht erteilt wird. Im *Beispiel für einen schulinternen Lehrplan zum Kernlehrplan für Hauptschulen* im Fach Chemie wird das Kontextthema *Mobile Energiespeicher* und die damit verbundenen Fachinhalte zur elektrischen Energie aus chemischen Reaktionen im zweiten Halbjahr der neunten Klasse situiert.[152]

An Realschulen ist das Inhaltsfeld *Elektrische Energie aus chemischen Reaktionen (7)* identisch zu dem an Hauptschulen formuliert. Ergänzt wird das Feld um die Anforderung, dass Schüler elektrochemische Reaktionen, bei denen Energie umgesetzt wird, mithilfe des Donator-Akzeptor-Prinzips deuten können sollen.[153] In welcher Jahrgangsstufe diese Inhalte vermittelt werden, ist auch an dieser Stelle nicht einheitlich geregelt. Im Umsetzungsbeispiel wird die entsprechende Unterrichtsreihe in das erste Halbjahr der zehnten Klasse eingeordnet.[154]

An Gesamtschulen kann der naturwissenschaftliche Unterricht in der Sekundarstufe I als Lernbereichs- oder Fachunterricht erfolgen. Dadurch beinhaltet der Lehrplan für Naturwissenschaften in der Sekundarstufe I an Gesamtschulen an verschiedenen Stellen Bezüge zur Elektrochemie beziehungsweise zur Brennstoffzelle: An Schulen, an denen Chemie in Klasse 9/10 leistungsdifferenziert unterrichtet wird, ist das Inhaltsfeld *Elektrizität im Stromkreis (10)* vorgesehen. Darin werden weniger chemische als physikalische Aspekte angesprochen. Neben elektrochemischen Energiespeichern stehen physikalische Themen wie etwa Spannung, Strom, Widerstand und Ladungstrennungen im Vordergrund. Wird im Gegenzug in Klasse 9/10 das Fach Physik leistungsdifferenziert unterrichtet, ist das verstärkt mit chemischen Fachinhalten angereicherte Inhaltsfeld *Elektrochemische Spannungsquellen (11)* vorgesehen. Neben elektrochemischen Energiespeichern ist hier explizit die Elektrolyse als fachlicher Schwerpunkt angegeben. In beiden Ausprägungen ist jedoch zum Thema Brennstoffzelle einzig die Beschreibung des grundlegenden Aufbaus und der Funktionsweise explizit im Lehrplan gefordert.[155]

Im Fachunterricht Chemie ist das Inhaltsfeld *Elektrische Energie aus chemischen Reaktion (6)* geführt. Redox-Reaktionen werden als (reversible) Elektronenübertragungsreaktionen eingeführt. Elektrolysen werden als erzwungene Elektronenübertragungsreaktion am Beispiel der Elektrolyse von Wasser thematisiert. Zum Thema

Brennstoffzelle ist die Beschreibung des grundlegenden Aufbaus und der Funktionsweise ausdrücklich benannt.[155]
Am Gymnasium wird im Inhaltsfeld *Freiwillige und erzwungene Elektronenübertragungen (7)* der Elektronen- und Redox-Begriff eingeführt. Dort ist explizit die Thematisierung der Oxidation als Elektronenabgabe und Reduktion als Elektronenaufnahme sowie der einfachen Elektrolyse vorgeschrieben. Wird die Aneinanderreihung der Inhaltsfelder – wie im Lehrplan empfohlen – eingehalten, werden diese Inhalte in der achten Jahrgangsstufe unterrichtet. Ein spiralcurriculares Aufgreifen erfolgt in der neunten Jahrgangsstufe, wo schließlich im Inhaltsfeld *Energie aus chemischen Reaktionen (10)* Batterien und Brennstoffzellen besprochen werden. Der Aufbau und das allgemeine Funktionsprinzip von Brennstoffzellen sind anhand geeigneter Modelle zu beschreiben und zu erklären.[156]

Welche Inhalte laborpraktisch anhand von Versuchen und welche theoretisch zu erschließen sind, ist in keinem der Lehrpläne vorgegeben.

### 5.4.2. Frequenzanalyse der bundesweiten Verankerung des Themas Brennstoffzelle in den Lehrplänen der Sek. II an Gymnasien

Eine Frequenzanalyse ergab, dass der Begriff *Brennstoffzellen* deutschlandweit in den Lehrplänen des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II an Gymnasien enthalten ist (vgl. Tab. D.1). In allen Bundesländern ist es sowohl für den Grund- als auch den Leistungskurs im Fach Chemie in der Oberstufe vorgesehen, sich mit Brennstoffzellen zu beschäftigen. Dabei wird die Thematik verschiedenen Bereichen zugeordnet, die von *Elektrochemie* über *Redoxchemie*, *Nachhaltigkeit und Umweltchemie* bis hin zur *angewandten Chemie* reichen[2] Obwohl die Zugangswege zur Thematik Brennstoffzellen vielfältig sind, sind wenige Brennstoffzelltypen explizit genannt: In Berlin, Brandenburg, Bremen, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und dem Saarland ist die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle in den Lehrplänen verankert.[92,157–163] In Bremen ist darüber hinaus angedacht, die Methanol-Brennstoffzelle im Zusammenhang mit der Antriebstechnik für Fahrzeuge zu thematisieren.[159] In keinem der aufgeführten Lehrpläne sind verpflichtende Experimente oder Vorschläge für Experimente enthalten.
Auch in Nordrhein-Westfalen ist die Brennstoffzelle im Inhaltsfeld 3 *Elektrochemie* sowohl für den Chemieunterricht des Grund- als auch Leistungskurses als obligatorisch

[2] Die Tabelle D.1 zur thematischen Verankerung von Brennstoffzellen in den Lehrplänen des Chemieunterrichts der Sekundarstufe II befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

vermerkt. So sind im Grundkurs der Aufbau und die Funktion elektrochemischer Spannungsquellen aus Alltag und Technik (darunter Batterie, Akkumulator und Brennstoffzelle) unter Zuhilfenahme grundlegender Aspekte wie galvanische Zellen (u.a. Zuordnung der Pole, elektrochemische Redox-Reaktionen, Trennung der Halbzellen) zu erklären.[92] Im Leistungskurs ist zusätzlich zu der Erläuterung des Aufbaus und der Funktion von Brennstoffzellen allgemein durch die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle ein konkreter Brennstoffzelltyp vorgegeben.[92]
Im Jahr 2020 veröffentlichte die KMK *Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife* zur Schaffung bundesweit einheitlicher Prüfungsanforderungen. Darin werden für das Fach Chemie neben der Ausdifferenzierung zu erreichender Kompetenzen übergreifende Basiskonzepte sowie *Inhaltsbereiche* dargelegt. Zum Thema *Brennstoffzelle* sind dabei einige Anknüpfungspunkte gegeben: Im hier als Basiskonzept gekennzeichneten *Konzept der chemischen Reaktion* wird das Donator-Akzeptor-Prinzip von Protonen und Elektronen aufgeführt, wie es zur Erschließung der Funktionsweise von Brennstoffzellen erforderlich ist. Im *Energiekonzept* können die aufgeführten Aspekte *Energieformen und -umwandlung, Enthalpie, Aktivierungsenergie/Katalyse* mit Brennstoffzellen in Zusammenhang gebracht werden. Recht analog dazu wird im Inhaltsbereich *Chemische Reaktion* das Thematisieren von Redox-Reaktionen als Elektronenübergang, Verfahren zur Berechnung der Zellspannung, sowie ein Aufgreifen der Enthalpie beziehungsweise der Katalyse als energetische Betrachtungsweisen als Bildungsstandard festgelegt. Auf erhöhtem Anforderungsniveau beschulte Lernende sollen zudem über die freie Enthalpie sowie die Gibbs-Helmholtz-Gleichung Kenntnis erlangen.[150]

Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass auch nach Integration dieser Bildungsstandards in die bundesweiten Lehrpläne des Faches Chemie eine Anschlussfähigkeit des Themas Brennstoffzellen bestehen bleiben wird.

### 5.4.3. Brennstoffzellen in Schulbüchern für das Fach Chemie in Nordrhein-Westfalen

Aufgrund des eigenen Arbeitsumfeldes und Tätigkeitsschwerpunktes wird nachfolgend ausschließlich auf Schulbücher für das Fach Chemie an Gymnasien und Gesamtschulen für die Sekundarstufe II in NRW eingegangen. Hier gilt die Regelung, dass Lehrmittel für das Fach Chemie pauschal zugelassen sind und keiner zentralen Genehmigung durch das Schulministerium bedürfen. Die Schulen sind in der Pflicht,

eine Auswahl zu treffen, die dem gelten Lehrplan entspricht.[164] An dieser Stelle werden sieben Schulbücher betrachtet. In Tabelle 5.3 ist stichpunktartig aufgeführt, in welchem Kontext und welche Brennstoffzelltypen im theoretischen Hintergrund beziehungsweise in den Experimentiervorschriften in den jeweiligen Schulbüchern genannt werden.

| **Buchtitel** | **Theorie** | **Experimente** |
|---|---|---|
| Chemie 2000+[77] | *Kontext:* Vom Rost zur Brennstoffzelle | – Modellversuch zur AFC mit Rasierscherfolien / Graphitstäben als Elektroden |
| **2007** | *Typen*: Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, DMFC | – Modellversuch zur DMFC |
| Chemie im Kontext[165] | *Kontext:* Mobile Energiequellen für eine mobile Welt | – keine |
| **2008** | *Typen:* Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, DMFC | |
| Chemie Oberstufe[166] | *Kontext*: Elektrochemie | – Modellversuch zur Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle |
| **2010** | *Typen:* Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, AFC | |
| Chemie heute Gesamtband[167] | *Kontext:* Elektrochemie | – keine |
| **2013** | *Typen:* Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, DMFC, EFC | |
| Chemie heute Qualifikationsphase[168] | *Kontext:* Mobile elektrische Energiequellen | – keine |
| **2014** | *Typen:* Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, DMFC, AFC | |

| | | |
|---|---|---|
| Chemie 2000+ Qualifikationsphase[169]<br><br>**2014** | *Kontext:* Redoxreaktionen - Elektrochemie<br><br>*Typen:* Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, DMFC | – Modellversuch zur AFC mit Rasierscherfolien / Graphitstäben als Elektroden |
| Elemente Chemie[170]<br><br>**2015** | *Kontext:* Rückblick Energie / Elektrochemie<br><br>*Typen:* Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle im PEM-Aufbau, DMFC | – Knallgaszelle mit Nickel-Pd-Elektroden<br>– Wirkungsgrade einer Brennstoffzelle anhand von Bausätzen bestimmen<br>– Modellversuch zur Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle |

Tabelle 5.3: Situierung von Brennstoffzellen in ausgewählten Schulbüchern für den Chemieunterricht der Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen.

Wie es der Lehrplan vorgibt, werden Brennstoffzellen im Bereich der Elektrochemie in Abgleich mit Batterien und Akkumulatoren aufgeführt. Die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle ist der häufigste in der Auswahl an Chemieschulbüchern thematisierte Brennstoffzelltyp, oft im PEM-Aufbau. Zumeist wird auch die DMFC als weiterer Typ kurz angeführt. Eine Besonderheit stellt ***Chemie heute*** aus dem Jahr 2013 dar: Im Anschluss an die Erläuterung der grundsätzlichen Funktionsweise von Brennstoffzellen am Beispiel von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen schließt ein Exkurs *Chemie-Recherche* zum Thema Elektrochemie und Energieversorgung an. Hier wird neben Methanol-Reforming und ökonomischen Kriterien der Batterieforschung auch eine „Bio-Batterie“ vorgestellt. Hierbei handelt es sich tatsächlich um eine durch Glucose-Zufuhr betriebene enzymatische Brennstoffzelle auf Basis von Glucose-Dehydrogenase (Anode) und Bilirubin-Oxidase (Kathode). Ergänzt wird diese Sachinformation durch die Aufgabenstellung, einen tabellarischen Vergleich zwischen dieser enzymatischen Brennstoffzelle und der Energiegewinnung in lebenden Zellen anzustellen - eine ergänzende Experimentieranweisung ist nicht gegeben.[167] Den Blick auf weitere Brennstoffzellsysteme zu richten ist auch in ***Chemie 2000+*** aus dem Jahr 2014 vorgesehen, so fordert eine Recherche-Aufgabe dazu auf, sich über weitere Brennstoffzelltypen zu informieren und diese kontrastierend einzuordnen.[169] In vier der sieben untersuchten Schulbücher sind Experimentieranleitungen für Schülerversuche enthalten, wobei zwei Bücher der Schulbuchreihe Chemie 2000+

zugehören. Es sind nur Versuche zur Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle in verschiedenen Anordnungen vorgeschlagen, mit Ausnahme der lowcost DMFC in ***Chemie 2000+*** aus dem Jahr 2007 Tausch und Wachtendonk [77][3].
Aus der Untersuchung dieser aktuellen Schulbücher - sowie den in Abschnitt 1.1.2 dargestellten Eindrücken einer Befragung von Chemie-Lehrkräften - ergibt sich das Desiderat nach Schulversuchen zu verschiedenen Brennstoffzelltypen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde sich dessen angenommen, indem lowcost Versuche zu verschiedenen Brennstoffzelltypen (weiter-)entwickelt wurden. Diese kommen weitestgehend mit typischer Schulausrüstung sowie Alltagsmaterialien aus.

### 5.4.4. Brennstoffzellen in der fachdidaktischen Literatur

Beiträge zur Brennstoffzelle sind seit geraumer Zeit recht kontinuierlich Teil der fachdidaktischen Literatur für die Chemie sowie die Physik vertreten.[10,81,96,171–181] Die Artikel umfassen sowohl konzeptuelle als auch experimentelle Beiträge. Die experimentellen Beiträge bilden dabei die Vielfalt an Brennstoffzellsystemen ab. Sie variieren stark hinsichtlich der didaktischen Intention, der eingesetzten Brennstoffe, des Materialaufwandes und des Gefahrenpotentials eingesetzter Komponenten.[171,173,177–179]
Allen Beiträgen ist jedoch gemein, dass vorgeschlagene Experimente zu Brennstoffzellen einen Modellcharakter aufweisen, bei dem keine kontinuierliche Zufuhr der Edukte sowie kein Ablass der Produkte erfolgt.
Nachfolgend werden nur für diese Arbeit relevante Brennstoffzelltypen aufgegriffen:

#### *Alkalische Brennstoffzellen*

Als lowcost Variante zu gängigen, kommerziell erhältlichen Experimentiersets zu Brennstoffzellen stellten Tausch u. a. [10] im Jahr 2002 einen einfachen Modellversuch einer alkalischen Brennstoffzelle vor. In diesem Versuch erfolgt in einem Zweischritt, da zunächst Brennstoff und Oxidationsmittel generiert werden, bevor die Brennstoffzelle betrieben wird: In einem Becherglas wird Kalilauge vorgelegt, zwei Rasierscherfolien werden eingebracht und die Lösung mithilfe einer Spannungsquelle elektrolysiert. Die entstehenden Gase lagern sich an den Scherfolien an. Anschließend wird beim Betrieb der Brennstoffzelle anstelle der Spannungsquelle ein Messgerät oder Propeller in den Stromkreis integriert.[10]

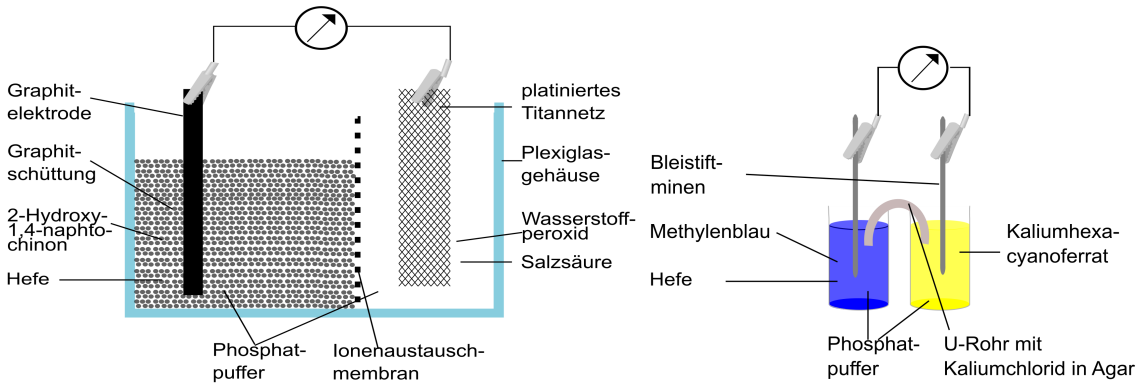
#### *Biologische Brennstoffzellen*

[3] Die Schulversuche zu Brennstoffzellen werden an dieser Stelle nicht ausformuliert, da sie zum Teil die jeweiligen Ausgangspunkte für eigene Messungen darstellten und im Experimentalteil in Anhang B aufgeführt sind.

Nachdem Bennetto [81] im Jahr 1990 eine mikrobielle Brennstoffzelle im Schülerversuch unter Verwendung von *Escherichia coli* publizierte,[81] stellten Wenck u. a. [171] 1995 in einem Übersichtsartikel Versuche zu verschiedenen Brennstoffzellsystemen vor. Neben der Meerwasser-Zelle[4] und Formiat-Zelle finden auch die Hefe-Brennstoffzelle und eine auf Glucoseoxidase basierende enzymatische Brennstoffzelle Erwähnung. Sowohl in der Hefe- als auch der Glucoseoxidase-Brennstoffzelle wird Glucose als Substrat verwendet. Während in der Hefe-Brennstoffzelle Methylenblau als exogener Mediator eingesetzt wird, benötigt die präsentierte Glucoseoxidase-Brennstoffzelle keinen.[171]
Die Impulse zu Schulversuchen zu biologischen Brennstoffzellen wurden von Orth und Wenck [172] im Jahr 2001 aufgegriffen: Erneut werden eine Hefe-Brennstoffzelle und eine Glucoseoxidase-Brennstoffzelle vorgestellt. Beide Systeme werden in eigens zu diesem Zweck speziell gefertigten Plexiglas-Gehäusen betrieben. Sie sind auf eine Nafion®-Membran und Phosphatpuffer angewiesen, nutzen Graphitstabelektroden in Graphitgranulatschüttungen beziehungsweise platinierte Titanstrecknetze als Elektroden. Kathodenseitig kommen jeweils Salzsäure und Wasserstoffperoxid zum Einsatz. Anodenseitig wird jeweils der dem Biokatalysator zugehörige Mediator eingebracht, 2-Hydroxy-1,4-naphtochinon bei der Hefe beziehungsweise Methylenblau bei der Glucoseoxidase. Mit diesen Systemen können jeweils Mikromotoren betrieben werden.[172]
Ein weitaus weniger komplexer Aufbau einer Hefe-Brennstoffzelle findet sich im Jahr 2017 in der internationalen Fachdidaktik bei Silveira u. a. [91]. Die Halbzellen werden jeweils von Bechergläsern umfasst und sind über ein mit Kaliumchlorid in Agar gefülltes U-Rohr leitend verbunden. Als Elektroden werden Bleistiftminen genutzt. In beiden Halbzellen ist Phosphatpuffer enthalten. Kathodenseitig wird Kaliumhexacyanoferrat als Reduktionsmittel genutzt, anodenseitig Methylenblau als Redox-Mediator.[91] Zur besseren Übersichtlichkeit sind diese beiden Aufbauten einander in Abbildung 5.3 vergleichend gegenübergestellt.

In der Didaktik der Chemie hat die Hefe-Brennstoffzelle soweit an Popularität gewonnen, dass im Jahr 2015 eine Abituraufgabe für das Fach Chemie darüber gestellt worden ist.[182]
Auch in der Didaktik des Physikunterrichts ist ein Versuch zur Hefe-Brennstoffzelle angekommen: Almer und Gerl [96] schlagen eine Unterrichtsequenz vor, in der Lernende ein Plexiglas-Element selbst zusammenbauen, mithilfe von Pipetten die

[4] Da jedoch die Aluminiumelektrode verbraucht wird, sind die ablaufenden Prozesse nicht reversibel und die Zuordnung des Begriffes „Brennstoffzelle “ fragwürdig.




(a) nach Orth und Wenck [172] (b) nach Silveira u. a. [91]

Abbildung 5.3: Schematischer Vergleich zweier in der Literatur vorgeschlagener Aufbauten der Hefe-Brennstoffzelle.

flüssigen Komponenten einbringen und während des Betriebs der Brennstoffzelle die Ladekurve eines Kondensators aufnehmen. Auch dieses System nutzt anodenseitig eine Suspension aus Hefe, Glucose und Methylenblau und kathodenseitig eine Kaliumhexacyanoferrat-Lösung. Interessanterweise wird angegeben, dass auf die Verwendung eines Puffers wegen des geringen Effektes verzichtet wird.[96]

***Direkt-Methanol-Brennstoffzellen***

Von Sina [174] wurde im Jahr 2003 ein Modellversuch zur alkalischen Methanol-Brennstoffzelle vorgestellt. Dieser kommt mit lowcost Materialien aus und ist nach eigenen Angaben schülergeeignet[5]: Eine (transparente) Filmdose wird mithilfe eines eingeklebten Schwammtuches in zwei gleich große Räume geteilt. In beide Räume ragt jeweils eine gerollte Rasierscherfolie, wobei in eine zusätzlich ein Gaseinleitungsschlauch eingearbeitet ist. Die Halbzelle mit Gaseinleitung wird mit Kalilauge befüllt, die andere mit einem Gemisch Methanol und Kalilauge zu gleichen Teilen. Als Oxidationsmittel dient Luftsauerstoff.[174]

Zehn Jahre später erschien ein Artikel von Enßle u. a. [179], in dem Versuche mit einem Experimentierset zur PEM der Firma H-Tec Education GmbH beschrieben werden[6]. Es wurden dabei vergleichend alkalische Methanol-, Formaldehyd- und Ameisensäure-Lösungen verwendet, da bei der kalten Verbrennung des Methanols zu Kohlenstoffdioxid beispielsweise Formaldehyd und Ameisensäure als Zwischenformen angenommen wurden.[179]

[5] Eine Einschätzung des Gefährdungspotentials von Methanol erfolgte bereits in Kapitel 4.3.

[6] Die Firma H-Tec Education stellte ihre Arbeit zum Ende des Jahres 2018 ein. Der Bausatz *H-TEC 2010 Solar Wasserstoff System Junior Basic* wird gebraucht online für etwa 320 Euro angeboten.

# 6. Übersicht und Einblick in entwickelte Materialien

Im Rahmen dieser Promotionsarbeit wurden Lehr-/Lern-Materialien in analogen und digitalen Formaten erstellt, die in den entwickelten Lernarrangements genutzt werden. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über alle entwickelten Materialien. Zusätzlich werden einzelne entwickelte Materialien darin detaillierter präsentiert. Aufgrund der in Kapitel 5.3 geschilderten Überlegungen war vorgesehen, ausschließlich digitale Formate zu entwickeln. Da die entsprechende Software nicht wie geplant zur Verfügung stand, wurden in einem Zwischenschritt auch analoge Formate geschaffen. In Abschnitt 6.1 werden die erstellten Videos vorgestellt, die zunächst als Ergänzung der analogen Materialgefüge (Abschnitt 6.2) Einsatz fanden, bevor sie in E-Books eingepflegt werden konnten. Die Vorstellung der E-Books unter Abschnitt 6.3 schließt dieses Kapitel ab.

## 6.1. Videos

Es wurden mehrere Videos zum Einsatz in Lernarrangements erstellt. Damit wurde dem Befund entsprochen, dass Videos das liebste Lernmedium von Schülern sind (vgl. Kapitel 5.3). Die Mehrheit der Videos weist einen inhaltlichen Bezug zu mikrobiellen Brennstoffzellen auf (vgl. Tab.6.1).[1] In Kooperation mit der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie an der Universität Hohenheim entstanden filmische Interviews mit den zwei Forscherinnen Dr. Padma Priya Ravi und Dr. ing. Anastasia Oskina. Dr. Padma Priya Ravi gewährte einen authentischen Einblick in aktuelle Forschung an mikrobiellen Brennstoffzellen vor Ort. Daneben wurden an der Universität Tübingen durch den Studenten Fabian Krämer unter Anleitung der Autorin Videos zu Schulversuchen zur mikrobiellen Brennstoffzelle mit Bäckerhefe als Biokatalysator erstellt. Somit stehen nun sowohl Videos zu mikrobiellen Brennstoffzellen in der praktischen Forschung, als auch im didaktisch reduzierten Aufbau im schulischen

[1] Den Videos wurde eine Kennung zugewiesen, um ohne Umschreibungen in weiteren Abschnitten der Arbeit darauf Bezug nehmen zu können.

Kontext bereit. Ergänzt werden diese durch ein weiteres Video, das als Einführung in die Thematik mikrobieller Brennstoffzellen dient.

| **Kennung** | **Titel** | **Umfang** |
|---|---|---|
| ITV-MBZ-dt/ ITV-MBZ-en | Aktuelle Forschung zu mikrobiellen Brennstoffzellen / Current research on microbial fuel cells | 4:52 min. |
| Labor-MBZ-dt/ Labor-MBZ-en | Einblick in praktische Forschung zu mikrobiellen Brennstoffzellen / Insight into practical research on microbial fuel cells | 5:35 min. |
| MBZ-tonlos | Mikrobielle Brennstoffzellen - Kurzportrait - | 4:21 min. |
| MBZ-Ton | Mikrobielle Brennstoffzellen - Kurzportrait - | 3:34 min. |
| VRedox | Redox-Aktivität von Hefe | 6:23 min. |
| VZweiT | Zwei-Topf-Aufbau einer Hefe-Brennstoffzelle | 6:23 min. |
| VEinT | Ein-Topf-Aufbau einer Hefe-Brennstoffzelle | 6:06 min. |
| ITV-Priya-dt/ ITV-Priya-en | MINT-Forschende im Fokus, im Gespräch mit Dr. Padma Priya Ravi / STEM researchers in focus, talking to Dr. Padma Priya Ravi | 5:21 min. |
| ITV-Ana-dt/ ITV-Ana-en | MINT-Forschende im Fokus, im Gespräch mit Dr. ing. Anastasia Oskina / STEM researchers in focus, talking to Dr. ing. Anastasia Oskina | 4:54 min. |

Tabelle 6.1: Übersicht über die 13 im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit entstandenen Videos.

Zusätzlich wurden die beiden Forscherinnen, Dr. Padma Priya Ravi und Dr. ing. Anastasia Oskina von der Universität Hohenheim, zu ihren jeweiligen Werdegängen interviewt. Die entstandenen Videos können losgelöst von Inhalten zur mikrobiellen Brennstoffzelle eingesetzt werden. Dr. ing. Anastasia Oskina stellte zudem das Verfahren der Cyclovoltametrie in Theorie und Laborpraxis vor. Dieses filmische Rohmaterial wird im Anschluss an diese Arbeit aufgearbeitet.
Die Videos sind mithilfe der Freeware „DaVinci Resolve“ bearbeitet worden. Sofern nicht anders gekennzeichnet, sind die integrierten Abbildungen selbst erstellt.

Die fertiggestellten Videos stehen in deutscher Sprache auf der Homepage der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal [183] zur Ansicht bereit, die englischen Varianten werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.

### 6.1.1. Interviewsequenzen an der Universität Hohenheim

Da in der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie an der Universität Hohenheim interdisziplinär Forschung an mikrobiellen Brennstoffzellen betrieben wird, wurde Kontakt zu der dortigen Mitarbeiterin Dr. Padma Priya Ravi aufgenommen und ihr eine Kooperation mit der Didaktik der Chemie vorgeschlagen. Diese Kooperation bestand darin, dass zwei Forscherinnen der Landesanstalt sowohl über ihren jeweiligen Werdegang als auch ihre aktuelle Forschungsprojekte vor laufender Kamera berichteten, und, im Gegenzug die Aufnahmen seitens der Autorin bearbeitet und zur Verfügung gestellt wurden. Auf diese Weise erhielt die Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie Videos für die Öffentlichkeitsarbeit. In der Didaktik der Chemie werden die Videos zu den Werdegängen von Frauen in MINT-Berufen zur Berufsorientierung beziehungsweise für einen authentischen Einblick in aktuelle Forschung zu mikrobiellen Brennstoffzellen genutzt.

Am 02.05.2019 wurden in den Räumlichkeiten der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie an der Universität Hohenheim verschiedene Sequenzen gefilmt. Insgesamt entstand über 90 Minuten filmisches Rohmaterial. Belichtung, Kamera- und Interviewführung oblagen der Autorin.

#### 6.1.1.1. Vorüberlegungen und Planungen

Die beiden Interviewpartnerinnen wurden bewusst und willkürlich aus einem Projekt-Team ausgewählt. Während Dr. Padma Priya Ravi studierte Biotechnologin ist, ist Dr. ing. Anastasia Oskina Elektroingenieurin. In den Interviews zu den Werdegängen wird daher die Notwendigkeit und Selbstverständlichkeit interdisziplinären Arbeitens in Forschung und Entwicklung deutlich. Als Frauen in MINT-Berufen nehmen sie zusätzlich eine Vorbildfunktion ein.
Sie nahmen freiwillig an der Kooperation teil und wurden nicht bezahlt. Im Vordergrund der geplanten Interviewsequenzen stand keine wissenschaftliche Fragestellung oder deren Beantwortung, sondern vielmehr die Aufzeichnung einer individuellen und subjektiven Expertensicht. Die Interviews sind daher qualitativ angelegt.[184] Neben der Vorbereitung hinsichtlich Kameraführung, Belichtung, Auswahl von Bildausschnitten, Positionierung des Interviewers und Anweisungen an die Interviewpartner durch einen Experten vom Lehrstuhl für Didaktik der visuellen Kommunikation und Mediendesign an der Bergischen Universität Wuppertal, Fridhelm Büchele, wurden folglich Interviewkonzepte ausgearbeitet. Es wurden Leitfadeninterviews als halbstandardisiertes Verfahren gewählt. Dabei ist die Reihenfolge der Fragen vorgegeben. Durch ein offenes Frageformat sind ausführliche Antworten möglich, sodass die Be-

fragten mehr oder andere Informationen geben können, als womöglich im Vorfeld erwartbar. In dieser unnatürlichen sozialen Situation des Face-to-face-Interviews vor der Kamera sind Nachfragen durch den Interviewer grundsätzlich möglich.[184] Aufgrund der zeitgleichen Kamera- und Interviewführung ist die Interviewerin nicht im Bildausschnitt sichtbar.
Die Leitfadeninterviews wurden nach Helfferich [185] ausgearbeitet. Neben einer Leitfrage, die als Erzählaufforderung gilt, wird vorab überlegt, welche inhaltlichen Aspekte erwartbar sind. Zusätzlich werden Nachfragen mit obligatorischer Formulierung fixiert, um in der Interviewsituation angemessen reagieren zu können.

| **Leitfrage** | **Inhaltliche Aspekte** | **Nachfragen** |
|---|---|---|
| Liebe Priya, wusstest du schon immer, dass du Forscherin werden wolltest? | Kindheitserinnerungen | Was wolltest du als Kind werden? |
| Was hast du studiert? | Studiengang, eventuell Schwerpunkt | Welchen Studiengang hast du im Bachelor, welchem im Master studiert?<br>Hast du einen Schwerpunkt im Studium gelegt? |
| Gab es ein Schlüsselerlebnis dafür, in die Forschung zu gehen? | Aha-Momente | Hattest du Vorbilder? |
| Wie sieht dein Arbeitsalltag aus? | Aufgaben, Verhältnis von Theorie und Praxis | Welchen Tätigkeiten gehst du nach? |
| Was gefällt dir an deiner Arbeit besonders gut? | Themenbezogene Tätigkeiten | Was machst du gerne bei der Arbeit? |
| Was ist dein wissenschaftliches Ziel? | Aufklärung / Verbesserung | Welcher Fragestellung möchtest du auf den Grund gehen? |
| Was glaubst du, ist die größte Herausforderung der Wissenschaft im Bereich der nachhaltigen Energieversorgung? | | |

Tabelle 6.2: Leitfadeninterview zum Werdegang von Dr. Padma Priya Ravi.

Dieses Interviewschema ist in Tabelle 6.2 beispielhaft für das Video ITV-Priya-dt dargestellt, in dem Dr. Padma Priya Ravi zu ihrem Werdegang befragt wird. Die übrigen Leitfadeninterviews als Basis für die Videos ITV-MBZ-dt, ITV-MBZ-en, Labor-MBZ-dt, Labor-MBZ-en, ITV-Priya-en, ITV-Ana-dt und ITV-Ana-en befin-

den sich im digitalen Anhang dieser Arbeit.
Zunächst wurde Deutsch als Interviewsprache gewählt, um Schülern einen leichteren Zugang zu gewähren. Die Fragen wurden vorab zur Vorbereitung an die Interviewpartnerinnen versandt, da Deutsch nicht die Erstsprache der beiden Interviewpartnerinnen ist. Kurz vor den Aufnahmen wurde dennoch erbeten, die Interviews in englischer Sprache durchzuführen.

#### 6.1.1.2. Gestaltung der Videos

Da die Aufnahmen auf englischer Sprache erfolgten, wurde jedes geplante Video in der englischen Originalsprache und mit deutscher Overlay-Tonspur mit der Stimme der Autorin angefertigt. Um im Deutschen einen Unterschied zwischen Interviewfrage und Antwort (hinsichtlich der Akustik) zu gewährleisten, wurden die Interviewfragen als Texte eingeblendet und mit Musik hinterlegt. Zur Einheitlichkeit wurde bei den englischsprachigen Videos analog verfahren. Weiterhin wurden die Interviews didaktisch aufbereitet. Zum erleichterten Verständnis sind beispielsweise Phasierungen erfolgt, Realsequenzen aus dem Labor mit Beschriftungen versehen worden (vgl. Abb. 6.1(a) ), schematische Aufarbeitungen (vgl. Abb. 6.1(b)) sowie Reaktionsgleichungen und Definitionen integriert worden. Die Gestaltung der Videos erfolgte möglichst




(a) Realsequenz mit eingeblendeter Beschriftung (b) Schema der vorgestellten MBZ

Abbildung 6.1: Einblicke in das Video Labor-MBZ-dt.

einheitlich, um einen Wiedererkennungswert zu generieren. Alle Videos sind im Querformat aufgenommen. Neben einem Titel in schwarzer Schrift auf weißem Hintergrund sind die Logos der Universität Wuppertal sowie der Didaktik der Chemie platziert. Phasierungen erfolgen über das Einblenden von Zwischentiteln in schwarzer Schrift auf weißem Hintergrund im Fullscreen-Format. Oben links in der Ecke ist stets das in Schwarz gehaltene Logo der Didaktik der Chemie sowie der Name der Autorin vermerkt. Angesprochene Aspekte werden durch Einblenden blassroter Ovale in den Schemazeichnungen verdeutlicht (vgl. Abb. 6.1(b)). Alle Videos sind mit

lizenzfreier Musik hinterlegt, wobei die Lautstärke variiert wird: Bei Einblendungen des Titels, der Zwischentitel und des Abspanns ist die Musik lauter als während der Sprachsequenzen.

Die aufbereiteten Videos sowie auch die jeweilig transkribierten Texte in deutscher und englischer Sprache befinden im digitalen Anhang dieser Arbeit. Zur besseren Übersichtlichkeit folgt an dieser Stelle nur jeweils eine knappe Inhaltsangabe, die jeweils für die deutsche und englische Version gleichermaßen gilt:

**ITV-MBZ-dt/ITV-MBZ-en** In einer Bürosituation beschreibt Dr. Padma Priya Ravi zunächst, was man unter einer mikrobiellen Brennstoffzelle versteht. Es handele sich dabei um eine Apparatur, in der mithilfe von Mikroben als Biokatalysatoren organische oder anorganische Substanzen in Bioenergie umgewandelt werden können. Anschließend beschreibt sie vier inhaltliche Etappen, die sie im Rahmen ihres Promotionsprojektes zu bewältigen hatte: (1.) Das Überführen von Bioabfällen in Hydrolysat zum Einsatz in der mikrobiellen Brennstoffzelle, (2.) die Gewinnung von hochreinem Biogas, (3.) vergleichenden Einsatz von Hydrolysat und Permeat (gefiltertes Hydrolysat) und schließlich (4.) den Betrieb eines großen mikrobiellen Brennstoffzell-Reaktors.

**Labor-MBZ-dt/Labor-MBZ-en** In einer Laborsituation erläutert Dr. Padma Priya Ravi am Realobjekt den Aufbau einer mikrobiellen Brennstoffzelle, in der aus Rückständen von Lebensmittelabfällen Bioenergie gewonnen werden kann. Sie benennt die Komponenten, die notwendigen Verfahrensschritte zur Inbetriebnahme des Reaktors, und, führt aus, wie eine Messung abläuft. Zusätzlich zu einem kleinen Reaktor verdeutlicht sie ihre Beschreibungen an einem großen Reaktor, der ein etwa vierfaches Reaktorvolumen aufweist.

**ITV-Priya-dt/ITV-Priya-en** Dr. Padma Priya Ravi gibt anhand der in Tabelle 6.2 aufgeführten Fragen Auskunft zu ihrem Werdegang. Insbesondere der räumliche Wechsel von Indien nach Deutschland, sowie ihr Bedürfnis mit ihrer Forschung einen Anteil zur Verbesserung der Lebensbedingungen beitragen zu wollen, kommen zur Sprache.

**ITV-Ana-dt/ITV-Ana-en** Dr. ing. Anastasia Oskina gewährt Einblick in ihren Werdegang. Sie kommt aus Russland und hat dort Elektrotechnik studiert. Ursprünglich habe sie nicht in die Forschung gehen wollen. Da die Eintönigkeit anderer Arbeitsbereiche von Elektroingenieuren sie jedoch abschreckte, ist sie nun doch in der Forschung angekommen. Besonders die Abwechslung und stets neuen kognitiven Herausforderungen hat sie zu schätzen gelernt.

### 6.1.2. Mikrobielle Brennstoffzellen - Kurzportrait -

Zur thematischen Einführung in mikrobielle Brennstoffzellen wurde ein kurzes Video konzipiert, das sowohl mit Tonspur als auch tonlos mit Untertiteln umgesetzt wurde. So kann je nach didaktischem Einsatzszenario eine der Varianten ausgewählt werden. Die Gestaltungselemente sind analog zu den bereits beschriebenen Videos. Neben Schemata zur thematischen Hinführung sind Realsequenzen aus Hohenheim als Inserts enthalten (siehe auch Abb. 6.2). Aufgrund des Corporate Designs der Universität Wuppertal bestehen die Untertitel des tonlosen Videos aus weißer Schrift auf grünem Grund.




(a) Realansicht einer MBZ (b) Schematische Darstellung einer MBZ

Abbildung 6.2: Einblicke in das Video **MBZ-tonlos** mit Untertiteln.

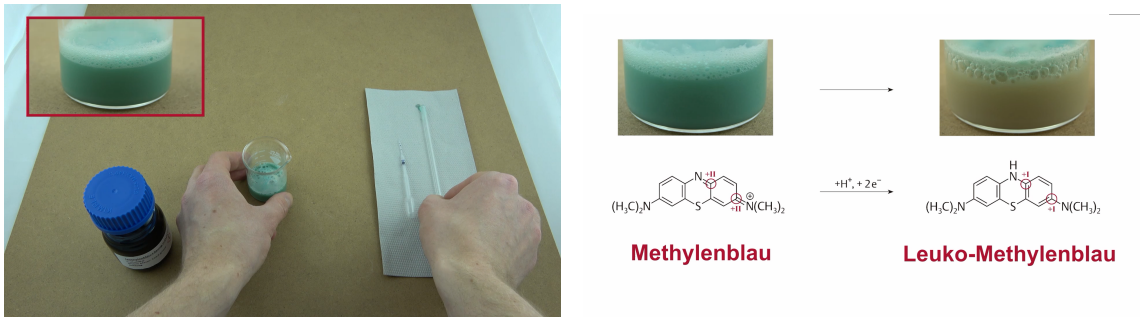
Die tonlose Variante ist länger als die vertonte, um dem Betrachter zu ermöglichen, neben dem Lesen der Untertitel auch die synchronisierten Schemata zu beachten. Beide Videos sind jedoch inhaltsgleich[2]

**MBZ-tonlos/MBZ-Ton** In dem Video wird die Funktion von Brennstoffzellen als Energiewandler, sowie der Aufbau von Brennstoffzellen allgemein und im speziellen der mikrobiellen Brennstoffzellen anhand von Schemata kurz dargestellt. Weiterhin wird auf die Einsatzgebiete mikrobieller Brennstoffzellen hingewiesen und ein authentischer Einblick in aktuelle Forschung zum Thema an der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim gegeben. Es wird die Besonderheit angeführt, dass in dem dortigen Aufbau neben Strom auch Biogas gewonnen wird. Das Video wird durch einen Ausblick zum möglichen Beitrag mikrobieller Brennstoffzellen zur angestrebten Energiewende abgerundet.

[2]Die Videos sowie der zugrundeliegende Text befindet sich im digitalen Anhang dieser Arbeit.

### 6.1.3. Videos zu Schulversuchen der Hefe-Brennstoffzelle

Die Videos zu Schulversuchen der Hefe-Brennstoffstelle sind von Krämer [186] angeleitet durch die Autorin an der Universität Tübingen erstellt worden. Im Nachgang wurden sie durch die Autorin unter Kennzeichnung des Urhebers mit einem Titel und Abspann gemäß des Corporate Design der Universität Wuppertal versehen.




(a) Experimentiersequenz (b) Beobachtung und Erklärung

Abbildung 6.3: Einblicke in das Video VRedox.

Die Videos finden Einsatz in vielen Lernarrangements in Zusammenhang mit dieser Arbeit: Sie beginnen jeweils mit einer Vorstellung der benötigten Materialien. Dem schließt sich die detaillierte Durchführung der Versuche an, bei der auch auf typische Fehler hingewiesen wird. Nach der jeweiligen Beobachtung oder Messung folgt eine knappe Auswertung, bei der auch Strukturformeln eingebracht werden (vgl. Abb. 6.3).

## 6.2. Analoge Materialien

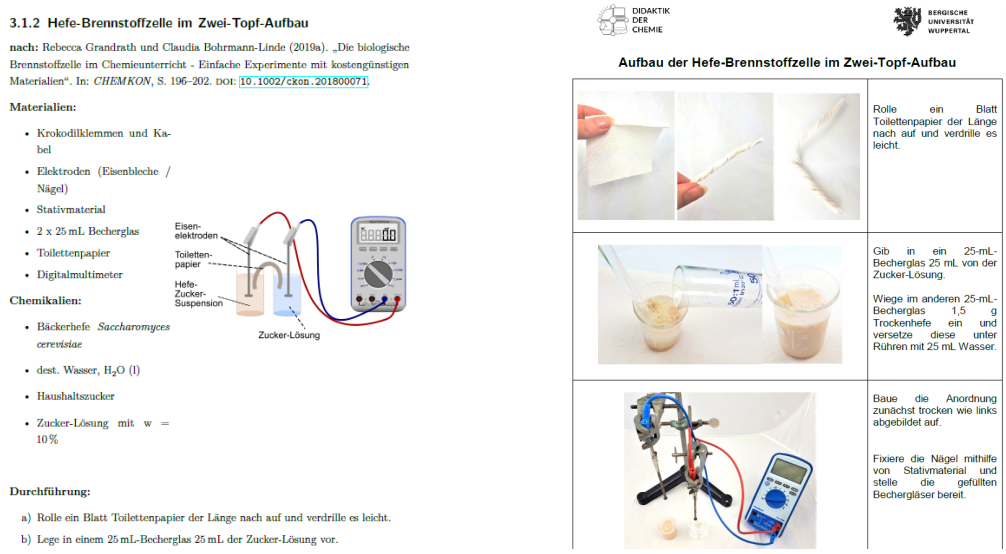
Zur Begleitung der entwickelten Lernarrangements wurden umfangreiche analoge Materialien entwickelt, die in Tabelle 6.3 stichpunktartig aufgeführt sind. Da die Fotodokumentationen in verschiedenen Settings eingesetzt wurden, sind sie auch in der Tabelle keinem konkret zugeordnet. Sie finden sich neben weiteren Begleitmaterialien geringeren Umfangs (zum Beispiel separaten Concept-Maps) im digitalen Anhang. In diesem Abschnitt werden Gestaltungsmerkmale und der inhaltliche Aufbau genannt sowie am Beispiel des Skripts zum Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* für die Sekundarstufe II und des Skripts zur selbst erstellten und mehrfach erprobten Lehrkräfte-Fortbildung beleuchtet.

| **Lernarrangement** | **Material** | **Umfang** |
|---|---|---|
| *Brennstoffzellen weitergedacht!* | Skript für Lernende der gymnasialen Oberstufe | 43 Seiten |
| | Skript für Lernende der Junior Uni | 40 Seiten |
| *Alleskönner Brennstoffzellen?!* | Skript für Lernende der gymnasialen Oberstufe | 52 Seiten |
| | Skript für Lernende der Junior Uni | 52 Seiten |
| | Fotodokumentationen zu Brennstoffzellen-Modellversuchen für die Sekundarstufe II | 12 Seiten |
| | Fotodokumentationen zu Brennstoffzellen-Modellversuchen für die Sekundarstufe I | 12 Seiten |
| *Lehrkräfte-Fortbildung* | Skript für Lehrkräfte inklusive Gefährdungsbeurteilungen | 50 Seiten |

Tabelle 6.3: Übersicht über im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellte analoge Materialien.

Zur Gestaltung der analogen Materialien wurde das Schriftsatzsystem LaTeX verwendet und daraus pdf-Formate generiert. Die Materialien sind im Hochformat in DIN A4 angelegt. Die Skripte sind als umfassende Portfolios gedacht, weswegen sie meist recht umfangreich sind. Die Einheiten eines Lernarrangements sind stets als Kapitel gegliedert und zur besseren Adaption gleichförmig aufgebaut. Neben inhaltlicher Übersichtlichkeit wurde eine zielgruppengerechte Sprachlichkeit angestrebt, um ein selbstständiges Erarbeiten und Durchdenken zu ermöglichen.[187] Versuchsanweisungen sind jeweils als Unterkapitel in die Einheiten eingepflegt. Das Layout ist dabei immer gleich, um einen Wiedererkennungseffekt zu erzielen.
Als Hilfestellung wurden Fotodokumentationen mit einem Umfang von zwei Seiten je Versuch angefertigt. In den Dokumentationen ist tabellarisch jedem Schritt der Durchführung ein Foto als Realaufnahme zugewiesen. Zum Teil sind wichtige Be-

reiche der Fotos durch farbige Markierung hervorgehoben. In Abbildung 6.4 sind



### 3.1.2 Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

**nach:** Rebecca Grandrath und Claudia Bohrmann-Linde (2019a). „Die biologische Brennstoffzelle im Chemieunterricht - Einfache Experimente mit kostengünstigen Materialien". In: *CHEMKON*, S. 196–202. DOI: 10.1002/ckon.201800071.

**Materialien:**

- Krokodilklemmen und Kabel
- Elektroden (Eisenbleche / Nägel)
- Stativmaterial
- 2 x 25 mL Becherglas
- Toilettenpapier
- Digitalmultimeter

Eisen-elektroden
Toiletten-papier
Hefe-Zucker-Suspension
Zucker-Lösung

**Chemikalien:**

- Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*
- dest. Wasser, $H_2O$ (l)
- Haushaltszucker
- Zucker-Lösung mit w = 10 %

**Durchführung:**

a) Rolle ein Blatt Toilettenpapier der Länge nach auf und verdrille es leicht.

b) Lege in einem 25 mL-Becherglas 25 mL der Zucker-Lösung vor.

DIDAKTIK DER CHEMIE — BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

**Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau**

Rolle ein Blatt Toilettenpapier der Länge nach auf und verdrille es leicht.

Gib in ein 25-mL-Becherglas 25 mL von der Zucker-Lösung.

Wiege im anderen 25-mL-Becherglas 1,5 g Trockenhefe ein und versetze diese unter Rühren mit 25 mL Wasser.

Baue die Anordnung zunächst trocken wie links abgebildet auf.

Fixiere die Nägel mithilfe von Stativmaterial und stelle die gefüllten Bechergläser bereit.

(a) Versuchsbeschreibung im Skript (b) Fotodokumentation

Abbildung 6.4: Ausschnitte aus Begleitmaterialien zur Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau für Lernende der Sekundarstufe I.

vergleichend Abschnitte aus einer im Skript enthaltenen Versuchsbeschreibung sowie aus der entsprechenden Fotodokumentation zum Versuch Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau jeweils in der Version für die Sekundarstufe I dargestellt.

### 6.2.1. Aufbau des Skripts zu *Brennstoffzellen weitergedacht!* für Lernende der Sekundarstufe II

Das Skript umfasst 43 Seiten. Der Umfang resultiert aus der Überlegung, dass die Lernenden auch im Nachgang des Kurses über ein Kompendium zum Nachvollziehen und eventuellen Nacharbeiten der Inhalte verfügen sollen. So werden nicht alle eingefügten Informationstexte obligatorisch in das Kursgeschehen aufgenommen, sondern dienen als didaktische Reserven oder Material zum Nacharbeiten. Beispielsweise ist ein Text inkludiert, der allgemein über Brennstoffzellen informiert. Im Kursgeschehen ist eine interaktive Erarbeitung dieser Inhalte vorgesehen.
Jeder der fünf Einheiten ist ein Kapitel gewidmet. Während das erste Kapitel durch verschiedene fachliche Grundlagen in Unterkapitel gegliedert ist, erfolgt diese Unterteilung in den folgenden Einheiten durch zentrale Fragestellungen. So ist beispielsweise *Fragestellung 1: Eignet sich Bäckerhefe als Katalysator in Brennstoffzellen?* ein Unterkapitel des Kapitels *3. Biologie-Perspektive*. Im Material selbst sind **Info-Texte** fett als solche gekennzeichnet (vgl. Abb. 6.5(a)) und auch der Begriff **Aufgaben** auf

diese Weise hervorgehoben, um einen schnellen Überblick zu ermöglichen.
Am Ende jeder Einheit ist ein Unterkapitel *Erkenntnisse der Einheit* situiert. An dieser Stelle sollen die wichtigsten Ergebnisse fixiert werden, um eine Sicherung der Fachinhalte zu gewährleisten. Dort sind bereits einige Begriffe eingetragen oder Strukturen vorgegeben, aber auch Platz für handschriftliche Ergänzungen durch die Lernenden vorhanden (vgl. Abb. 6.5(b)).




(a) Info-Text (b) Ergebnissicherung

Abbildung 6.5: Ausschnitte aus Begleitmaterialien zum Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* für Lernende der Sekundarstufe II.

## 6.2.2. Aufbau des Skriptes zur Lehrkräftefortbildung

Das Skript zur Lehrkräftefortbildung ist mit 50 Seiten umfangreicher, da es als ein weiterführendes Portfolio zu verstehen ist. Es ist in sieben Kapitel untergliedert. Zunächst wird dargelegt, welche Bedeutung Brennstoffzellen im Zuge der angestrebten Energiewende haben (Kapitel 1) und welche Anknüpfungspunkte sich im Chemieunterricht ergeben (Kapitel 2). Dem folgen vier Kapitel zu den im Workshop praktisch zu erschließenden Brennstoffzelltypen. Diese Kapitel beginnen jeweils mit einem Unterkapitel, in dem die wichtigsten Eckdaten des Brennstoffzelltyps und seiner technischen Nutzung präsentiert werden (vgl. Abb. 6.6(a)), bevor die Versuchsanweisungen zu den lowcost Experimenten inklusive Beobachtungs- und Auswertungsaufträgen situiert ist. Die Kapitel werden jeweils mit einem Unterkapitel zum Abgleich der technischen Realität mit dem Modellversuch abgerundet (vgl. Abb. 6.6(b)). Weiterhin sind in dem Skript weiterführende Literaturhinweise sowie die in dem Online-Portal DEGINTU erstellten Gefährdungsbeurteilungen zu jedem der integrierten Versuche enthalten.

## Inhaltsverzeichnis


1 Die Bedeutung von Brennstoffzellen 1

2 Anknüpfungspunkte im Chemieunterricht 3

3 Alkalische Brennstoffzelle 4
- 3.1 Hintergrundwissen zur Alkalischen Brennstoffzelle . . . 4
- 3.2 V: Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle . . . 6
- 3.3 V: Modellversuch zu Brennstoffzellen mit Alltagschemikalien . . . 8
- 3.4 Vergleich zwischen dem Modellversuch zur AFC und der technischen Realität 10

4 Alkoholische Brennstoffzelle 11
- 4.1 Hintergrundwissen zur Alkoholischen Brennstoffzelle . . . 11
- 4.2 V: Modellversuch zur Direkt-Alkoholischen Brennstoffzelle . . . 12
- 4.3 Vergleich zwischen dem Modellversuch zur DAFC und der technischen Realität 14

5 Mikrobielle Brennstoffzellen 15
- 5.1 Hintergrundwissen zu mikrobiellen Brennstoffzellen . . . 15
- 5.2 V: Redoxaktivität von Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* . . . 17
- 5.3 V: Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau . . . 19
- 5.4 V: Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau . . . 22


(a) Einblick in das Inhaltsverzeichnis

## 2 Anknüpfungspunkte im Chemieunterricht

Brennstoffzellen als solche sind in allen Lehrplänen für Chemie in der Sekundarstufe II an Gymnasien verankert. Ist festgelegt, welcher Brennstoffzelltyp anzusprechen ist, handelt es sich um die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle, nur in einem Fall ist die Methanol-Brennstoffzelle aufgeführt (Bremen). Dabei ist die Vielfalt an Brennstoffzellen deutlich größer (vgl. vorheriges Kapitel). Insbesondere Niedertemperaturbrennstoffzellsysteme sind grundsätzlich für die experimentelle Integration in den Schulunterricht geeignet.
Als mögliche fachliche Anknüpfungspunkte im Chemieunterricht für Brennstoffzellen allgemein können die Themenbereiche

Elektrochemie ⟶ Galvanische Elemente ⟶ Brennstoffzellen

beziehungsweise auch der Bereich der *Katalyse* gewählt werden. Auch anhand des verwendeten Brennstoffes kann Anschluss an die Lehrpläne geknüpft werden, beispielsweise kann die Methanol-Brennstoffzelle im Bereich der *Alkohole* und die Hefe-Brennstoffzelle im Bereich der *Kohlenhydrate* besprochen werden.

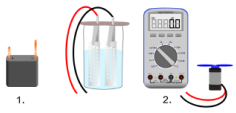
(b) Hinweise zu Anknüpfungspunkten

### 3.2 V: Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle

**nach:** Michael W. Tausch, Claudia Bohrmann und Michael Seesing (2002). „Eine no-cost Brennstoffzelle“. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 51.6, S. 43–44.

**Materialien:**

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Rasierscherfolien / Bleistiftminen
- 100 mL-Becherglas
- Pappe / Styropor
- Batterie
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial




**Chemikalien:**

- Kalilauge, KOH (aq), c = 0,5 mol/L

**Durchführung 1:**

(c) Versuchsdurchführung

## 5 Mikrobielle Brennstoffzellen

### 5.1 Hintergrundwissen zu mikrobiellen Brennstoffzellen

Die *mikrobiellen Brennstoffzellen* (MFC) stellen neben den enzymatischen Brennstoffzellen (EFC) eine Untergruppe der biologischen Brennstoffzellen dar. in MFC werden Mikroorganismen als Biokatalysatoren zur Oxidation organischen Substrats an der Anode eingesetzt (vgl. Abb. 5.1). Die Funktionsweise ist ansonsten identisch zu anderen Brennstoffzelltypen:

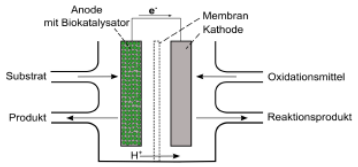



Abbildung 5.1: Prinzipieller Aufbau einer MFC

(d) Eckdaten zum Brennstoffzelltyp

### 5.5 Vergleich zwischen dem Modellversuch zur MFC und der technischen Realität

Der kriteriengeleitete Vergleich bezieht sich auf den 1-Topf-Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle als Modellversuch und einen Übersichtsartikel zu MFC der Technik Santoro.2017, in dem die häufigst genutzten Varianten dargestellt sind.

| Kriterium | Modellversuch zur MFC | Technische MFC |
|---|---|---|
| **Brennstoff** | Glucose, $C_6H_{12}O_6$ (s) | organisches Substrat allg. |
| **Oxidationsmittel** | (Luft-)Sauerstoff, $O_2$ (g) | (Luft-)Sauerstoff, $O_2$ (g) |
| **Ablaufende Reaktion** | $C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Mikroorganismus}} 6\,CO_2 + 6\,H_2O$ | durch Mikroorganismen katalysierte Oxidation allg. |
| **Elektrolyt** | Glucose-Lösung, $C_6H_{12}O_6$ (aq) | nicht definiert |

(e) Abgleich des Modellversuchs

**Versuchsbeschreibung & Gefährdungsbeurteilung** Versuchs-Nr.: 1

Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle

Versuchs-Kategorie: **Elektrochemie**

Schülerversuch für alle Jahrgangsstufen

**Geräte**

- 2 Krokodilklemmen und 2 Kabel
- 2 Rasierscherfolien / Bleistiftminen
- 100 mL-Becherglas und Pappe
- Batterie
- Digitalmultimeter
- kleiner Verbraucher
- Stativmaterial

ggf. unten stehende Erläuterungen zu den Piktogrammen beachten.

**Versuchsdurchführung**

**Durchführung I:**
a) Geben Sie Kalilauge in das Becherglas.
b) Rollen Sie die Rasierscherfolien jeweils auf und fixieren Sie diese mit jeweils einer Krokodilklemme./ Schritt entfällt bei der Verwendung von Bleistiftminen.
c) Stecken Sie die Enden der Krokodilklemmen durch die Löcher in der Pappe und verbinden Sie die Krokodilklemmen jeweils mit einem Kabel.
d) Klammern Sie die Pappe mithilfe des Stativmaterials, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist.
e) Elektrolysieren Sie etwa 60 Sekunden mithilfe der Batterie. Beobachten Sie dabei insbesondere die Rasierscherfolien.

**Durchführung II:**
a) Messen Sie die Zellspannung in mV mithilfe des Digitalmultimeters oder schließen Sie den Propeller an. Beobachten Sie außer dem Verbraucher auch die Rasierscherfolien / Bleistiftminen.

(f) Gefährdungsbeurteilung

Abbildung 6.6: Ausschnitte aus Begleitmaterialien zur Lehrkräftefortbildung.

## 6.3. Entwickelte E-Books

In E-Books können neben Texten und Bildern auch Videos und interaktive Elemente eingebunden werden, sodass ein Arbeiten ohne Medienbruch möglich ist und jeder Lernende zu jedem Zeitpunkt des Lernarrangements Zugriff auf alle Materialien hat. Somit besteht ein didaktischer Mehrwert gegenüber einer Materialsammlung, die verschiedene Einzel-Materialien diverser Formate enthält.
Da der Beginn der Nutzungsberechtigung für die Software PubCoder sich aus organisatorischen Gründen deutlich verzögert hat, aber interaktive E-Books geplant und zum Teil in den Ausschreibungen von Lernsettings angekündigt waren, wurden E-Books übergangsweise mit der einfacher zu beschaffenden Software Book Creator konzipiert. Diese E-Books sind in Tabelle 6.4 mit einem Stern (*) markiert.

| **Lernarrangement** | **Material** | **Umfang** |
|---|---|---|
| *Brennstoffzellen weitergedacht!* | E-Book für Lernende der Sek. II | 31 Seiten |
| | E-Book für Lernende der Junior Uni | 27 Seiten |
| *Alleskönner Brennstoffzellen?!* | * E-Book für Lernende der Sek. II | 55 Seiten |
| | * E-Book für Lernende der Junior Uni | 55 Seiten |
| *Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen* | E-Book für Lernende der Sek. II<br>*Lehrkräfteversion* | 11 Seiten<br>12 Seiten |
| | E-Book für Lernende der Sek. I<br>*Lehrkräfteversion* | 10 Seiten<br>11 Seiten |
| *Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen* | E-Book für Lernende der Sek. I | 14 Seiten |
| *Lehrkräfte-Fortbildung* | E-Book für Lehrkräfte | 28 Seiten |

Tabelle 6.4: Übersicht über die erstellten interaktiven E-Books.

Die E-Books sind im Wesentlichen inhaltsgleich zu den Skripten der jeweiligen Lernarrangements. Unterschiede ergaben sich zum Teil über die im Rahmen der genutzten Software möglichen Interaktivitäten. Wird Lernenden ein in Book Creator angelegtes E-Book im Bearbeitungsmodus zur Verfügung gestellt, können diese eigene Fotos und Videos einbinden. Pdf-Dokumente können in dem E-Book hinterlegt werden. Aufgabenformate können textproduktiv ausgelegt sein, da die Nutzung einer Tastatur in dem E-Book möglich ist. Der notwendige Bearbeitungsmodus bringt jedoch den Effekt mit sich, dass die Lernenden auch Zugriff auf das Gerüst des E-Books haben, theoretisch also alle inhaltsbezogenen Elemente verfremden oder entfernen könnten. Ein *Sperren* der Objekte durch den Urheber des E-Books ist möglich, jedoch im Bearbeitungsmodus revidierbar. Mit Book Creator erstellte E-Books

lassen sich nur auf Apple-Geräten mit voller Interaktivität betrachten. Sie können jedoch im Nachgang des Einsatzes als Film oder pdf-Datei exportiert und Lernenden betriebssystemunabhängig bereitgestellt werden.
Demgegenüber sind in PubCoder entwickelte E-Books im epub-Format betriebssystemunabhängig betracht- und bearbeitbar. Das *Gerüst* des E-Books ist dann unveränderlich. Diese Software ermöglicht jedoch kein Einbinden eigener Fotos und Videos während der Nutzung des E-Books. In das Gerüst des E-Books können aber unterschiedliche interaktive Umgebungen eingebettet werden: Neben dem Einpflegen von Bildergalerien (bzw. Fotodokumentationen), scrollbaren Texten, Bildern und der Gestaltung von Quizzen zur Selbstdiagnostik sind Aufgaben im Drag-and-Drop-Format möglich. Da die Nutzung der Tastatur nicht in das E-Book integriert werden kann, suggeriert diese Software weniger textproduktive Aufgabenformate. Diese können Freihand in der Umgebung des Ausmalsspiels etwa durch Verbinden von Satzteilen bearbeitet werden. Weder in Book Creator noch in PubCoder können Reaktionsgleichungen unmittelbar erstellt werden, diese sind als Bilddatei zu hinterlegen. Die aus beiden Softwares resultierenden E-Books können in das pdf-Format überführt werden. Dabei verlieren sie ihre Interaktivität, sind aber barrierefrei betrachtbar.
Die E-Books sind im Querformat angelegt und verfügen über eine klare Doppelseitenstruktur (vgl. Abb. 6.8). Unabhängig von der zugrundeliegenden Software geben in den oberen Ecken der Doppelseite platzierte Icons Aufschluss über die Intention der Seite oder weisen auf Hilfsangebote hin. Signale dieser Art gelten als lernförderlich.[188] Die konkret genutzten Symbole sind in Abbildung 6.7 dargestellt und ihrer jeweiligen Bedeutung zugeordnet.

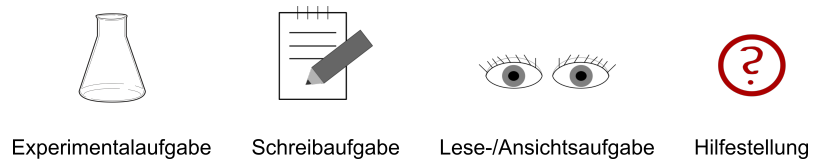
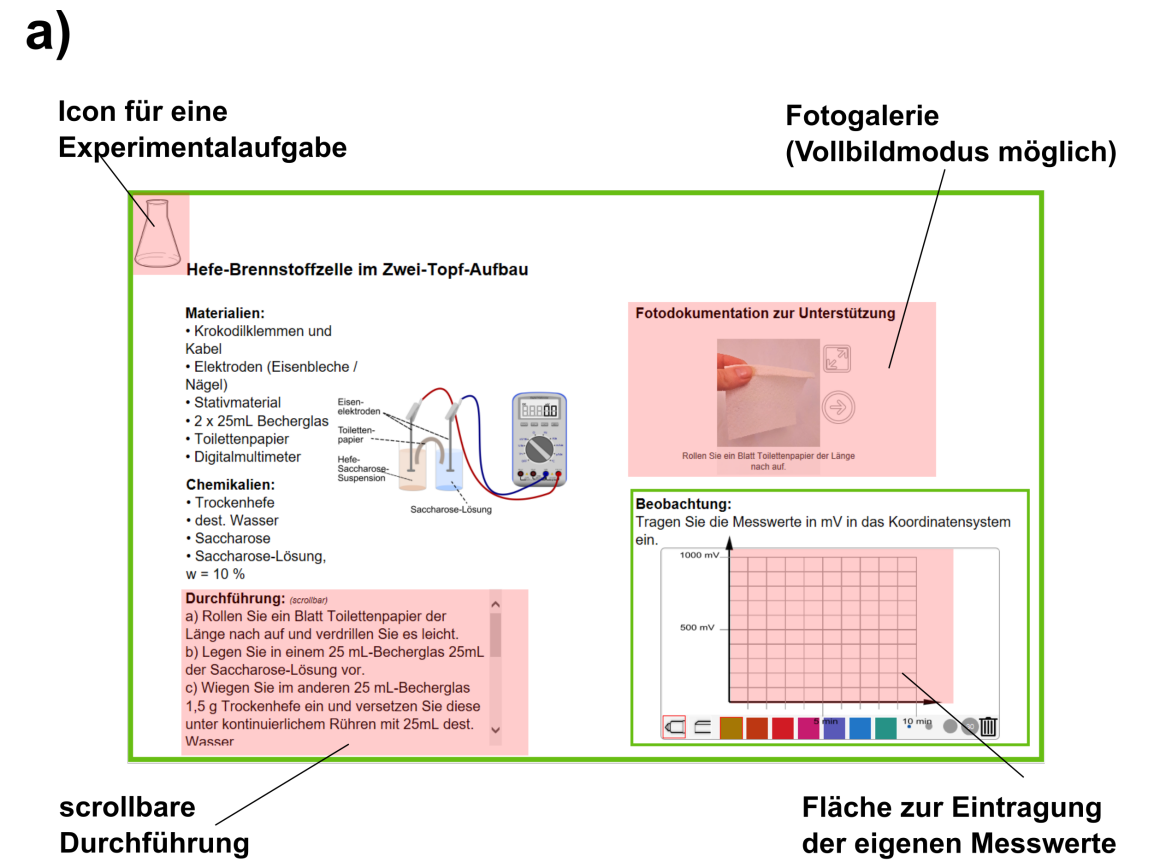



Abbildung 6.7: Zuordnung der in den E-Books eingesetzten Icons.

Integrierte Bilder und Videos sind im Vollbildmodus einsehbar, sie erstrecken sich für den Moment der Betrachtung über die komplette Doppelseite. Man spricht von einem Overlay. Die benötigte Aufmerksamkeit des Lernenden geht mit einem geringeren kognitivem Aufwand einher, als es bei einer unterteilten Ansicht (split) der Fall wäre.[189]



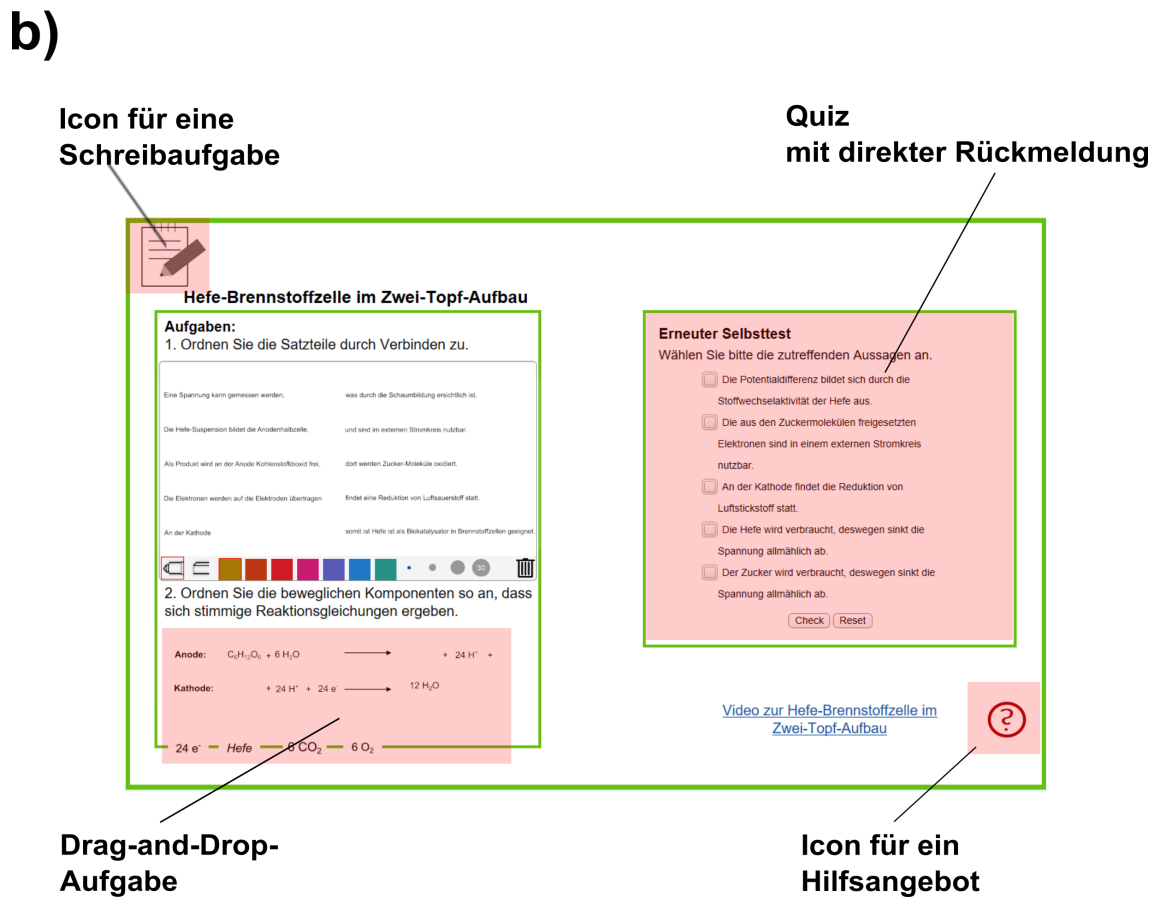




Abbildung 6.8: Einblick in ein PubCoder basiertes E-Book für die Sekundarstufe II.

# 7. Entwickelte Lernarrangements

In diesem Kapitel werden verschiedene Lernarrangements vorgestellt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt worden sind. Vor den eigentlichen Konzepten werden übergeordnete methodisch-didaktische Überlegungen erläutert (Abschnitt 7.1) und das allgemeine Vorgehen der didaktischen Begleitforschung geschildert (Abschnitt 7.2). Nachfolgend werden die Einheiten vorgestellt, beginnend mit *Brennstoffzellen weitergedacht!* mit expliziter MINT-Perspektive (Abschnitt 7.3), bevor die Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!* charakterisiert wird (Abschnitt 7.4). Diese behandelt eine ähnliche Thematik aus einem anderen Blickwinkel. Anschließend werden die Unterrichtssequenzen der *Exkurse zu biologischen Brennstoffzellen* für die Sekundarstufe I und II beleuchtet (Abschnitt 7.5). In Absatz 7.6 wird schließlich eine konzipierte und mehrfach erprobte Lehrkräftefortbildung zum Thema Brennstoffzellen angeführt.

## 7.1. Methodisch-didaktische Anmerkungen

An dieser Stelle werden grundlegende methodisch-didaktische Überlegungen dargelegt, die sich in allen entwickelten Lernarrangements wiederfinden.
Ein motivational wirksamer Einstieg kann darüber erreicht werden, dass Themen aus der Lebenswelt der Lernenden als Anknüpfungspunkt gewählt werden.[102] Die Vermittlung von Fachwissen wird durch eine kontinuierliche Verschränkung von Theorie und Praxis ansprechend, bei der ein Wechselspiel zwischen affektiven und rezeptiven Phasen stattfindet. Die eigene Aktivität der Lernenden sollte in diesem Wechselspiel klar überwiegen.[190]

Da die Behaltensleistung abhängig von den Eingangssignalen ist, werden verschiedene Zugänge - also verschiedene Präsentationsformen der Lerninhalte - gewählt. Je mehr Wahrnehmungskanäle angesprochen werden, desto besser können Informationen

aufgenommen und länger behalten werden.[191] Dem Erarbeiten von Wissensinhalte unter Einbezug von Hören, Sehen, Diskutieren und der **praktischen Umsetzung** („selber Tun“) wird eine (kurzfristige) Behaltensleistung von 90 % zugesprochen, vgl. Abb. 7.1.[190]

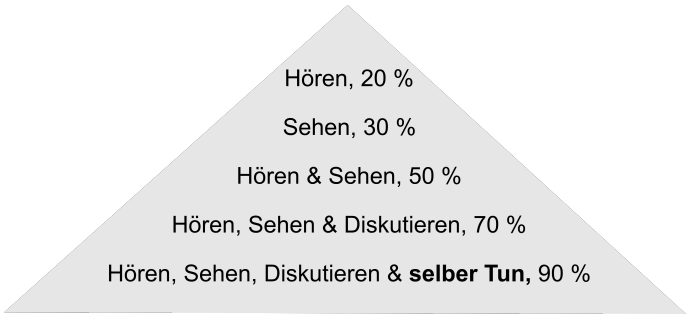



Abbildung 7.1: Behaltensleistung in Abhängigkeit der Aktionsformen. Eigene Darstellung nach Meyerhoff und Brühl [190].

Das Experimentieren als zentrale fachspezifische Arbeitsweise der Naturwissenschaften[9] wird durch diese Überlegungen zusätzlich legitimiert. Die Lernarrangements sind alle Experiment-orientiert angelegt. Dabei werden Realexperimente integriert, da diese lernwirksamer als Computersimulationen sind.[192] Sofern nicht explizit anders benannt, werden die zum Experimentieren benötigten Materialien an einer zentralen Stelle im Kursraum zur Verfügung gestellt. Da offene und halboffene Formate beim Experimentieren aus instruktionspsychologischer Sicht verunsichern,[193] werden konkrete, geschlossene Experimentieranweisungen in den Lernarrangements bereitgestellt. Zudem werden *prompts* (Beobachtungsaufträge) in die Experimentieranweisungen eingebunden, weil diese die Lernförderlichkeit der Lehrmethode des Schülerexperiments erhöhen.[194]
Insgesamt werden die Lernenden die Arrangements möglichst eigenständig durchlaufen, die Lehrperson nimmt eher eine moderierende Rolle ein. Als lernwirksamer Faktor gilt das Micro-Teaching, was zur Unterstützung einzelner Lernender oder Kleingruppen in den Lernarrangements angedacht wird. Als Lehrstrategie werden unter anderem Gruppen-Puzzles verankert.[195] Auch der Wechsel der Sozialformen von Plenum zu Gruppenarbeit und zurück ins Plenum ist ein geeignetes Vorgehen, um die Lernenden auf einen möglichst gleichen Informationsstand zu bringen.[190] Daher wird dieses Vorgehen oft am Beginn der Lernarrangements platziert. Das Erstellen von Zusammenfassungen stellt eine sehr gute Lernstrategie dar,[195] weswegen dies implizit am Ende jeder Einheit und ganz explizit am Ende des gesamten Lernsetting eingebunden wird. Diese finalen Zusammenfassungen werden gruppenweise wechselseitig präsentiert, um anteilig Lernen durch Lehren zu integrieren.[142]

Die Begleitmaterialien - die Skripte oder das E-Book als zeitgemäßere, multimediale und interaktive Variante - werden als Portfolios angelegt, um das selbstständige Arbeiten der Lernenden zu fördern und auch Lernfortschritte zu visualisieren.[142] Kommt das E-Book zum Einsatz, so werden den Lernenden im Sinne von *Get your own device* (GYOD) die entsprechenden digitalen Endgeräte für die Dauer des Lernarrangements zur Verfügung gestellt. In diesen Fällen wird vor dem inhaltlichen Einstieg der Umgang mit diesem digitalen Endgerät und die Bearbeitung des E-Books besprochen.

## 7.2. Anmerkungen zur didaktischen Begleitforschung

Die entwickelten Lernarrangements wurden durch Fragebogenerhebungen begleitet, um sie im Sinne der partizipativen Aktionsforschung iterativ optimieren zu können. Die partizipative Aktionsforschung ist dabei als ein fortwährendes Wechselspiel zwischen Aktion und Forschung zu verstehen, dessen Interesse in der Weiterentwicklung von Unterrichtspraxis und Professionalität liegt. Der Aktionsforschungsprozess ist nach Eilks und Ralle [196] in drei aneinander anschließende Zyklen unterteilt, die aber jeweils mehrfach durchlaufen werden können. Von einer Grundidee in Zyklus 1 zur weitreichenden Implementation der Konzepte in Zyklus 3 nimmt auch die Anzahl der beteiligten Lerngruppen zu. Die Akteure setzen sich dabei aus Praktikern und Forschenden zusammen.[197]

Die Begleitforschung im Rahmen dieser Arbeit ist vor und während des ersten

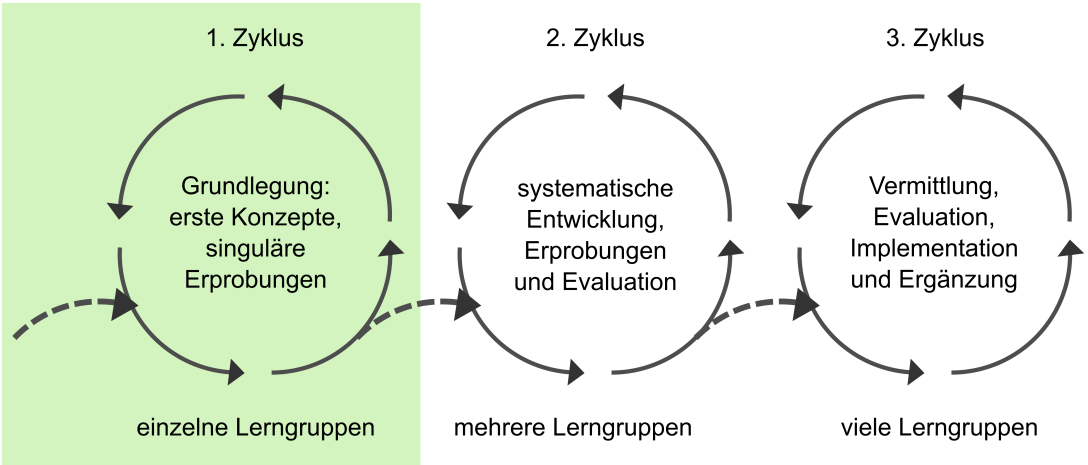



Abbildung 7.2: Zyklen partizipativer Aktionsforschung. Eigene Darstellung adaptiert nach Eilks und Ralle [196]. Eigener Wirkungsbereich grün hinterlegt.

Zyklus anzusiedeln (vgl. Abb. 7.2). Der zubringende Pfeil steht an dieser Stelle für die eingangs in Kapitel 1.1.2 kurz vorgestellte Befragung von Praktikern zu ihren Bedarfen, die die Entwicklung von ersten Konzepten zur Thematik *Brennstoffzellen* für verschiedene Zielgruppen legitimierte. Die Konzepte wurden bislang jeweils mit einzelnen Lerngruppen durchlaufen, in diesem Maßstab mit geringer Stichprobengröße evaluiert und darauf basierend weiterentwickelt.
Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag in der Entwicklung von Experimenten und Lernangeboten, weniger auf der umfassenden Evaluation. Daher war es oberste Maßgabe, den Umfang der Begleitforschung jeweils dem Umfang der Einheit anzupassen, um Überfrachtungen zu vermeiden und den eigentlichen Lernarrangements gebührenden Raum zu geben.

### 7.2.1. Fragebögen für Schülerinnen und Schüler

Zur Beforschung von Lernsettings mit Lernenden wurde eine Fragebogenerhebung mit größtenteils geschlossenen Fragen konzipiert[1] Sofern es dem Umfang des Lernsettings angemessen war, wurde vor dem inhaltlichen Einstieg und nach dem inhaltlichen Abschluss jeweils ein Fragebogen zur Bearbeitung eingereicht. Zu Beginn beider Fragebögen werden soziodemographische Merkmale erhoben, aus denen ein anonymer Code generiert wurde, der eine Zuordnung von Vor- zu Nacherhebungsfragebögen ermöglichte. Dem folgen geschlossene Fragen, in denen anhand einer sechsstufigen Likert-Skala der Grad der Zustimmung zum jeweiligen Item angegeben werden kann.[184] Der Skalenwert 6 entspricht dabei *trifft zu* und der Wert 1 *trifft nicht zu*. Die weiteren Abstufungen sind in Tabelle 7.1 benannt.

| **6** | **5** | **4** | **3** | **2** | **1** |
|---|---|---|---|---|---|
| trifft zu | trifft etwas zu | trifft eher zu | trifft eher nicht zu | trifft wenig zu | trifft nicht zu |

Tabelle 7.1: Den Ziffern der Likert-Skala entsprechende Formulierungen.

Mithilfe der Fragen wird nicht systematisch ein Konzept erfasst, sondern grobe Anhaltspunkte zu relevant erscheinenden Oberthemen[198] - was in dem Stadium singulärer Erprobungen erster Konzepte zulässig ist.

[1] Die Item-Formulierungen sind aufgrund AK-interner Absprachen an den von Zeller [89] eingesetzten angelehnt. Weitere Items sind im Anhang in Abschnitt E aufgeführt.

| **Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne** |
|---|
| Ich finde meine Chemielehrkraft gut. |
| * Ich mag das Fach Chemie. |
| * Ich mag Naturwissenschaften. |
| In der Schule strenge ich mich im Chemieunterricht an. |
| Chemie gehört zu den „schwereren“ Schulfächern. |
| In der Schule behandeln wir zukunftsrelevante Themen. |
| Themen aus dem Chemieunterricht sind für meinen Alltag relevant. |
| Ich informiere mich in meiner Freizeit über naturwissenschaftliche Themen (Zeitschriften, Internet, Fernsehen etc.). |
| Mindestens einer meiner Eltern interessiert sich für Naturwissenschaften. |
| Mindestens einer meiner Eltern hat beruflich mit Naturwissenschaften zu tun. |
| Bei mir zu Hause werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen. |
| In meinem Freundeskreis werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen. |
| * Ich möchte später studieren. |
| * Ich möchte ein naturwissenschaftliches Studium aufnehmen. |
| * Ich möchte später einen naturwissenschaftlich geprägten Beruf ergreifen. |

Tabelle 7.2: Items zur Erfassung von Anhaltspunkten zu persönlichem Interesse, Umfeld und Zukunftsplänen der Lernenden. Mit Stern (*) markierte Items wurden auch in der Nacherhebung erfasst.

Der Fragebogen zur Vorerhebung ist zweiseitig. Die erste Seite wird von Items[2] zu den Oberthemen **Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne** (Tab. 7.2) und ggf. zur **Motivation zur Kursteilnahme** (Tab. E.1) sowie Fragen zur aktuellen Benotung, Schulform und geplantem Studienfach gestaltet. Die zweite Seite beinhaltet die Aufforderung, eine Mindmap zum Begriff *Brennstoffzellen* zu erstellen sowie entsprechenden Platz dafür. Weil deklaratives Wissen aktuellen Modellverstellungen gemäß in semantisches Netzen angelegt und mit dem Wissenerwerb erweitert beziehungsweise umstrukturiert wird,[199] wurde die Anfertigung von Mindmaps zur Überprüfung des Wissenszuwachses gewählt[3]. Einige der Items aus der Vorerhebung werden auch in der Nacherhebung aufgegriffen, um mögliche Trends hinsichtlich der Beliebtheit des Faches Chemie beziehungsweise Naturwissenschaften im Allgemeinen und der Berufsorientierung ausmachen zu können. Die doppelt platzierten Items sind

[2]Die Items wurden nicht einheitlich durchnummeriert, weil je nach Lernsetting nicht alle zum Einsatz kamen.
[3]Unter deklarativem Wissen versteht man faktisch verfügbares Wissen.

in Tabelle 7.2 mit einem Stern (*) markiert.
Sofern es sich um ein außerschulisches Lernarrangement handelte, dessen Teilnahme freiwillig war, wurde zudem die Motivation zur Kursteilnahme hinterfragt.
In der Nacherhebung wurde in wenigen Items eine Selbsteinschätzung der Teilnehmenden zum Wissenszuwachs generell und speziell anhand der Experimente sowie der Spaß am Experimentieren erfragt und Raum für freie Anmerkungen gegeben.

Die Auswertung der anhand der Fragebögen erhobenen Daten erfolgte rein deskriptiv durch schlichtes Summieren der ausgewählten Skalenwerte, wobei die Werte sowohl prozentual als auch absolut angegeben werden. Die Likert-Skala ist ordinalskaliert, ein Intervallskalenniveau kann nicht unterstellt werden.[200] Sofern Items in der Vor- und Nacherhebung erfasst worden sind, wurden die jeweiligen Ausprägungen miteinander verglichen und eventuelle Trends benannt. Da keine theoretischen Konstrukte erfasst worden sind und die Stichprobengröße jeweils gering war, wurde von einer weitergehenden statistischen Aufbereitung abgesehen.

Die Aufbereitung der von Lernenden vor und nach dem Lernsetting angefertigten Mindmaps erfolgte in mehreren Schritten, erst quantitativ und anschließend qualitativ. Der Modellvorstellung zum Erwerb deklarativen Wissens nach kann es bei Wissenserwerb zu verschiedenen Prozessen kommen, die den Aufbau eines semantischen Netzwerkes beeinflussen:[199]

**Organisation:** Hierarchisierung verschiedener Begriffe

**Inferenzen:** Schlussfolgerungen des Lernprozesses bedingen neue Relationen

**Elaborationen:** Hinzufügen neuer Aspekte zu dem semantischen Netzwerk

In der Annahme, dass sich diese (Um-)Organisation der semantischen Netzwerke in den anzufertigen Mindmaps widerspiegelt, wurden die Kennwerte zur Erfassung deren Komplexität formuliert:

$\mathbf{n}_{absolut}$**:** Anzahl aller in der Mindmap vermerkten Begriffe

$\mathbf{n}_{einfach}$**:** Anzahl einfacher Unterpunkte der Mindmap

$\mathbf{n}_{Unterkategorie}$**:** Anzahl an Begriffen in Unterkategorien (mehrere Knoten)

$\mathbf{n}_{ein-Wort}$**:** Anzahl an Ein-Wort-Begriffen

$\mathbf{n}_{ausformuliert}$**:** Anzahl ausformulierter Aspekte

Ein Aspekt galt dann als *ausformuliert*, wenn mehrere zusammenhängende Wörter, Halbsätze oder Sätze formuliert worden sind. Naheliegend wäre auch die Quantifizierung im Zusammenhang mit dem Thema Brennstoffzellen befindlicher Begriffe beziehungsweise themenfremder Begriffe. Es zeigte sich jedoch, dass nicht immer eine objektive Distinktion der genannten Begriffe möglich war. Somit wurden diese möglichen quantitativen Kennwerte verworfen.

In einem weiteren Schritt wurden die auf allen Mindmaps notierten Begriffe gesammelt und durch induktive Kategorienbildung geclustert. Diese Cluster-Bildung erlaubte eine Einordnung, ob und welche veränderten Fachwissensbereiche eher vor beziehungsweise nach dem Lernarrangement präsent waren.

Wurden Schülergruppen von Lehrkräften begleitet, so wurden diese ebenfalls anhand von Fragebögen sowie im Gespräch um ihre Einschätzungen zu den Lernarrangements gebeten, sodass man in diesem Fall von einem unterschwelligen *mixed-methods-Ansatz* sprechen kann.

Die für Lehrkräfte entwickelten Fortbildungen wurden explizit durch didaktische Begleitforschung erfasst, wie nachfolgend vorgestellt wird.

### 7.2.2. Fragebogen für Lehrkräfte

Die Fragebögen wurden für den Einsatz nach dem jeweiligen Lernarrangement vorgesehen. Darin wurden zunächst fünf Fragen zur soziodemographischen Einordnung der Lehrkräfte aufgeführt: Zunächst wurde gefragt, an welcher Schulform (1) welche Fächer durch die Lehrperson unterrichtet werden (2), und, über wie viele Jahre Lehrerfahrung inklusive Referendariat die Lehrkraft verfügt (3). Schließlich wurden das Alter (4) und das Geschlecht (5) erfragt.
Im weiteren Fragebogen wurden einige von Dörschelln [201] im Rahmen ihrer Promotion validierte Items sinngemäß verwendet, wie sie auch bereits von Zeller [89] zur Begleitforschung zu Lehrkräftefortbildungen aufgegriffen worden sind: In einem persönlichen Resultat wurde um die Beurteilung des Gesamtkurses sowie der Themenrelevanz gebeten. Die Items waren dabei ebenso skaliert wie die der Schüler-Fragebögen.
Weiterhin wurde um eine Einschätzung der Experimente und Materialien gebeten, da diese in dem frühen Stadium der Konzeption im Vordergrund iterativer Optimierungsprozesse stehen sollen. Aus ebendiesem Grund wurde neben den geschlossenen

Items jeweils Platz für Anmerkungen gegeben. In den eingesetzten Fragebögen sind

| **Eindruck von den Experimenten** |
|---|
| Die Experimente können selbstständig durchgeführt werden. |
| Die Experimente liefern eine klare Beobachtung. |
| Aus den Experimenten kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden. |
| **Eindruck von den Materialien** |
| Die Materialien sind übersichtlich gestaltet. |
| Die Materialien sind verständlich aufgebaut. |
| Lernende können anhand der Materialien die Durchführung umsetzen. |
| Lernende können die Beobachtungsaufträge der Materialien erfüllen. |
| Lernende können die Auswertungsaufträge der Materialien erfüllen. |

Tabelle 7.3: Items zur Bewertung von Experimenten und Materialien durch Lehrkräfte. Angelehnt an Dörschelln [201] und Zeller [89].

die Items zum Teil auf konkrete Experimente und dazugehörige Materialien bezogen, sodass ihr Wortlaut dementsprechend leicht abweicht.
Die Aufbereitung der generierten Daten erfolgte ebenfalls durch Summieren der ausgewählten Skalenwerte, wobei die Werte sowohl prozentual als auch absolut angegeben werden. Daneben wurden alle Frei-Text-Antworten gesammelt.

Gleich ob Schülerinnen und Schüler oder Lehrkräfte befragt wurden, waren die Stichprobengrößen gering und statistisch nicht repräsentativ. Bei den Lernarrangements für Schülerinnen und Schüler handelt es sich zudem um einmalige Interventionen ohne Follow-up-Befragung, sodass die Langfristigkeit der benannten Trends nicht bewertet werden kann.

Dennoch sind diese Evaluationen im Rahmen dieser Arbeit wichtig, da schüler- und lehrerseitig Hinweise zur Optimierung der Versuche und Lernarrangements angebracht und in den Konzepten iterativ umgesetzt werden können. Im Nachgang dieser Arbeit mit experimentell-konzeptionellem Schwerpunkt können weitere Evaluationen anhand dieser ersten Hinweise konkreter geplant und ausgewertet werden.

## 7.3. *Brennstoffzellen weitergedacht!*

In diesem Abschnitt wird das Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* vorgestellt, in das neben der Domäne Chemie bewusst auch andere MINT-Perspektiven einbezogen und benannt werden, um die reelle Verschränkung naturwissenschaftlicher Teildisziplinen in Forschung und Anwendung zu verdeutlichen.
Das Arrangement besteht aus fünf Einheiten zu je zwei Zeitstunden (vgl. Abb. 7.3). Es wurde zunächst für den Einsatz im Chemieunterricht in der Sekundarstufe II an Gymnasien konzipiert, wie in den nachfolgenden Abschnitten erläutert wird. Dabei kann es als eine inhaltliche Ergänzung zum *Inhaltsfeld 3: Elektrochemie* verstanden werden.
Zur Erprobung in der *Junior Uni Wuppertal* wurden Anpassungen an die veränderte, heterogene Zielgruppe der 14 - 20 -jährigen Lernenden aller Schularten vorgenommen (Kapitel 7.3.9). Dort wurden zunächst einzelne Experimente im Rahmen eines Schnupperkurses (Kap. 7.3.5) und schließlich das gesamte Konzept in den Herbstferien 2019 erprobt (Kapitel 7.3.8). Die aus der Begleitforschung gewonnenen Eindrücke der Erprobung werden in Kapitel 7.3.10 präsentiert, bevor schließlich resultierende Aspekte zur Weiterentwicklung des Lernarrangements angeführt werden (Kapitel 7.3.11).

### 7.3.1. Ziele

Das übergeordnete Ziel des Lernarrangements bestand darin, den Lernenden zu verdeutlichen, dass eine naturwissenschaftliche Fragestellung dem Zusammenspiel verschiedener MINT-Disziplinen bedarf.
Das Augenmerk liegt in der vorliegenden Arbeit auf den fachlichen Lernzielen. Diese werden sofern möglich der jeweiligen Einheit zugeordnet, während die der anderen Kompetenzbereiche zusammenfassend für das Gesamtkonzept angegeben werden. Dabei wird der Ansatz nach Esslinger-Hinz u. a. [202, S. 32] gewählt, bei dem die Kompetenzangaben in die drei Kompetenzstufen *niedrig*, *mittel* und *hoch* untergliedert sind. Zusätzlich erfolgt gemäß der Operatoren die Zuordnung von Anforderungsbereichen (AFB) zu den Lernzielen, wobei I dem niedrigsten, II dem mittleren und III dem höchsten AFB entspricht.

#### 7.3.1.1. Angestrebte fachliche Teilkompetenzen

Aufgrund der Situierung des Lernarrangements an einem außerschulischen Lernort gehen die formulierten fachlichen Teilkompetenzen über die jeweils für die verschiedenen Schulformen zugrundeliegenden Bildungspläne hinaus:

Die Lernenden...

1. **Einheit:** erklären die Bedeutung der Brennstoffzellen im Rahmen der SDG und der Energiewende

1. **Einheit:** beschreiben die Funktionsweise von Brennstoffzellen allgemein * unter Verwendung von Fachbegriffen** (AFB I).

1. **Einheit:** beurteilen die Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen in Abhängigkeit von der Art der Wasserstoffgewinnung* (AFB II-III).

2. **Einheit:** stellen den Einfluss von Elektroden, Elektrolyten und Brennstoffen auf die Zellleistung von Brennstoffzellen dar* (AFB I-II).

3. **Einheit:** vergleichen mikrobielle und enzymatische Brennstoffzellen als Vertreter der biologischen Brennstoffzellen miteinander** (AFB I-III).

4. **Einheit:** erklären den Unterschied zwischen Spannung, Stromstärke und Leistung** (AFB II-III).

4. **Einheit:** nennen Möglichkeiten zur gekoppelten Signalausgabe mithilfe des Mikrocontrollers *Arduino*** (AFB I-II).

- beschreiben die Funktionsweise von Brennstoffzellen versch. Typen (alkalisch, sauer, mikrobiell, enzymatisch)** unter Verwendung von Fachbegriffen*** (AFB I).

- geben die Einsatzgebiete versch. Brennstoffzelltypen (alkalisch, sauer, mikrobiell, enzymatisch) an* (AFB I-II).

- ordnen naturwissenschaftliche Fragestellungen den MINT-Domänen zu* (AFB I-II).

#### 7.3.1.2. Angestrebte methodische Teilkompetenzen

Die Lernenden...

- hören einem Vortrag aufmerksam zu* und erfassen dabei wichtige Informationen**.

- partizipieren an einem Gruppenpuzzle*, wobei sie Informationen aus einem Text entnehmen** und der Lerngruppe verständlich vorstellen***.

- dokumentieren ihre Erkenntnisse im Skript*.
- führen die vorgegebenen Experimentieranleitungen** unter möglicher Zuhilfenahme von Fotodokumentationen* durch (AFB I).
- stellen ihre Erkenntnisse in einem Kurzvortrag dar** (AFB I-II)

#### 7.3.1.3. Angestrebte personale und soziale Teilkompetenzen

Die Lernenden...

- gehen in den Kleingruppen und im Plenum wertschätzend mit den Beiträgen ihrer Lerngruppe um*.
- planen in Kleingruppen ihr experimentelles Vorgehen zur Zelloptimierung der Hefe-Brennstoffzelle** (AFB II-III).

### 7.3.2. Notwendiges Vorwissen

Die interdisziplinäre Ausrichtung des Lernarrangement bedingt, dass neben Vorwissen aus dem Fach Chemie auch Wissen aus den Bereichen der Biologie und Physik zum Verständnis hilfreich ist. Insgesamt baut das Lernarrangement auf Vorwissen aus dem regulären naturwissenschaftlichen Unterricht auf, das größtenteils in der Sekundarstufe I erworben wird:
Aus dem entsprechenden Chemieunterricht kennen die Lernenden das Basiskonzept Energie und somit verschiedene Energieformen, etwa die chemische und elektrische Energie. Sie wissen um deren Wandelbarkeit unter Energieerhaltung.[156] Weiterhin erwerben sie für das Lernarrangement zuträgliches Vorwissen in verschiedenen Inhaltsfeldern:[156]

**Elementfamilien, Atombau und Periodensystem:** Elementarteilchen (Elektronen!), Atomsymbole, Eigenschaften von Wasserstoff

**Ionenbindung und Ionenkristalle:** Ionenbegriff, Leitfähigkeit von Salzlösungen

**Freiwillige und erzwungene Elektronenübertragungen:** Oxidation als Elektronenübertragungsreaktion, Aufstellen von Redox-Reaktionsgleichungen

**Saure und alkalische Lösungen:** Ionen in sauren und alkalischen Lösungen

**Energie aus chemischen Reaktionen:** Galvanische Zellen, Brennstoffzelle

**Organische Chemie:** Funktionelle Gruppen, Alkohole, Makromoleküle und Katalysatoren

Im Laufe der Oberstufe - bevor das Lernarrangement thematisch anzusiedeln ist - werden diese Kenntnisse erweitert: Im **Inhaltsfeld 2: Säuren, Basen und analytische Verfahren** werden frei bewegliche Ionen als Voraussetzung für Leitfähigkeit von Lösungen identifiziert, im Leistungskurs ist auch die unterschiedliche Leitfähigkeit von Säuren, Basen beziehungsweise Salzlösungen bei gleicher Stoffmengenkonzentration obligatorisch aufzugreifen.[92]
Im **Inhaltsfeld 2: Energiestoffwechsel** des Faches Biologie in der Oberstufe stellen Enzyme einen inhaltlichen Schwerpunkt dar, sodass deren katalytische Funktion den Lernenden bekannt ist.[203]
Im Physikunterricht der Sekundarstufe I erfahren die Lernenden in dem **Inhaltsfeld Elektrizität** neben der Begrifflichkeit Strom die Unterschiede zwischen den Messgrößen Spannung, Stromstärke elektrischem Widerstand und den jeweiligen Zusammenhang mit der elektrischen Leitfähigkeit.[204]

Fachunabhängig sollten die Lernenden bereits über laborpraktische Fähigkeiten wie etwa das Abmessen und Abwiegen, sowie die Benennung von und den Umgang mit Laborgeräten verfügen.

### 7.3.3. Medien und Materialien

Zur Begleitung des Lernarrangements wurde ein Skript erstellt. Dieses soll nicht nur im Kurs selbst genutzt werden, sondern auch im Nachgang den Lernenden ein Nachvollziehen der Kursinhalte ermöglichen. Angedacht war, dieses als interaktives E-Book anzulegen, um ein Arbeiten ohne Medienbruch zu ermöglichen. Da jedoch die benötigte Software nicht fristgerecht verfügbar war, wurde das Skript zunächst als Printmedium angelegt. Zu jedem Experiment wurden Fotodokumentationen erstellt, in denen jeweils tabellarisch eine kleinschrittige Fotoabfolge mit Texten zur Durchführung versehen ist[4].

#### 7.3.3.1. Experimente

Das Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* wird inhaltlich von einigen Versuchen getragen, die aufgrund der besseren Übersichtlichkeit nachfolgend tabellarisch aufgeführt, dabei der jeweiligen Einheit und ihrer dortigen Intention zugeordnet sind (siehe Tabelle 7.4).

[4]Die Materialien werden in Auszügen in Kapitel 6 vorgestellt und befinden sich vollständig im digitalen Anhang dieser Arbeit.

| Einheit | Experiment | Intention des Experiments |
|---|---|---|
| 1. Fachliche Grundlagen | Magnesium-Luft-Zelle | Beurteilung, ob es sich um eine BZ handelt |
| 2. Chemie-Perspektive | Leitfähigkeit von dest. Wasser, Salzwasser, verd. Lauge bestimmen | Beurteilung, was als Elektrolyt in BZ geeignet ist |
| | Modellversuch zur Alkalischen BZ mit Bleistiftminen bzw. Rasierscherfolien als Elektroden | Kriterien für geeignete Elektroden in BZ ableiten |
| | Ethanolische BZ | Kriterien für geeignete Brennstoffe ableiten |
| 3. Biologie-Perspektive | Redox-Aktivität von Hefe | Überprüfung der Redox-Wirkung von Hefe |
| | Hefe-BZ im Zweitopf-Aufbau | Katalysatorwirkung von Hefe in BZ verifizieren |
| | Hefe-BZ im Eintopf-Aufbau | Steigerung der Zellleistung (durch geringeren Innenwiderstand) |
| | Enzymatische BZ mit Lactase | Eignung von Enzymen als Biokatalysator untersuchen |
| 4. Physik- und Informatik-Perspektive | Hefe-BZ im Eintopfaufbau | Erprobung weiterer Maßnahmen zur Leistungssteigerung |

Tabelle 7.4: Übersicht über die im Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* platzierten Experimente und ihre Intentionen. *BZ steht für Brennstoffzelle.*

#### 7.3.3.2. Digitale Ergänzungen

In der dritten Einheit (Biologie-Perspektive) werden Laptops mit Videos zu der Durchführung beziehungsweise kurzen Erklärung der Versuche Redox-Aktivität von Hefe (VRedox), Hefe-Brennstoffzelle im Zwei- und Ein-Topfaufbau (VZweiT, VEinT) bereitgestellt. Diese Videos können von den Lernenden fakultativ angeschaut werden. In die letzte Einheit sind obligatorisch die Videos ITV-Priya-dt und ITV-Ana-dt eingebunden, in denen zwei Wissenschaftlerinnen jeweils Einblick in ihren akademischen Werdegang geben. Diese werden ebenfalls auf Laptops zugänglich

gemacht. Alle genannten Videos sind zudem auf der Homepage der Didaktik der Chemie der Bergischen Universität Wuppertal online verfügbar[5].

### 7.3.4. Aufbau und Inhalte des Lernarrangements

Das Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* ist in fünf Einheiten zu je 120 Minuten untergliedert (vgl. Abb. 7.3)[6]. In der **ersten Einheit** werden die Grund-

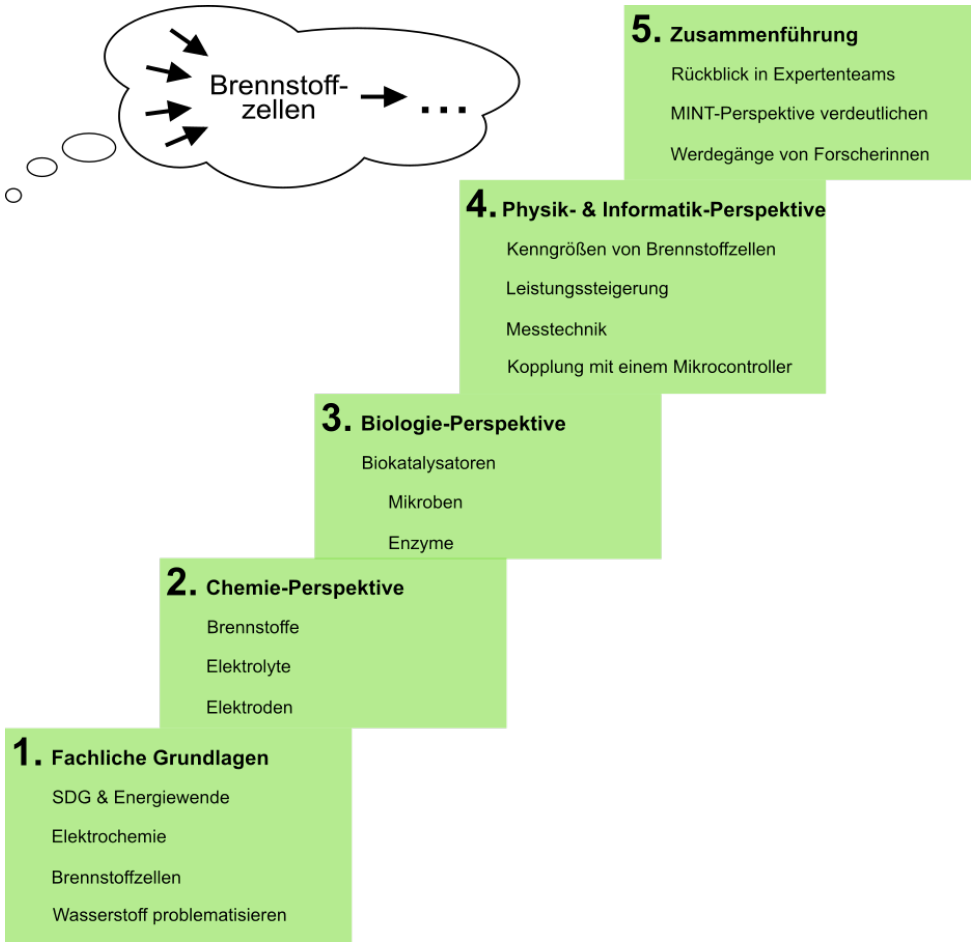



Abbildung 7.3: Aufbau des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

lagen zum Verstehen der Kursinhalte gelegt. Zum Einstieg wird der Erdölverbrauch den Ressourcen gegenübergestellt und somit die Notwendigkeit der Energiewende verdeutlicht.[1] Die Erarbeitungsphase wird durch wechselseitiges Vorstellen zugeteilter Informationstexte zu den SDG beziehungsweise der Energiewende begonnen. Anschließend reaktivieren die Lernenden ihr Vorwissen zu elektrochemischen Grundbegriffen sowie der Funktionsweise von Brennstoffzellen. Danach werden die Lernenden

[5]Diese Videos werden in Kapitel 6.1 näher vorgestellt und befinden sich im digitalen Anhang.
[6]Die Verlaufspläne der Einheiten befinden sich in Abschnitt F.1.1 im Anhang dieser Arbeit.

durch die Aufgabe, die Gewinnung von Wasserstoff zu recherchieren und die ökologische Bilanz zu beurteilen, zum kritischen Hinterfragen angeregt. Diese theoretische Erarbeitungsphase wird durch ein Experiment zur Förderung der Bewertungskompetenz ergänzt: Der Kosmos Experimentierkasten *Öko-Power - von der Batterie zur Brennstoffzelle* wird nach Anleitung genutzt. Die Lernenden haben die Aufgabe zu begründen, ob es sich bei dem Aufbau tatsächlich um eine Brennstoffzelle handelt. Als Elektrolyt wird eine gesättigte Kochsalzlösung werdet. Die Lernenden müssen nun erkennen, dass der Antrieb des Aufbaus aus einer Metall-Luft-Zelle besteht. Dabei verbraucht sich die Magnesium-Anode, es fällt zudem Magnesiumhydroxid als Feststoff aus.

Anode (Oxidation) $2\,Mg\ (s) + 4\,OH^-\ (aq) \longrightarrow 2\,Mg(OH)_2\ (s) + 4\,e^-$

Kathode (Reduktion) $O_2\ (aq) + 2\,H_2O\ (l) + 4\,e^- \longrightarrow 4\,OH^-\ (aq)$

---

$$2\,Mg\ (s) + O_2\ (aq) + 2\,H_2O\ (l) \longrightarrow 2\,Mg(OH)_2\ (s)$$

Sowohl Anode als auch Elektrolyt-Lösung müssten nach einiger Zeit ausgetauscht werden, wodurch es sich sich in diesem Fall nicht um eine Brennstoffzelle, sondern vielmehr eine Batterie handelt. In der Sicherungsphase werden diese Überlegungen zusammengeführt.

In der **zweiten Einheit** nehmen die Lernenden eine explizite Chemie-Perspektive ein. Sie ergründen hier im Experiment und der Theorie den Einfluss der Variation von Brennstoffen, Elektrolyten sowie Elektroden. Die Versuche sind so angeordnet, dass mit einem einfachen Aufbau begonnen wird und die nachfolgenden Aufbauten zunehmend motorisch anspruchsvoll sind. Die erste Fragestellung beinhaltet, welcher *Elektrolyt* in Brennstoffzellen geeignet sein könnte. Dazu vermessen die Lernenden praktisch die Leitfähigkeit[7] verschiedener Flüssigkeiten. Unter Rückbezug auf das Schulwissen identifizieren die Lernenden anschließend frei bewegliche Ionen als Voraussetzung für die Leitfähigkeit in Lösungen, bevor zu erläutern ist, warum die verdünnte Lauge hier den geeignetsten Elektrolyt darstellt. Im Zuge der zweiten Fragestellung führen die Lernenden den Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle vergleichend mit Bleistiftminen und Rasierscherfolien durch. Sie können anhand der Beobachtung darauf schließen, dass Material und auch die Oberflächenbeschaffenheit über die Eignung der *Elektroden* zum Einsatz in Brennstoffzellen entscheidet. Den

[7] Dazu wird der Messwert in Relation zur tatsächlichen elektrischen Leitfähigkeit $\sigma$ gesetzt. Der Messwert entspricht je nach verwendetem Digitalmultimeter dem elektrischen Leitwert G in S also $1/\Omega$ oder dem elektrischen Widerstand R in $S/m$ beziehungsweise $S/\Omega$.

dritten Aspekt der Erarbeitungsphase bildet die Komponente *Brennstoff*. Nach Erarbeitung eines kurzen Informationstextes zu alkoholischen Brennstoffzellen entwickeln die Lernenden die Reaktionsgleichungen zur Ethanol-Brennstoffzelle, analog zur Methanol-Brennstoffzelle. Auf diese Weise beschäftigen die Lernenden sich intensiv mit den ablaufenden Prozessen, was den späteren Aufbau und die Auswertung des Versuchs zur DAFC erleichtert. Durch eine weitere Aufgabe wird ein Vergleich des gasförmigen Brennstoffes Wasserstoff mit den flüssigen Alkoholen angestoßen. Dadurch ist an dieser Stelle eine direkte Vernetzung mit der ersten Einheit gegeben. Die Lernenden betrachten an dieser Stelle Aspekte des Energiegehaltes, der Gewinnung, Lagerfähigkeit, Transportierbarkeit und Sicherheit. Während des Modellversuches zur DAFC können die Lernenden ihr zuvor im Text erfasstes Wissen direkt anwenden. Sie können nachvollziehen, warum bei Einleitung von Luft(-Sauerstoff) die Spannung ansteigt, und, dass die Spannung beim weiteren Einleiten von Luft aufgrund des sich ausbildenden Mischpotentials geringfügiger ansteigt. Am Ende der Einheit werden die veränderten Komponenten in einer Übersichtsgraphik eingetragen.

In der **dritten Einheit** werden Brennstoffzellen aus einer biologischen Perspektive betrachtet. Die Lernenden erschließen die beiden Unterkategorien der biologischen Brennstoffzellen durch den Einsatz von Mikroben und auch Enzymen als Biokatalysatoren experimentell. Die vier Versuche nehmen einen Großteil der Einheit ein (vgl. Tabelle 7.4). Die Lernenden erschließen anhand dreier Versuche die Eignung des Mikroorganismus Bäckerhefe als Biokatalysator. Sie führen zunächst einen Versuch durch, bei dem sie beobachten können, dass eine zunächst blaue Suspension aus Hefe, Zucker, Wasser und Methylenblau nach wenigen Minuten Standzeit eine typische Hefe-Farbe annimmt. Nachdem den Lernenden nun die grundsätzliche Redox-Aktivität von Bäckerhefe bekannt ist, überprüfen sie experimentell, ob sich Hefe auch als Katalysator in Brennstoffzellen eignet. Dazu bauen sie eine Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau auf. Eine Spannung ist messbar, die Hefe-Halbzelle wird als Anodenhalbzelle identifiziert. Dem schließt sich unmittelbar der Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau an. Wieder ist eine Spannung messbar. Diese ist höher als die des Zwei-Topf-Aufbaus. Die Lernenden erkennen den kompakteren Aufbau (und einhergehenden geringeren Innenwiderstand) als entscheidenden Faktor für eine höhere Zellleistung.

Anhand eines phänomenologischen Experiments wird die Eignung von Enzymen als Biokatalysatoren in Brennstoffzellen bestätigt. Somit haben die Lernenden beide Unterkategorien der *biologischen Brennstoffzellen* - die *mikrobiellen* und die *enzymatischen Brennstoffzellen* - experimentbasiert kennengelernt.

In der **vierten Einheit** des Lernarrangements werden mehrere MINT-Domänen

miteinander verbunden. Sie enthält Anteile klassischer Physik, da Kenngrößen erfasst werden; Anteile von Ingenieurswissenschaften, da Zelloptimierungen geplant werden; Anteile von Informatik, weil eine Möglichkeit zur Kopplung der Zellen mit dem Mikrocontroller *Arduino* zur Signalausgabe präsentiert wird. In der Erarbeitungsphase setzen sich die Lernenden mit den Begriffen der elektrischen Leistung und beeinflussenden Größen auseinander. Anschließend planen sie, gemäß des naturwissenschaftlichen Erkenntnisweges, Optimierungsmöglichkeiten für die Hefe-Brennstoffzelle. Die Hefe-Brennstoffzelle wurde als Grund-Experiment ausgesucht, da sie ein sehr geringes Gefährdungspotential aufweist. Ein tabellarischer Leitfaden zur Planung der Variation ist vorgegeben. Die Lernenden führen die geplante Optimierungsmaßnahme durch und überprüfen somit ihre zuvor formulierte Hypothese. Die Lernenden können für ihre Versuche alle bereitstehenden Materialien nutzen. Jeder Schritt dieser Optimierungsversuche wird dokumentiert. Zu vereinbarter Zeit stellen die Gruppen einander ihre noch aufgebauten Versuche vor und erläutern die veränderten Zellkomponenten. An den Aufbau mit der höchsten messbaren Spannung wird der Mikrocontroller *Arduino* angeschlossen. Er ist im Vorfeld von der Dozentin so programmiert worden, dass ab einer Spannung von 200 mV eine LED, ab 300 mV zwei LEDs und ab 400 mV drei LEDs leuchten.
Nach Abbau der Versuchsaufbauten wird die Programmierung des Mikrocontrollers *Arduino* in einer Präsentation vorgestellt. Anschließend werden die in der Einheit veränderten Zellkomponenten und deren Effekte auf die Zellleistung gesammelt.

In der **fünften Einheit** erfolgt eine Zusammenführung der in den Einheiten erlernten Inhalte, sodass die Interdisziplinarität - die MINT-Pespektive - hervorgehoben wird. Die Lernenden reflektieren in Gruppen jeweils eine Lerneinheit und bereiten sie für einen Kurzvortrag auf. Eine der Vorgaben ist es, zu der jeweiligen Einheit eine Mindmap zur Sicherung zu erstellen. Es steht den Lernenden zudem frei, die jeweiligen Versuche der Einheit zu wiederholen und in den Vortrag real einzubinden. Die Gruppen präsentieren einander den Vortrag. Ein Augenmerk liegt dabei auf der am Brennstoffzellsystem betrachteten Komponente. Die erstellte Mindmap heften sie an die Tafel, sodass sich nach und nach eine zunehmend komplexe Mindmap ergibt, deren gemeinsames Zentrum mit *Brennstoffzellen als MINT-Thema* betitelt werden könnte, vgl. Abb. 7.4. Gefilmte Interviews mit zwei MINT-Forscherinnen zu ihrem jeweiligen Werdegang runden das Lernarrangement ab.

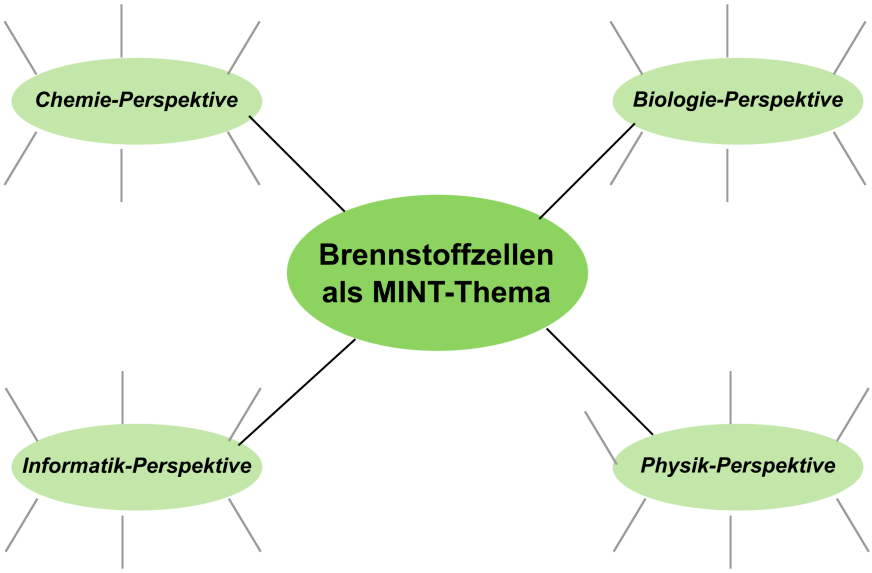



Abbildung 7.4: Aufbau einer Mindmap zu *Brennstoffzellen als MINT-Thema*.

### 7.3.5. Situation der Teilerprobung

Im Rahmen einer Schnupperaktion der Junior Uni Wuppertal für Schulen wurde ein Teil des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!* praktisch umgesetzt. Es waren 15 Lernende umliegender Haupt- und Realschulen im Alter von 13-15 Jahren angekündigt, um am 10.09.2019 innerhalb einer Zeitstunde einen Eindruck von dem außerschulischen Lernort sowie dem Kurs zu erhalten.

#### 7.3.5.1. Vorstellung des Lernortes

Die 2008 eröffnete Junior Uni Wuppertal stellt einen außerschulischen Lernort dar. Sie adressiert Lernende im Alter von 4 bis 20 Jahren, die als für *Studierende* geführt werden. Als privat finanziertes Bildungsnetzwerk besteht das Hauptanliegen darin, unter dem Motto „Kein Talent darf verloren gehen“ Lernende verschiedenster soziokultureller Herkunft und Schulformen aus dem Großraum Wuppertal zu erreichen. Ganzjährig werden von Dozierenden aus Praxis und Wissenschaft aus zahlreichen Domänen Kurse für Gruppen mit maximal 15 Teilnehmenden erarbeitet. Die Kurse werden für die Altersklassen 4-6 Jahre, 7-10 Jahre, 10-14 Jahre und 14-20 Jahre angeboten. Es werden sowohl das Jahr über kontinuierlich als auch blockweise stattfindende Kurse, sowie Ferien-Projektkurse angeboten. Die Studierenden wählen freiwillig ihren Neigungen entsprechend Angebote aus und haben so die Möglichkeit, ihren Interessen spielerisch und ohne Notendruck nachzugehen.[205]

### 7.3.6. Anpassung an die Situation der Teil-Erprobung

Aufgrund des geringen Zeitrahmens und der womöglich sehr heterogenen Lerngruppe wurden losgelöst vom eigentlichen Kurskonzept zwei darin enthaltene Experimente ausgewählt, die den Stundenverlauf gestalten sollten, vgl. Tab. 7.5.

| **Inhalte** | **Materialien / Medien** |
|---|---|
| Begrüßung und Vorstellung | |
| Vorwissen abstecken: Elektron, galvanisches Element, Brennstoffzelle | |
| eventuell: Begriffe erläutern | Whiteboard |
| **Redox-Aktivität von Hefe** | Anweisungen, Experimentiermaterial |
| Bäckerhefe ist redox-aktiv und somit generell als Biokatalysator geeignet | |
| **Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau**<br><br>Eignung von Hefe als Katalysator in Brennstoffzellen<br>Ablaufende Redoxreaktionen besprechen | Anweisungen, Experimentiermaterial<br><br><br>Whiteboard |
| Feedback | Fragebögen |

Tabelle 7.5: Verlaufsplan für die Schnupperaktion zum Kurs *Brennstoffzellen weitergedacht!*. Experimente **fett** hervorgehoben.

Die Experimente sind so aus dem Pool des Kurses gewählt (Tab. 7.4), dass sie ein sehr geringeres Gefährdungspotential aufweisen und motorisch nicht sehr anspruchsvoll sind, trotzdem ein zusammenhängender Erkenntnisgewinn davon ausgeht. Anstelle des eigentliches Skriptes wurden Fotodokumentationen in geeigneter Zahl als Anweisungen herausgegeben. So bestand auch die Freiheit, die inhaltliche Tiefe der Auswertungen vor Ort anzupassen.
Nach Abschluss der Einheit wurde ein verkürzter Fragebogen eingereicht, der neben dem soziodemografischen Hintergrund drei geschlossene Feedback-Fragen sowie ein Feld für freie Anmerkungen zum Kursgeschehen beinhaltete.

### 7.3.7. Evaluation der Teilerprobung

#### 7.3.7.1. Charakterisierung der Stichprobe

An dem Schnupperkurs zum Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* nahmen - wie angekündigt - 15 Lernende im Alter von 13-15 Jahren teil, wobei der

überwiegende Teil von ihnen 13 Jahre alt war. Alle Lernenden besuchten an ihrer jeweiligen Schule die achte Klassenstufe, 60 % an einer Hauptschule und 40 % an einer Realschule. 73 % der Teilnehmenden waren weiblich. Mit Ausnahme einer Enthaltung gaben die Teilnehmenden an, im Fach Chemie Noten im Bereich von *gut* bis *ausreichend* auf dem letzten Zeugnis gehabt zu haben. Ihre Lieblingsfächer an der Schule reichen dabei mit abnehmender Nennungsanzahl von Sport über Englisch und Kunst bis zu Deutsch. Es wurde keine Naturwissenschaft und somit auch nicht das Fach Chemie angeführt.

#### 7.3.7.2. Persönliches Resultat der Teilnehmenden

Obwohl die Lernenden den divergierenden Kursangeboten des Tages willkürlich, somit zumeist ohne ihre Bezugspersonen und gegebenenfalls nicht nach inhaltlicher Präferenz zugeteilt worden sind, wurde ausschließlich positives Feedback gegeben. Den erfragten Items wurde *eher* bis *absolut* zugestimmt. So stimmte über die Hälfte der Teilnehmer der Aussage in vollem Umfang zu, dass der Kurs *sehr gut* gefallen habe. Niemand urteilte gegenteilig. 67 % gaben an, dass die Experimente ihnen Spaß gemacht haben. Zudem stimmte über die Hälfte der Teilnehmer der Aussage absolut zu, viel Neues gelernt zu haben.

#### 7.3.7.3. Anmerkungen zum Kursverlauf und resultierende Impulse

Die Teilnehmenden verfügten über kein Vorwissen im Bereich Elektrochemie. Daher führte die Dozentin zu Beginn des Kurses eine stark vereinfachte metaphorische Definition für Brennstoffzellen ein[8]. Eine tiefergehende inhaltliche Auseinandersetzung konnte aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht intendiert werden. Einige Teilnehmende hatten eigenen Aussagen zufolge noch nie vorher Experimente durchgeführt, sodass das laborpraktische Arbeiten neu für sie war. Sie wussten weder mit Einheiten umzugehen, noch Massen und Volumina entsprechend abzumessen. Auch die Benennung labortypischer (Glas-)Geräte war wenigen bekannt. Daher wurde im konkreten Setting von der Dozentin dazu übergegangen, die Versuche zu demonstrieren, sodass die Lernenden sie nachahmen konnten.
In darauffolgenden Lernsettings an selbigem außerschulischen Lernort wurde daher am jeweiligen Beginn der Erwerb beziehungsweise das Üben der genannten experimentellen Teilkompetenzen explizit eingeplant.

[8] Siehe auch: `https://www.youtube.com/watch?v=AY1ExIgwfcg`

## 7.3.8. Erprobungssituation

### 7.3.8.1. Platzierung und Beschreibung des Lernarrangements

Das gesamte Lernangebot *Brennstoffzellen weitergedacht!* wurde für die Studierenden der Junior Uni Wuppertal im Alter von 14 bis 20 Jahren in den Herbstferien 2019 angeboten. Es fand vom 21.10.2019 bis 25.10.2019 jeweils von 14:30 - 16:30 Uhr statt, sodass wie angedacht eine Untergliederung in fünf Einheiten erfolgen konnte.

### 7.3.8.2. Charakterisierung der erwarteten Zielgruppe

Das Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* richtete sich an Lernende im Alter von 14 bis 20 Jahren aller Schulformen. Da die Lernenden – wie in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 dargelegt - potentiell noch keinen Kontakt zum Themenbereich Elektrochemie / Brennstoffzellen hatten oder das jeweilige Inhaltsfeld durchlaufen haben könnten, war insgesamt ein sehr heterogener Leistungs- und Wissenstand sowie unterschiedlich ausgeprägter laborpraktische Erfahrung zu erwarten. Die resultierenden Anpassungen des ursprünglichen Konzeptes, das auf einen relativ homogenen Oberstufenkurs ausgelegt war, werden nachfolgend aufgeführt.

## 7.3.9. Anpassungen an die Erprobungssituation und bestehende Herausforderungen

Das Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* wurde aufgrund der besonderen Erprobungssituation und erwarteten Zielgruppe umfangreich didaktisch reduziert - sowohl durch Auswahl, Konzentration als auch Vereinfachung.[206]
Um die weiterhin als roter Faden vorhandenen Experimente bewältigen zu können, sind abweichend vom ursprünglichen Konzept aufgrund der in Kapitel 7.3.7.3 aufgeführten Erfahrungen in der ersten Einheit Übungen zum laborpraktischen Arbeiten vorgesehen. Darin lernen (oder wiederholen) die Lernenden das korrekte Abwiegen, Abmessen von Volumina, den Umgang mit Tropfpipetten und Stativmaterial. Darüber hinaus werden im Verlauf der Einheit zu nutzende Laborgeräte und deren Funktion thematisiert. Zur Kompensation dieser Erweiterung wird beispielsweise der Blick nicht auf unterschiedliche Brennstoffe gerichtet. Somit wird Wasserstoff nicht problematisiert und die DAFC inklusive der Betrachtungen zu Vor- und Nachteilen ihrer Brennstoffe exkludiert (***Auswahl***). Auch wurden die Videos zur MFC in der aktuellen Forschung nicht in das Setting eingebettet, weil sie inhaltlich über die Versuche zu BFC im Setting hinausgehen (***Konzentration***). Zur ***Vereinfachung*** wird sofern möglich mit Trivialnamen statt Fachbegriffen gearbeitet, sodass beispielsweise Saccharose als Haushaltszucker bezeichnet wird. Die Auswertungen bleiben zum

Teil auf einem phänomenologischen Niveau, das Aufstellen von Reaktionsgleichungen wird nicht gefordert. Es wird stattdessen mit Wortgleichungen gearbeitet. Weitere Aspekte der umfangreichen didaktischen Reduktionen gehen aus den im Anhang befindlichen Materialien hervor.
Trotz der angedeuteten Reduktionen bleiben Herausforderungen bestehen: Zum selbstständigen Experimentieren ist zunächst das Lese-Verstehen der Anweisungen vonnöten.[187] Auch der Wechsel der Darstellungsform von der schematischen Darstellung in der Skizze zum Realgegenstand im Experiment muss vollzogen werden[9]. Neben dem handwerklich korrekten Abwiegen sind Einheiten zu erkennen und beim Abwiegen korrekt aufzugreifen, wenn beispielsweise die Waage in anderer Einheit misst, als im Skript aufgeführt. Der Versuch zur enzymatischen Brennstoffzelle ist darüber hinaus motorisch anspruchsvoll, weil filigranes Anordnen und der Umgang mit einer Pinzette erforderlich ist. Im Rahmen der Beobachtung ist häufig die Erstellung eines Diagramms vorgesehen, was für einige Lernende herausfordernd sein kann. Der Redox-Indikator und Mikroben werden nur zur phänomenologischen Auswertung herangezogen, eine inhaltliche Klärung erfolgt nicht. Auch die in der vierten Einheit in der Demonstration genutzte Programmiersprache kann den Lernenden bis dato unbekannt sein - sie muss jedoch nicht von den Lernenden selbst angewandt werden.

## 7.3.10. Evaluation der Erprobung

Graphische und tabellarische Aufbereitungen der Begleitforschung zu diesem Lernarrangement befindet sich in Abschnitt F.1.3 im Anhang.

### 7.3.10.1. Charakterisierung der Stichprobe

An dem Arrangement nahmen sechs Lernende teil. Hinsichtlich ihrer Soziodemographie war die Lerngruppe heterogen: Die Alterspanne reichte von 14-19 Jahren. Sie besuchten die achte bis zehnte Klassen an verschiedenen Schulformen. Die Vorbenotung im Fach Chemie lag im Schnitt bei einer geringen Streuung und umfasste die Noten *sehr gut* und *gut*.

### 7.3.10.2. Motivation zur Projektkursteilnahme

Es zeigte sich ein uneinheitliches Bild an Beweggründen zur Teilnahme an *Brennstoffzellen weitergedacht!*. Überwiegend meldeten sich die Teilnehmenden *aus allgemeiner Neugierde* zu dem Projektkurs an und lehnten die Aussage ab, in den Ferien schlicht nichts anderes zu tun zu haben. Teilnehmende Freunde und der Elternwille hatten

[9] Unterstützung bieten die jeweiligen Fotodokumentationen.

nur wenig Einfluss auf die Anmeldung. Bei einer Person schien jedoch der Elternwille ausschlaggebend gewesen zu sein. Zwei der Teilnehmenden stimmten der Aussage zu, nach einer Studienperspektive zu suchen.

#### 7.3.10.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne

Alle Teilnehmenden stimmten sowohl vor als auch nach Durchlaufen des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!* der Aussage eher zu, dass sie das Fach Chemie mögen. Hervorzuheben ist, dass sowohl dem Fach Chemie als auch den Naturwissenschaften allgemein im Nachtest eine etwas höhere Beliebtheit attestiert wurde. Dem Item, sich in der Schule im Chemieunterricht anzustrengen, stimmte die Hälfte der Befragten eher zu und die andere Hälfte eher nicht. Inwiefern eine Korrelation mit dem Item, dass Chemie zu den „schweren“ Schulfächern gehöre, vorliegt, kann aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht ermittelt werden. Die Befragten gaben jedoch alle an, dass Chemie eher nicht (2) beziehungsweise gar nicht (4) in diese Kategorie falle. Es zeigte sich ein sehr diffuser Eindruck davon, ob in der Schule zukunftsrelevante Themen behandelt wurden. Jede Merkmalsausprägung von *trifft zu* bis *trifft gar nicht zu* ist in gleichem Maße angewählt wurden. Dies ist besonders vor dem Hintergrund interessant, dass die Hälfte der Befragten dieselbe Klasse und somit denselben Chemieunterricht besuchte, aber offenbar eine andere subjektive Wahrnehmung der Zukunftsrelevanz hatte. Die Alltagsrelevanz des Chemieunterrichtes dagegen wurde hälftig als eher gegeben beziehungsweise unzutreffend bewertet. Der Großteil der Befragten gab an, sich in der Freizeit *eher nicht* bis *gar nicht* über naturwissenschaftliche Themen zu informieren.
Die Befragten schätzten das naturwissenschaftliche Interesse des Umfelds unterschiedlich ein. Die Hälfte der Eltern sei naturwissenschaftlich sehr interessiert, aber nur ein Drittel habe beruflich mit Naturwissenschaften zu tun. Im Elternhaus werden etwas häufiger keine naturwissenschaftlichen Themen angesprochen, als dass sie angesprochen würden. In den jeweiligen Freundeskreisen waren naturwissenschaftliche Themen *eher selten*.
Vor und nach dem Lernarrangement stimmt die Hälfte zu dem Item absolut zu, später studieren zu wollen. In der Vorerhebung wurde einmal die Ausprägung 4 (*eher zutreffend*) und 2 (*trifft nicht zu*) angegeben, während in der Nacherhebung zweimal die Ausprägung 3 (*trifft eher nicht zu*) gewählt wurde. Nur eine teilnehmende Person wollte sowohl vor als auch nach dem Kurs ein naturwissenschaftliches Studium aufnehmen. Beachtlich ist jedoch, dass vor Kursbeginn die Hälfte ein naturwissenschaftliches Studium ablehnte, während es nach dem Kurs als *eher nicht* klassifiziert wurde. Die Wahrscheinlichkeit ist also mit dem Kurs leicht gestiegen. Ein ähnlicher

Trend zeigt sich bei dem Item, später einen naturwissenschaftlichen Beruf ergreifen zu wollen.
Nach einem geplanten Studiengang gefragt, machten die Lernenden vor und nach dem Lernarrangement die gleichen Angaben. Neben Physik und Informatik als zwei Studiengänge aus dem Bereich der MINT-Disziplinen war auch der Studienwunsch Architektur vertreten.

#### 7.3.10.4. Vorwissen und Wissen unmittelbar nach Kursende im Vergleich

Vor inhaltlichem Beginn des Kurses versah nur eine Teilnehmerin die Mindmap zum Oberthema *Brennstoffzellen* mit Begriffen. Die Teilnehmenden insgesamt verfügten folglich über sehr geringes Vorwissen, sodass die in Kapitel 7.3.9 beschriebenen Anpassungen der Lernarrangements legitimiert wurden.
Eine quantitative Erfassung der Mindmaps aller Teilnehmenden findet sich in Tabelle 7.6. Um jedwede Rückschlüsse auf Personen zu vermeiden, wird in der Tabelle nicht mit den auf den Fragebögen generierten Codes, sondern mit der Kennung S für Studierender und einer Ziffer gearbeitet. Nach dem Lernarrangement fertigten alle Teilnehmenden mit Begriffen versehene Mindmaps an. Das kann als Indiz für den Erwerb deklarativen Wissens und damit verbundenem Aufbau semantischer Netzwerke gewertet werden. Es wurden zwischen vier und 17 Begriffe eingesetzt. Die Hälfte der Befragten arbeiteten mit Unterkategorien, wenngleich meist Ein-Wort-Begriffe verwendet wurden. Gegenüber der Vorerhebung wurden eindeutig komplexere Mindmaps angefertigt, sodass für den Moment ein Wissenszuwachs ersichtlich war. Nach dem Lernarrangement waren in den Mindmaps Begriffe zu finden, die sich den Oberkategorien *Nachhaltigkeit* und *Elektrochemie* zuordnen lassen. Alle erfassten Begriffe wurden sinngemäß zusammengefasst und in die Word-Cloud Mindmaps in Abb. 7.5 eingetragen. Je häufiger ein Begriff genannt wurde, umso größer ist er in der Word-Cloud dargestellt. Demnach waren unmittelbar nach dem Lernarrangement insbesondere die Begriffe *galvanisches Element* und *Energiewandler* den Befragten im Kontext Brennstoffzellen geläufig. Bei den aufgeführten Worten handelt es sich nicht um alltagssprachliche, sondern um Fachbegriffe.

#### 7.3.10.5. Feedback zum Lernarrangement

Das Feedback zu dem Kurs *Brennstoffzellen weitergedacht!* wurde auf zwei Wegen eingeholt: Zum einen erfasste die Nacherhebung einige Aspekte (siehe Tab. F.15) und zum anderen führte die Junior Uni zur Qualitätssicherung eine Fragebogenerhebung durch, deren Ergebnisse zur Verfügung gestellt wurden.

| | | $n_{absolut}$ | $n_{einfach}$ | $n_{Unterkategorie}$ | $n_{ein-Wort}$ | $n_{ausformuliert}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | vor | 3 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| | nach | 17 | 4 | 13 | 3 | 14 |
| S2 | vor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | nach | 8 | 4 | 4 | 8 | 0 |
| S3 | vor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | nach | 4 | 4 | 0 | 1 | 3 |
| S4 | vor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | nach | 10 | 10 | 0 | 10 | 0 |
| S5 | vor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | nach | 10 | 6 | 4 | 10 | 0 |
| S6 | vor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | nach | 7 | 7 | 0 | 7 | 0 |

Tabelle 7.6: Quantitative Erfassung der vor und nach dem Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen.




Abbildung 7.5: Word-Cloud der in den Mindmaps nach dem Lernsetting *Brennstoffzellen weitergedacht!* aufgeführten Begriffe.

Aus den geschlossenen Fragen der Nacherhebung geht hervor, dass die Lernenden selbst überwiegend der Meinung waren, in dem Kurs viel dazugelernt zu haben. 80 % wählten die maximale Merkmalsausprägung an. Auch der Lernertrag aus den Experimenten wurde derart hoch eingeschätzt. Bei dem Item, ob die Experimente

Spaß gemacht haben, wurden zu gleichen Teilen die beiden höchsten Merkmalsausprägungen ausgewählt. Der überwiegende Anteil der Befragten gab an, nach dem Kurs erneut in das Skript zu schauen.
Das Interesse an MINT war sehr unterschiedlich ausgeprägt, doch immerhin zwei Drittel gab an, eher interessiert zu sein. Drei Lernende nutzen die Möglichkeit, freie Anmerkungen zu äußern: Sie waren positiv auf Kursinhalte und die Kursatmosphäre bezogen.

„*Die Studierenden nahmen Sie als kompetent und engagiert wahr. Ebenfalls positiv wurden die Fehler- und Fragenkultur und die Beziehungen eingeschätzt [...] Insgesamt wurde Ihr Kurs sehr positiv bewertet.*“

Lautet ein Auszug aus dem Fazit der Fragebogenerhebung zur Qualitätssicherung seitens der Junior Uni[10], die im Rahmen einer bildungswissenschaftlichen Dissertation entwickelt und validiert wurde.[207] In den Fragebögen werden verschiedene Qualitätsmerkmale anhand von vier bis fünf Items erhoben, zum Beispiel die durch die Lernenden wahrgenommene Kompetenz, das Engagement des Dozierenden, die Fehler- und Fragekultur sowie die Aktivierung von Studierenden.
In den einzelnen Items der Qualitätsmerkmale des Kurses werden überwiegend hohe und somit gute Werte erreicht. Obwohl das Interesse an Kursinhalten sowie die wahrgenommene persönliche Relevanz eher verhalten war, wurde die Kompetenz und das Engagement der Dozentin positiv wahrgenommen. So wurden beispielsweise die Ratschläge oder Hilfestellungen und auch die Bemühungen der Dozentin, Inhalte mit Spaß zu vermitteln, wertschätzend anerkannt.

### 7.3.11. Fazit und Impulse aus der Evaluation

Der gelungene Ablauf wurde grundsätzlich als Indikator für ein angemessenes Kurskonzept gewertet. Einzig die Reflexion der Einheiten durch die Lernenden in Kleingruppen und die gegenseitige Präsentation schien problematisch, weswegen hier zukünftig ein geschlosseneres (Aufgaben-)Format angelegt wird.
Das Feedback der Teilnehmenden legt nahe, dass die Experimente gut ausgewählt und durch unterstützende Materialien begleitet wurden, anders wäre der empfundene Lernzuwachs und Spaß beim Experimentieren nicht zu erreichen gewesen. Das Skript scheint grundsätzlich als roter Faden akzeptiert und als über den Kurs hinaus sinnvoll erachtet zu werden, da alle Befragten rückmeldeten, nach Ablauf des Kurses noch einmal hineinzuschauen.

[10] Das vollständige Feedback der Junior Uni befindet sich im Anhang dieser Arbeit.

Um ein Lernen ohne Medienbruch zu ermöglichen, wurde jeweils ein interaktives E-Book für Lernende auf Niveau der Sekundarstufe I und II entwickelt, sobald die Software zugänglich war. Beide Lernbegleiter befinden sich im digitalen Anhang dieser Arbeit und stehen zur zukünftigen Erprobung bereit.

## 7.4. *Alleskönner Brennstoffzellen?!*

Im folgenden Abschnitt wird das Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* vorgestellt. Darin werden ähnliche Fachinhalte wie in *Brennstoffzellen weitergedacht!* erarbeitet, aber der Fokus liegt nicht auf verschiedenen Perspektiven, sondern den diversen Anwendungsbereichen von Brennstoffzellen.
Das Arrangement sollte zunächst ebenso wie das MINT-Pendant *Brennstoffzellen weitergedacht!* ein Format von fünf Einheiten zu je zwei Stunden umfassen. Da jedoch die Möglichkeit bestand, eine Erprobung im Wintersemester der Junior Uni Wuppertal durchzuführen, wurde im dort gängigen Format von sechs Einheiten zu je anderthalb Stunden konzipiert.
Dennoch wird zunächst ein für den Einsatz in der Sekundarstufe II an Gymnasien adressiertes Lernarrangement hinsichtlich der Ziele, des notwendigen Vorwissens, des Aufbaus und der Inhalte sowie der Medien und Materialien vorgestellt. Anschließend wird die Erprobungssituation an der Junior Uni charakterisiert, die Unterschiede des Konzepts und die Ergebnisse der Begleitforschung dargelegt. Der Abschnitt schließt mit Eindrücken aus der Erprobung sowie daraus und aus der Begleitforschung resultierenden Aspekten zur Verbesserung des Lernarrangements ab.

### 7.4.1. Ziele

Das übergeordnete Ziel des Lernarrangements bestand darin, den Lernenden zu verdeutlichen, dass verschiedene Brennstoffzellsysteme koexistieren und in ganz verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommen.
Da das Augenmerk aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit auf den fachlichen Lernzielen liegt, werden diese nachfolgend sofern möglich der jeweiligen Einheit zugeordnet angegeben. Die Ziele der anderen Kompetenzbereiche sind analog zu den in Abschnitt 7.3.1 aufgeführten.

#### 7.4.1.1. Angestrebte fachliche Teilkompetenzen

Aufgrund der Situierung des Lernarrangements an einem außerschulischen Lernort gehen die formulierten fachlichen Teilkompetenzen über die jeweils für die verschiedenen Schulformen zugrundeliegenden Bildungspläne hinaus. Die Einheit ist dem Lernziel vorangestellt:

Die Lernenden...

1. **Einheit:** erklären die Bedeutung der Brennstoffzellen im Rahmen der SDG und Energiewende

1. **Einheit:** beschreiben die Funktionsweise von Brennstoffzellen allgemein* unter Verwendung von Fachbegriffen** (AFB I).

2. **Einheit:** beschreiben die Funktion von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen in Worten* und unter Angabe von Reaktionsgleichungen*** (AFB I)

2. **Einheit:** beurteilen die ökologische Bilanz von Wasserstoff in Abhängigkeit von der Art der Gewinnung** (AFB II-III).

3. **Einheit:** nennen den Vorteil, den die Einbindung von mikrobiellen Brennstoffzellen in klassischen Klärwerken aufweist* (AFB I).

3. **Einheit:** übertragen die Kenntnisse zu mikrobiellen Brennstoffzellen in Klärwerken auf die Funktion der Hefe-Brennstoffzelle (AFB II-III).

4. **Einheit:** erklären den Unterschied zwischen Spannung, Stromstärke und Leistung** (AFB II-III).

5. **Einheit:** stellen die divergierenden Einsatzbereiche von Brennstoffzellen innerhalb der Medizintechnik dar** (AFB I-II).

6. **Einheit:** geben die Einsatzgebiete verschiedenen Brennstoffzelltypen (alkalisch, sauer, mikrobiell, enzymatisch) an* (AFB I-II).

### 7.4.2. Notwendiges Vorwissen

Zum Verständnis des Kurses benötigen die Lernenden ein Vorwissen, wie es in Abschnitt 7.3.2 für das MINT-Pendant ausführlich dargelegt ist.

### 7.4.3. Medien und Materialien

Zur Begleitung des Lernarrangements und zum späteren Nachlesen wurde zunächst ein Skript als Printmedium erstellt. Zusätzlich wurden die flankierenden Fotodokumentationen zu jedem Experiment bereitgestellt.
Da vor Kursbeginn ein Programm zur Erstellung von i-Books zugänglich war, wurden die Materialien komplett übertragen, um ein Arbeiten ohne Medienbruch zu ermöglichen[11]. So wurden auch Videos oder entsprechende Links eingebettet, die andernfalls separat auf Laptops zur Verfügung gestellt würden. Den Einstieg in die dritte Einheit zum Thema *Brennstoffzellen in der Abwasserreinigung* bildet ein Video zur Einführung in das Thema mikrobiellen Brennstoffzellen (MBZ-tonlos). In diese

[11] Die Materialien werden auszugsweise in Kapitel 6 vorgestellt und befinden sich vollständig im digitalen Anhang dieser Arbeit.

Einheit sind fakultativ die Links zu Videos zur Redox-Aktivität von Hefe (VRedox) sowie der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau (VZweiT) hinterlegt. In der vierten Einheit besteht entsprechend die Möglichkeit, ein Video zur Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau (VEinT) anzuschauen.[183]
Das i-Book-Format bedingte, dass im Sinne von *Get your own device* (GYOD) den Lernenden zu jeder Einheit i-Pads zur Verfügung gestellt worden sind. Nach Abschluss des Lernarrangements wurden die i-Books (unter Verlust der Interaktivität) in das pdf-Format exportiert und so den Lernenden zur dauerhaften Nutzung zur Verfügung gestellt.

#### 7.4.3.1. Experimente

Das Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* wird ebenfalls inhaltlich von einigen Versuchen getragen. Diese sind aufgrund der besseren Übersichtlichkeit nachfolgend tabellarisch aufgeführt und dabei der jeweiligen Einheit und ihrer dortigen Intention zugeordnet (siehe Tabelle 7.7).

| **Einheit** | **Experiment** | **Intention des Experiments** |
|---|---|---|
| 1. Auftakt | Magnesium-Luft-Zelle | Beurteilung, ob es sich um eine BZ handelt |
| 2. Mobilität | PEM-BZ-Modellauto | Bezug zwischen „Wasserstoff-Bussen“ und Modellversuch schaffen |
| | Modellversuch zur alkalischen BZ | Zwei-Schritt aus Elektrolyse und Betrieb der Brennstoffzelle verdeutlichen |
| 3. Abwasserreinigung I | Redox-Aktivität von Hefe | Untersuchung der Redox-Aktivität von Hefe |
| | Hefe-BZ im Zwei-Topf-Aufbau | Überprüfung, ob Hefe als Katalysator in BZ geeignet ist |
| 4. Abwasserreinigung II | Hefe-BZ im Ein-Topf-Aufbau | Steigerung der Zellleistung durch geringeren Innenwiderstand |
| 5. Medizintechnik | Enzymatische BZ mit Lactase | Eignung von Enzymen als Biokatalysator prüfen |

Tabelle 7.7: Übersicht über die im Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* platzierten Experimente und ihre Intentionen. *BZ steht für Brennstoffzelle.*

### 7.4.4. Aufbau und Inhalte

Das Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* ist aus organisatorischen Gründen in sechs Einheiten zu je 90 Minuten untergliedert (vgl. Abb. 7.6). Somit umfasst das Konzept 60 Minuten weniger als das MINT-Pendant *Brennstoffzellen weitergedacht!* (siehe Kapitel 7.3)[12].

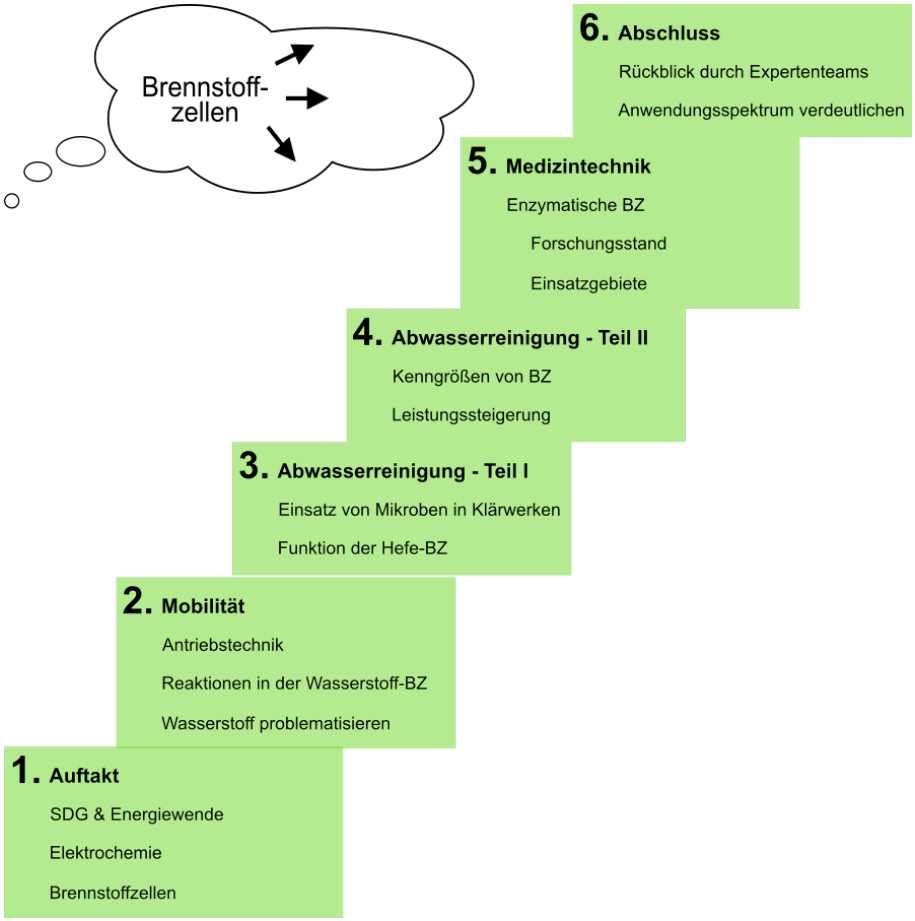



Abbildung 7.6: Aufbau des Lernarrangements *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

Auch in diesem Lernarrangement wird die **erste Einheit** zur Legitimation des Themas Brennstoffzellen anhand der SDG und der angestrebten Energiewende sowie zur Besprechung elektrochemischer Grundlagen genutzt. Sie verläuft größtenteils analog zu der in Kapitel 7.3.4 dargelegten ersten Einheit des Arrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!*. Ein wesentlicher Unterschied besteht darin, dass aus zeitlichen Gründen und Gründen inhaltlicher Passung die Problematisierung von Wasserstoff an dieser Stelle nicht vorgesehen ist.
In der **zweiten Einheit** wird die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle thematisiert,

[12]Die Verlaufspläne des Lernarrangements befinden sich im Anhang in Abschnitt F.2.1.

die in den Medien oft im Zusammenhang mit Mobilität präsent ist. Zum Einstieg wird der Zeitungsartikel „WSW: Die Wasserstoffbusse kommen“[208] genutzt. In der Erarbeitungsphase wird die Funktionsweise von Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen ergründet. Dazu wird zunächst das Brennstoffzellen-Modell-Auto *Horizon FCJJ-11 Hydrocar* in Betrieb genommen, um vom Realobjekt „Wasserstoff-Bus“ gedanklich in eine deutlich geringere Größenordnung zu gelangen. Die Lernenden vollziehen in diesem Versuch einen Zwei-Schritt: Zunächst werden Wasserstoff und Sauerstoff aus Wasser elektrolytisch gewonnen, bevor mit Wasserstoff als Brennstoff die Brennstoffzelle betrieben und das Auto angetrieben werden kann. Dieser Zwei-Schritt findet sich auch im anschließend durchgeführten Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle wieder. Dass Wasserstoff in beiden Schülerversuchen zunächst elektrolytisch gewonnen werden musste, lässt die Frage zu, wie Wasserstoff großtechnisch gewonnen wird. Dies erarbeiten die Lernenden in einer Internetrecherche. Sie skizzieren, unter welchen Bedingungen Wasserstoff ökologisch sinnvoll gewonnen werden kann. Die Recherche kann um den Aspekt *power to gas* erweitert werden, wenn das Zeitmanagement es zulässt.

In der **dritten Einheit** wird der Einsatz von Brennstoffzellen in der Abwasserreinigung thematisiert. Das Video MBZ-tonlos dient als Einstieg zu der Frage, was Mikroorganismen mit Brennstoffzellen zu tun haben. Anhand von Beobachtungsaufträgen wird die Aufmerksamkeit der Lernenden u.a. darauf gelenkt, welchen Vorteil der Einsatz mikrobieller Brennstoffzellen in Klärwerken gegenüber herkömmlichen Klärwerken bietet. Anschließend gehen die Lernenden der Frage nach, ob sich auch Bäckerhefe als Mikroorganismus aus dem Alltag sich als Biokatalysator generell beziehungsweise zum Einsatz in Brennstoffzellen eignet. Das Vorgehen ist analog zu der dritten Einheit des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!* angelegt (sieh Kap. 7.3.4).

Die **vierte Einheit** bewegt sich ebenfalls im Bereich *Brennstoffzellen in der Abwasserreinigung*. Nachdem der Begriff der elektrischen Leistung thematisiert wurde, wird die Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau realisiert. Anschließend wird die höhere Zellspannung und Zellleistung begründet. Im Rahmen einer Zwischenbilanz erstellen die Lernenden nun Concept-Maps mit mindestens den vorgegebenen Begriffen zu mikrobiellen Brennstoffzellen, um ihr Wissen zu strukturieren. Die Sicherung erfolgt über wechselseitiges Vorstellen der erarbeiteten Concept-Maps.

In der **fünften Einheit** wird der Blick auf das Anwendungsspektrum von Brennstoffzellen um die Medizintechnik ergänzt. Nach Einführung in das Feld der Medizintechnik werden arbeitsteilig Informationstexte zu Brennstoffzellen für den Einsatz im Körper beziehungsweise Brennstoffzellen zur Messung von Vitalwerten erarbeitet.

Nach einem kriteriengeleiteten Austausch wird ein Modellversuch zur enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase durchgeführt. Die Lernenden erfahren, dass dieser analog zu Aufbauten ist, mit denen man den Blutzucker-Gehalt messen kann. Sie arbeiten in derselben Größenordnung, benötigen also entsprechende Feinmotorik, um die Brennstoffzellen zu fertigen und zu betreiben. Abschließend werden die Erkenntnisse der Einheit gesammelt, um zu verdeutlichen, wie facettenreich die Anwendungsmöglichkeiten von Brennstoffzellen innerhalb der Medizintechnik sind.
In der **sechsten Einheit** werden die in den vergangenen Einheiten erarbeiten Inhalte in Gruppen wiederholt und zusammengeführt. In Konsequenz der Erkenntnisse aus der Erprobung von *Brennstoffzellen weitergedacht!* ist ein geschlossener Aufgabenpool angelegt, um der Reflexion mehr Struktur zu geben. Es ist jeweils vorgesehen, zunächst als Warm-Up einen Lückentext zum jeweiligen Thema auszufüllen, bevor das Experiment der zugewiesenen Einheit wiederholt wird, und eine kurze Auswertung dazu anzufertigen ist. Schließlich fertigen die Lernenden eine Mindmap oder Concept-Map mit mindestens den vorgegebenen Begriffen an. In einer abschließenden Präsentation stellen die Lernenden einander wechselseitig die jeweilige Erarbeitung vor. Die jeweils zur Sicherung Mindmaps beziehungsweise Concept-Maps können zusammengeführt werden, sodass sie zusammen eine komplexe Übersicht mit mehreren Ebenen bilden. Ihr gemeinsames Zentrum kann als *Anwendungsspektrum von Brennstoffzellen* bezeichnet werden (vgl. Abb. 7.7). Mit dieser Übersicht wird das enorme Anwendungsspektrum von Brennstoffzellen aufgefächert.




Abbildung 7.7: Aufbau einer Mindmap zum *Anwendungsspektrum von Brennstoffzellen.*

## 7.4.5. Erprobungssituation

### 7.4.5.1. Platzierung und Beschreibung des Lernarrangements

Das gesamte Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* wurde für die Studierenden der Junior Uni Wuppertal[13] im Alter von 14 bis 20 Jahren im Wintersemester 2019 angeboten. Es fand vom 13.11.2019 bis 18.12.2019 jeweils mittwochs von 16:30 - 18:00 Uhr statt.

### 7.4.5.2. Charakterisierung der erwarteten Zielgruppe

Es galten für diese Zielgruppe dieselben Überlegungen, die in Kapitel 7.3.8.2 bereits dargelegt wurden.

## 7.4.6. Anpassung an die Erprobungssituation und bestehende Herausforderungen

Zur Erprobung wurde das Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen* durch umfangreiche didaktische Reduktionen an die erwartete Zielgruppe angepasst, ähnlich wie *Brennstoffzellen weitergedacht!* (siehe Kapitel 7.3.9). So wurden den inhaltlich relevanten Experimenten ebenfalls Übungen zum laborpraktischen Arbeiten vorangestellt. Zur Kompensation dieser Erweiterung wurde in diesem Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* der Versuch zur Magnesium-Luft-Zelle nicht fest integriert (***Auswahl***).

## 7.4.7. Evaluation der Erprobung

Graphische und tabellarische Aufbereitungen der Begleitforschung zu diesem Lernarrangement befinden sich im Anhang F.2.2.

### 7.4.7.1. Charakterisierung der Stichprobe

Zum ersten Termin des Lernarrangements *Alleskönner Brennstoffzelle?!* erschienen acht von elf erwarteten Teilnehmenden[14]. Die Alterspanne reichte von 13 bis 17 Jahren, es war somit ein unerwartet junger Teilnehmer anwesend. Sie besuchten die achte bis zwölfte Klassenstufe an verschiedensten Schulformen. Im Laufe des Kurses nahmen verschiedene Lernende teil, nicht alle Lernenden erschienen zu jedem Termin. Anhand der zugewiesenen Codes lies sich feststellen, dass fünf Personen sowohl an der Vor-

[13] Zur Junior Uni Wuppertal siehe Kapitel 7.3.5.1.

[14] Aufgrund von plötzlichen Einschränkungen im Schwebebahnverkehr fehlten drei Teilnehmende entschuldigt.

als auch Nacherhebung teilgenommen haben. Sofern vergleichende Items an beiden Zeitpunkten erhoben wurden, werden im Folgenden nur ihre Angaben berücksichtigt. Die Vorbenotung im Fach Chemie der bei der ersten Einheit Anwesenden war recht einheitlich im *sehr guten* und *guten* Bereich.

#### 7.4.7.2. Motivation zur Projektkursteilnahme

Am Lernsetting *Alleskönner Brennstoffzellen?!* nahmen die Teilnehmenden der ersten Einheit überwiegend *aus allgemeiner Neugierde* teil und lehnten die Aussage ab, schlicht nichts anderes zu tun zu haben. Fast 40 % der Befragten hatten zuvor bereits andere Kurse an der Junior Uni besucht. Teilnehmende Freunde oder der Elternwille hatten eher wenig Einfluss auf die Anmeldung. Die Teilnehmenden stimmten überwiegend der Aussage zu, nach einer Studienperspektive zu suchen, was ein großer Unterschied zu den Teilnehmenden des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!* darstellte.

#### 7.4.7.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne

Die Hälfte der Anwesenden bei der ersten Einheit gab an, die jeweilige Chemielehrkraft gut zu finden, die andere Hälfte zeichnete ein durchwachsenes Bild hinsichtlich der Sympathie. Überwiegend gaben sie an, sich im Chemieunterricht anzustrengen, wobei Chemie für die meisten der Befragten *eher nicht* zu den schweren Schulfächern gehörte. Die Zukunftsrelevanz der im Chemieunterricht behandelten Themen wurde sehr durchwachsen, insgesamt aber höher als die Alltagsrelevanz, beurteilt. Allerdings gab eine deutliche Mehrheit an, sich in der Freizeit über naturwissenschaftliche Themen zu informieren. Bei denen, die bei Vor- und Nacherhebung anwesend waren, nahm sowohl die Beliebtheit des Faches Chemie als auch der Naturwissenschaften allgemein leicht ab.

#### 7.4.7.4. Vorwissen und Wissen unmittelbar nach Kursende im Vergleich

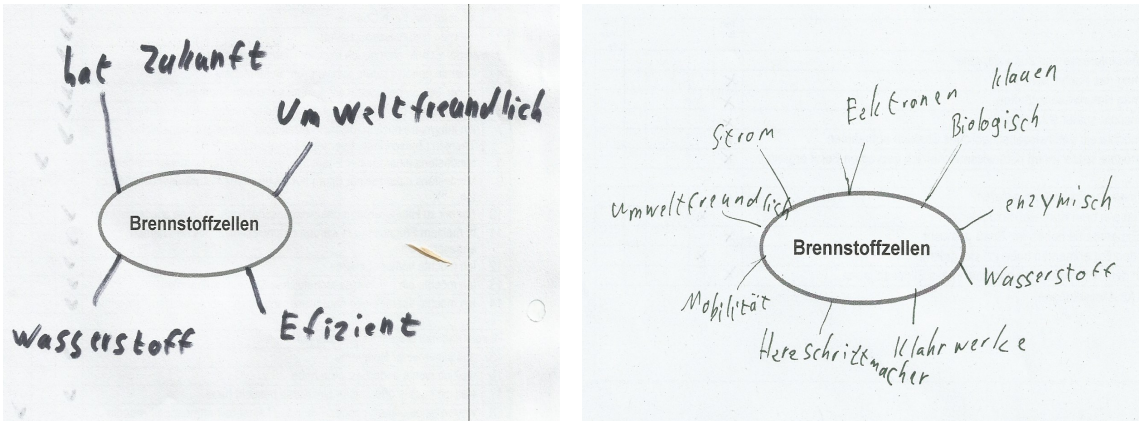
Vor inhaltlichem Beginn des Kurses versahen die bei der Vor- und Nacherhebung anwesenden Teilnehmenden die Mindmap zum Oberthema *Brennstoffzellen* (n = 5) jeweils mit bis zu vier Begriffen. Einer der Teilnehmenden erstellte eine Unterkategorie und formulierte Begriffe weiter aus, sodass er bereits eine deutlich komplexere Mindmap als die übrigen Lernenden anfertigte. Die quantitative Erfassung der Mindmaps der Teilnehmenden findet sich in Tabelle 7.8 [15] Alle Befragten fügten nach dem Abschluss der Einheit mehr Begriffe in die Mindmap ein, zwei von ihnen

[15] Um jedwede Rückschlüsse auf Personen zu vermeiden, wird erneut in der Tabelle nicht mit den auf den Fragebögen generierten Codes, sondern mit anderer Kennung gearbeitet.

| | | $n_{absolut}$ | $n_{einfach}$ | $n_{Unterkategorie}$ | $n_{ein-Wort}$ | $n_{ausformuliert}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| S1 | vor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | nach | 12 | 12 | 0 | 12 | 0 |
| S2 | vor | 4 | 4 | 0 | 4 | 0 |
| | nach | 9 | 9 | 0 | 9 | 0 |
| S3 | vor | 4 | 4 | 0 | 1 | 3 |
| | nach | 7 | 3 | 4 | 7 | 0 |
| S4 | vor | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| | nach | 3 | 3 | 0 | 3 | 0 |
| S5 | vor | 3 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| | nach | 7 | 4 | 3 | 7 | 0 |

Tabelle 7.8: Quantitative Erfassung der vor und nach dem Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen.

bildeten Unterkategorien. Dies kann als niederschwelliges Indiz für Elaboration und Hierarchisierung deklarativen Wissens bei den Lernenden gewertet werden.
Bei qualitativer Betrachtung wird bestätigt, dass die Befragten vor Kursbeginn ein geringes Vorwissen zum Thema Brennstoffzellen aufwiesen. Die angeführten Begriffe entsprechen eher globalem, als fachspezifischem Wissen. Die Eindrücke aus den quantitativen und qualitativen Betrachtungen des Vorwissens stützen die in Kapitel 7.4.6 angeführten Anpassungen des Konzepts. In den Mindmaps eines Lernenden deutet sich an, dass dieses globale Wissen durch Inhalte des Kurses erweitert wurde, sodass Brennstoffzellen nun facettenreicher assoziiert werden (Abb. 7.8).




(a) Vor dem Kurs angefertigte Mindmap (b) Nach dem Kurs angefertigte Mindmap

Abbildung 7.8: Mindmaps eines Teilnehmenden des Kurses.

Dieses Bild spiegelt sich auch in den Word-Clouds wider, die anhand der von allen Befragten aufgeführten Begriffe in der Vor- sowie Nacherhebung erstellt worden sind (Abb. 7.9).




(a) Begriffe der vor dem Kurs angefertigten Mindmaps (b) Begriffe der nach dem Kurs angefertigten Mindmaps

Abbildung 7.9: Word-Clouds zu den Begriffen der Mindmaps des Kurses *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

So finden sich der den vor Kursbeginn wenige verschiedene Begriffe, recht ähnlich zu denen, die in Medien zum Thema Brennstoffzellen dominieren. „Wasserstoff “ war vielen Lernenden präsent. Darüber hinaus waren die Begriffe relativ unspezifisch, wie beispielsweise die Formulierung „hat Zukunft“. Der einzige bekannte Anwendungsbereich von Brennstoffzellen bestand offenbar in der Antriebstechnik, was anhand der genannten Begriffe „Antriebe“ und „Autos“ abgeleitet wird.
Nach Kursende waren die Mindmaps vielseitiger. Gegenüber der Vorerhebung wurden komplexere Mindmaps angefertigt, sodass für den Moment ein Wissenszuwachs ersichtlich war. Erwartungsgemäß sind nun auch zu Inhalten des Kurses passende Begriffe aufgeführt, sodass offenbar weitere Anwendungsbereiche von Brennstoffzellen sowie vereinzelte Fachbegriffe aus dem Bereich Elektrochemie („Katalysator“, „galvanisches Element“) präsent waren.

#### 7.4.7.5. Feedback zum Lernarrangement

Das Feedback zu dem Kurs *Alleskönner Brennstoffzellen?!* wurde nur über in der Nacherhebung enthaltene Items eingeholt, weil durch situative Besonderheiten keine zeitlichen Kapazitäten zum Durchführen der Fragebogenerhebung zur Qualitätssicherung durch die Junior Uni selbst bestanden.
Es werden ausschließlich die Rückmeldungen derer berücksichtigt, die sowohl bei Vor-

als auch Nacherhebung anwesend waren, da sie den Kurs in Gänze besucht haben und somit bewerten konnten. Sie stimmten der Aussage überwiegend zu, im Kurs viel dazugelernt zu haben. Die große Mehrheit attestierte Spaß bei den Experimenten. Sie stimmten *eher zu*, viel aus den Experimenten gelernt zu haben und nach Abschluss des Kurses nochmal in das E-Book zu schauen.

### 7.4.8. Fazit und Bemerkungen zu der Evaluation

Erneut wurde der gelungene Ablauf als grundsätzlicher Indikator für ein angemessenes Kurskonzept gewertet. Die Reflexion der vorhergehenden Einheiten in Kleingruppen und wechselseitige Präsentation in der sechsten Einheit liefen in dem geschlossenen Format ohne Komplikationen ab.

Insgesamt absolvierten vier angehende Junior Uni Dozenten ihre jeweils eine Einheit umfassende Hospitation während der Erprobung. Zwei der Hospitanten nahmen an der fünften Einheit teil. In einer Sicherungsphase gaben sie ungefragt vor den Studierenden eine sehr negative Einschätzung zu deren Leistungsstand ab. Es ist nicht auszuschließen, dass diese sehr beklemmende Äußerung und die Fluktuation an Lernenden während des Kurses sich auf Vergleichsitems zu persönlichem Interesse sowie das Feedback zum Lernarrangement negativ ausgewirkt haben.

Bedenkt man diese widrigen Umstände, ist das aufgeführte Feedback der Teilnehmenden positiv zu betrachten. Es suggeriert, dass die Experimente gut ausgewählt und durch unterstützende Materialien begleitet wurden, anders wäre der empfundene Lernzuwachs und insbesondere der Spaß beim Experimentieren nicht zu erreichen gewesen. Das E-Book scheint grundsätzlich als roter Faden akzeptiert und als über den Kurs hinaus sinnvoll erachtet zu werden, da die Befragten überwiegend rückmeldeten, es nach Ablauf des Kurses noch einmal zu konsultieren.
Der empfundene Lernzuwachs der Studierenden kann anhand der zunehmend komplex ausgefüllten Mindmaps nach dem Kurs als Lernzuwachs bekräftigt werden. Darüber, wie nachhaltig oder anschlussfähig dieser Lernzuwachs ist, kann keine Aussage getroffen werden.

Aufgrund des unterschiedlichen Umfangs und der kleinen und jeweils sehr heterogenen Stichproben ist kein fundierter Abgleich des Lernzuwachses zwischen *Brennstoffzellen weitergedacht!* und *Alleskönner Brennstoffzellen?!* jeweils für 14 bis 20-Jährige möglich.

## 7.5. Exkurse zu biologischen Brennstoffzellen

Sowohl für die Sekundarstufe I als auch II sind Lernarrangements zum Thema „Biologische Brennstoffzellen“ mit experimentellem Schwerpunkt erstellt worden. Das Konzept für die Sekundarstufe I umfasste dabei sowohl mikrobielle als auch enzymatische Brennstoffzellen, während das der Sekundarstufe II aus organisatorischen Gründen nur mikrobielle Brennstoffzellen in den Fokus nahm. Zur Durchführung mit Lernenden der Sekundarstufe I standen vier Zeitstunden (240 Minuten) zur Verfügung, mit Lernenden der Sekundarstufe II drei Schulstunden (135 Minuten)[16]. Die nachfolgend skizzierten Unterrichtseinheiten für beide Zielgruppen wurden in einem ersten Schritt zur Implementierung abseits vom regulären Unterrichtsgeschehen erprobt. In der Sekundarstufe I kann der Exkurs als Abschluss des Inhaltsfeldes *Energie aus chemischen Reaktionen*[156] und in der Sekundarstufe II zur Ergänzung des *Inhaltsfeldes 3: Elektrochemie*[92] des Grund- und Leistungskurses genutzt werden. Das E-Book-Format bedingte in beiden Fällen, dass im Sinne von *Get your own device* (GYOD) den Lernenden zu jeder Einheit digitale Endgeräte mit ausreichend großem Bildschirm zur Verfügung gestellt worden sind. Nach Abschluss des Lernarrangements wurden die E-Books den Lernenden im epub- oder pdf-Format zur dauerhaften Nutzung zugestellt.

### 7.5.1. Ziele

Die Unterrichtssequenzen verfolgen in erster Linie das Ziel, Lernende der Sekundarstufe I auf biologische beziehungsweise in der Sekundarstufe II auf mikrobielle Brennstoffzellen und deren Anwendungsspektrum aufmerksam zu machen, da sonst zumeist (auch in den Medien) vorrangig die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle präsent ist.
Aufgrund der Ausrichtung der vorliegenden Arbeit werden nachfolgend nur die explizit angestrebten fachlichen Teilkompetenzen beleuchtet, obwohl in den Lernarrangements darüber hinaus die Teamfähigkeit und Experimentierkompetenz der Lernenden geschult werden soll.

#### 7.5.1.1. Angestrebte fachliche Teilkompetenzen

Da die biologische Brennstoffzellen bislang nicht in Bildungsplänen verankert sind, gehen die formulierten fachlichen Teilkompetenzen erneut über die Bildungspläne für das Fach Chemie der Sekundarstufe I beziehungsweise II an Gymnasien hinaus.

[16] Dennoch wurden komplett analoge Settings und Materialien angelegt,[209] siehe auch digitaler Anhang.

Lernziele, die sich nur auf das Setting der Sekundarstufe I beziehen sind mit einer vorangestellten römischen Eins (I) gekennzeichnet, und die der Sekundarstufe II mit einer entsprechenden Zwei (II). Gelten die Lernziele für beide Zielgruppen, erfolgt keine explizite Kennzeichnung:
Die Lernenden...

- beschreiben die Funktionsweise von mikrobiellen Brennstoffzellen* unter Angabe der Bedeutung von Biokatalysatoren** (AFB I).
- geben die Einsatzgebiete mikrobieller Brennstoffzellen an* (AFB I-II).
- begründen anhand des Versuchs zur Redox-Aktivität von Bäckerhefe die Eignung als Biokatalysator
- bestätigen die Eignung von Bäckerhefe als Biokatalysator in Brennstoffzellen* (AFB I-II).

I geben die Einsatzgebiete enzymatischer Brennstoffzellen an* (AFB I-II).

I vergleichen mikrobielle und enzymatische Brennstoffzellen als Vertreter der biologischen Brennstoffzellen miteinander** (AFB I-III).

II erklären die Funktion des Farbstoffes Methylenblau bei dem Versuch zur Redox-Aktivität von Bäckerhefe* unter Benennung der Redox-Prozesse*** (AFB II-III).

II beschreiben in der Hefe-Brennstoffzelle ablaufenden Prozesse unter Zuhilfenahme vereinfachter Reaktionsgleichungen (AFB I).

II stellen die Maßnahmen zur Steigerung der elektrischen Leistung der Hefe-Brennstoffzelle dar* (AFB I-II).

## 7.5.2. Exkurs zur biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I

### 7.5.2.1. Notwendiges Vorwissen

Wenngleich die Auswertungen der Versuche in dem Lernarrangement eher auf einem phänomenologischen Niveau anzusiedeln ist, sind Aspekte des (vorangegangenen) Chemieunterrichts in der Sekundarstufe I zum Nachvollziehen der Inhalte hilfreich. Die Lernenden sollten die Oxidation als Elektronenübertragungsreaktion kennen sowie über grundlegendes Wissen zu galvanischen Elementen und Brennstoffzellen verfügen.

Weiterhin sollten die Lernenden aus dem Physikunterricht der Sekundarstufe I bereits neben der Begrifflichkeit Strom die Unterschiede zwischen den Messgrößen Spannung, Stromstärke, elektrischem Widerstand und den jeweiligen Zusammenhang mit der elektrischen Leitfähigkeit kennen.[204]
Für einen gelingenden Ablauf des Lernarrangements sind zudem laborpraktische Fähigkeiten der Lernenden, wie etwa das Abmessen und Abwiegen, die Benennung von und der Umgang mit Laborgeräten, essentiell.

#### 7.5.2.2. Medien und Materialien

Zur Begleitung des Lernarrangements wurde ein interaktives E-Book (in PubCoder) angelegt, um ein Arbeiten ohne Medienbruch zu ermöglichen[17]. Den Einstieg in die Einheit bildet das Video MBZ-tonlos.[183]
Weiterhin sind fakultativ die Links zu Videos zur Redox-Aktivität von Hefe (VRedox) sowie der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau (VZweiT) und Ein-Topf-Aufbau (VEinT) hinterlegt.[183]

#### 7.5.2.3. Experimente

Die in dem Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen eingebundenen Experimente sind zur besseren Übersichtlichkeit nachfolgend tabellarisch aufgeführt. Dabei sind sie der jeweiligen Stunde und ihrer Kernaussage zugeordnet (siehe Tabelle 7.9).

| | **Experiment** | **Kernaussage** |
|---|---|---|
| 1. Stunde | Redox-Aktivität von Bäckerhefe | Bäckerhefe ist redox-aktiv und somit generell als Biokatalysator geeignet |
| 2. Stunde | Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau | Bäckerhefe ist als Biokatalysator in Brennstoffzellen geeignet |
| 3. Stunde | Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau | Durch einen kompakteren Aufbau kann die elektrische Leistung der Brennstoffzelle gesteigert werden |
| 4. Stunde | Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase | Enzyme eignen sich als Biokatalysatoren |

Tabelle 7.9: Kompakte Übersicht der Experimente als Eckpunkte des Exkurses zu biologischen Brennstoffzellen.

[17] Die Materialien werden auszugsweise in Kapitel 6 vorgestellt und befinden sich vollständig im digitalen Anhang dieser Arbeit.

#### 7.5.2.4. Aufbau und Inhalte

Der Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I wurde aufgrund der Erprobungssituation (vgl. Abschnitt 7.5.2.5) als eine aus 240 Minuten bestehende Einheit geplant, die somit in vier Zeitstunden unterteilt werden kann. Um den Exkurs in der veranschlagten Zeit zu durchlaufen, ist in jeder der vier Zeitstunden die Auswertung eines Experimentes zu sichern (vgl. Tab. 7.9). Die Experimentierphasen bilden den inhaltlichen Schwerpunkt und nehmen den Großteil der Zeit ein. Sofern die technische Ausstattung es zulässt, können aktuell von Lernenden bearbeitete Seiten des E-Books, zum Beispiel in Einleitungs- oder Auswertungsphasen, mithilfe eines Beamers zur besseren Orientierung im Unterrichtsgeschehen und gemeinsamen Reflexion projiziert werden. Vor dem inhaltlichen Beginn sowie nach dem inhaltlichen Abschluss des Exkurses wurden die Lernenden anhand von Fragebögen im Rahmen der didaktischen Begleitforschung befragt. Nachfolgend ist der inhaltliche Verlauf des Exkurses skizziert:

1. **Stunde:** Zu Beginn des Exkurses selbst sollte eine kurze Einführung in die Nutzung des E-Books sowie eventuell des digitalen Endgerätes erfolgen. Anschließend können die Lernenden in Zweierteams oder Kleingruppen anhand des E-Books weitestgehend selbstständig arbeiten. Der inhaltliche Einstieg erfolgt über ein selbst erstelltes, tonloses Video im Umfang von etwa 4 Minuten. Anschließend wird die Frage aufgeworfen, ob auch Mikroorganismen aus dem Alltag der Lernenden als Biokatalysatoren geeignet seien und zur Bäckerhefe übergeleitet. Es folgt der Versuch zur Überprüfung der Redox-Aktivität von Bäckerhefe. Um die Beobachtungen interpretieren zu können, ist ein Video zur Erklärung des Versuchs sowie ein unterstützender Text hinterlegt. Die Lernenden können an dieser Stelle anhand eines Quiz ihr Verständnis der Abläufe prüfen. Das Quiz wird auch zur Besprechung im Plenum genutzt.

2. **Stunde:** Um die Eignung von Bäckerhefe als Katalysator in Brennstoffzellen zu überprüfen, bauen die Lernenden nun die Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau auf. Wenn sie die Spannung über einen Zeitraum von 10 Minuten gemessen haben, vollziehen sie den Versuch in bekannter Weise mithilfe eines Videos und optionalem Text anhand eines Quiz nach.

3. **Stunde:** Nachdem die Bäckerhefe als geeigneter Biokatalysator verifiziert wurde, wird nun die Begrifflichkeit der elektrischen Leistung eingeführt. Die Lernenden erfahren, dass eine Möglichkeit zur Steigerung der Zellleistung die Verringerung des Innenwiderstandes von Zellen ist. Diese These überprüfen sie durch den

Betrieb der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau. Die Messung der Zellspannung erfolgt erneut über einen Zeitraum von 10 Minuten. Es wird eine höhere Zellspannung als im Zwei-Topf-Aufbau bestimmt. Zusätzlich zu dem Video, einem unterstützendem Text und dem Quiz ist zur Zwischensicherung zum Thema mikrobielle Brennstoffzellen eine Concept-Map als Drag-and-Drop-Aufgabe zu bearbeiten, sodass diese zur Besprechung im Plenum genutzt werden kann.

**4. Stunde:** Mithilfe eines Informationstextes wird auf enzymatische Brennstoffzellen als zweite Unterkategorie der biologischen Brennstoffzellen verwiesen und Anwendungsbereiche skizziert. Es folgt die Fertigung und der Betrieb einer enzymatischen Brennstoffzelle auf Lactase-Basis. Dieser zeitaufwendige Versuch wird mithilfe einer Concept-Map im Drag-and-Drop-Format gesichert. Diese Map dient einer abschließenden, inhaltlichen Besprechung.

#### 7.5.2.5. Erprobungssituation

Das Lernarrangement wurde am 25.02.2020 von Lernenden verschiedener Klassen der Jahrgangsstufe acht des Heriburg-Gymnasiums Coesfeld in den Räumen der Didaktik der Chemie an der Bergischen Universität Wuppertal durchlaufen. Die Lernenden beschäftigen sich im Rahmen ihres an das sogenannte CIRO-Projekt[18] angegliederten Wahlpflichtfaches mit interdisziplinären Fachinhalten rund um die Themen Nachhaltigkeit, Klimawandel und (Wasserstoff-)Brennstoffzellen, sodass sich die Einheit als Erweiterung anbot. Die Initiative für diesen Besuch ging von der Lehrkraft des CIRO-Projektkurses aus.
Die Lernenden haben sich freiwillig für den CIRO-Kurs als Wahlpflichtfach entschieden. Zum Zeitpunkt der Exkursion beschäftigten sich die Kursteilnehmenden inhaltlich mit dem Modul 2, dessen zentrales Thema *Erneuerbare Energieträger* sind. Angaben der Lehrkraft zufolge wurden bereits elektrochemische Grundlagen gelegt. So wurde die Elektrolyse mit dem Hoffmann´schen Apparat durchgeführt, sowie Brennstoffzellen-Modellautos genutzt. Da im regulären Chemieunterricht der Lernenden jedoch bislang weder Lewis-Formel noch Dipol-Strukturen thematisiert worden sind, wurden im CIRO-Kurs Auswertungen auf Basis der Summenformeln genutzt.
Der Besuch des CIRO-Kurses an der Universität Wuppertal hatte zusätzlich zur Vermittlung von Fachinhalten zum Ziel, die Universität als Institution als solche vorzustellen und den Lernenden einen Einblick zu vermitteln. Neben einer Einführung

[18] Bei CIRO handelt es sich um ein EU gefördertes Erasmus$^+$ -Projekt, im Länderverbund Griechenland, Spanien und Deutschland. Die Arbeitssprache des Projektes ist Englisch, der Exkurs wurde jedoch in deutscher Sprache gestaltet.

über Wissenswertes zur Universität, Angebote für Schüler zur Berufsorientierung und mögliche Studiengänge durch Frau Prof. Dr. Bohrmann-Linde führte die Dozentin einen Rundgang über den Campus durch und sah ein gemeinsames Mittagessen in der Mensa vor.

#### 7.5.2.6. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung

Eine graphische und tabellarische Aufbereitung der erhobenen Daten befindet sich im Anhang F.3.1.

***Charakterisierung der Stichprobe***
An der Erprobung nahmen zehn Lernende eines achten Jahrgangs am Gymnasium im Alter von 13 - 15 Jahren teil. Das Geschlechterverhältnis war beinahe gleich. Die Vorbenotung der Lernenden im Fach Chemie erstreckte sich auf die Noten 1 - 3, wobei die Note 2 am häufigsten vergeben war. Dadurch, dass alle Lernenden die achte Jahrgangsstufe eines Gymnasiums besuchen, Chemienoten zwischen *sehr gut* und *befriedigend* aufwiesen und gemeinsam den Wahlpflichtkurs CIRO besuchten, wurde die Gruppe als homogener als die vorheriger Erprobungen eingeschätzt.

***Motivation zur Teilnahme am Exkurs***
Die Teilnahme an der Exkursion des Wahlpflichtkurses zur Universität Wuppertal war für die Lernenden nicht verpflichtend, weswegen die Motivation hinterfragt wurde. Mehrheitlich wurde angegeben, aus allgemeiner Neugierde teilzunehmen. Teilnehmenden Freunden und dem Elternwillen wurde eine untergeordnete Rolle zugesprochen. Es gaben 60 % der Lernenden mit verschiedenem Grad der Zustimmung an, *eher* auf der Suche nach einer Studienperspektive zu sein.

***Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne***
Die Beliebtheit von Chemielehrkraft, dem Fach Chemie sowie Naturwissenschaften allgemein war sehr heterogen unter den Lernenden ausgeprägt. Sowohl die Beliebtheit des Faches Chemie als auch der Naturwissenschaften allgemein wurde vor Kursbeginn etwas höher attestiert, als danach. Der überwiegende Anteil der Lernenden gab an, sich regulär im Chemieunterricht eher anzustrengen. Es herrschte eher die Auffassung vor, dass Chemie nicht zu den „schwierigen“ Schulfächern zähle.

Die Zukunftsrelevanz in der Schule behandelter Themen sowie deren Relevanz für den eigenen Alltag wurde sehr heterogen gewertet, es sind jeweils alle Merkmalsausprägungen angewählt worden. Keiner der Befragten stimmte der Aussage zu, sich in der Freizeit über naturwissenschaftliche Themen zu informieren - vier der Befragten lehnten diese Aussage sogar entschieden ab.
Auch im Umfeld der Befragten schienen Naturwissenschaften keine übergeordnete Rolle zu spielen: Zwar interessierte sich in 70 % der Fälle mindestens ein Elternteil eher für Naturwissenschaften, es hatte jedoch nur ein Elternteil beruflich damit zu tun. Die Hälfte der Befragten gaben an, dass zuhause naturwissenschaftliche Themen angesprochen würden. Wenngleich bei diesem Item alle Merkmalsausprägungen vertreten waren, geht auch hervor, dass im häuslichen Umfeld eher als im Freundeskreis naturwissenschaftliche Themen angesprochen würden. Vor Kursbeginn stimmten 70 % der Lernenden der Aussage absolut zu, später studieren zu wollen. Nur einer der Befragten stimmte der Aussage in vollem Maße zu, ein naturwissenschaftliches Studium aufnehmen zu wollen. Die Merkmalsausprägungen beider Items waren in der Nacherhebung etwas niedriger, wohingegen die Bereitschaft, einen naturwissenschaftlichen Beruf auszuüben, leicht zunahm. Der angedeutete Trend lässt sich nicht zweifelsfrei auf die Inhalte oder den Verlauf des Lernarrangements zurückführen: Aufgrund der Situierung an der Universität und der Vorstellung dieser Bildungseinrichtung stellten die Lernenden diverse Fragen zum Studium. So war beispielsweise von Interesse, ob man im Studium die Kurse vollkommen frei wählen könne, und, ob es eine Art festen Klassenverband gibt. Auch diese Einblicke können selbstverständlich Einfluss auf die Items zu Zukunftsplänen gehabt haben. Vor und nach dem Kurstag gab die Hälfte der Befragten konkrete Studiengänge an, die sich während des Projektkurses nicht änderten: Architektur, Deutsch, Medizin, Sport.

***Vorwissen und Wissen unmittelbar nach Kursende im Vergleich***

Bereits in der Vorerhebung haben alle Befragten unterschiedlich komplexe Mindmaps angefertigt. In Tabelle 7.10 sind Werte zur Quantifizierung der Mindmaps eingetragen. Um eine Zuordnung befragter Personen anhand der generierten Codes auszuschließen, sind diese in der Tabelle mit der Abkürzung L für Lernende und einer Ziffer aufgeführt. Die Befragten trugen zwischen zwei und zehn Begriffen ein, verzichteten weitestgehend auf Unterkategorien und verwendeten etwa gleich häufig Ein-Wort-Begriffe sowie ausformulierte Stichpunkte. In den Mindmaps der Nacherhebung zeigen sich kaum quantitative Unterschiede gegenüber denen der Vorerhebung.

| | | $n_{absolut}$ | $n_{einfach}$ | $n_{Unterkategorie}$ | $n_{ein-Wort}$ | $n_{ausformuliert}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | vor | 6 | 6 | 0 | 1 | 5 |
| | nach | 7 | 7 | 0 | 0 | 7 |
| L2 | vor | 5 | 5 | 0 | 1 | 4 |
| | nach | 5 | 5 | 0 | 1 | 4 |
| L3 | vor | 10 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| | nach | 9 | 3 | 6 | 3 | 6 |
| L4 | vor | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| | nach | 4 | 4 | 0 | 2 | 2 |
| L5 | vor | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 |
| | nach | 7 | 4 | 3 | 7 | 0 |
| L6 | vor | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| | nach | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| L7 | vor | 4 | 4 | 0 | 3 | 1 |
| | nach | 5 | 5 | 0 | 4 | 1 |
| L8 | vor | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| | nach | 3 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| L9 | vor | 8 | 3 | 5 | 3 | 5 |
| | nach | 8 | 1 | 7 | 3 | 5 |
| L10 | vor | 5 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| | nach | 6 | 6 | 0 | 3 | 3 |

Tabelle 7.10: Quantitative Erfassung der vor und nach dem Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen.

Unter qualitativen Gesichtspunkten wird ein Unterschied deutlicher: Während in den Mindmaps der Vorerhebung eher globales Wissen rund um die Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzelle und Inhalte des CIRO-Projektes genannt wurden, findet sich in denen der Nacherhebung neben konkreten Inhalten des Kurses (Hefe, Zucker, Strom aus Zucker) der Hinweis auf weitere Brennstoffzelltypen und Anwendungsbereiche wieder. Die genannten Begriffe sind in Abbildung 7.10 und 7.11 jeweils als Word-Clouds aufbereitet dargestellt.




Abbildung 7.10: Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen (Sek. I): Begriffe der vor dem Kurs angefertigten Mindmaps.




Abbildung 7.11: Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen (Sek. I): Begriffe der nach dem Kurs angefertigten Mindmaps.

Während der Begriff „Wasserstoff“ in der Vorerhebung prominent vertreten war, rückten in den Mindmaps der Nacherhebung durch den Begriff „Herzschrittmacher“ deutlich auch andere Anwendungsbereiche in den Fokus. Insgesamt wurde in den Mindmaps der Nacherhebung ein größeres Spektrum verschiedener Begriffe aufgeführt, was zunächst als Indikator für eine Elaboration der semantischen Netzwerke der Lernenden gewertet werden kann.

***Feedback zum Lernarrangement durch die Lernenden***

Die Befragten gaben an, in dem Kurs *eher viel* dazugelernt zu haben: 40 % stimmten der Aussage voll zu, 40 % stimmten zu und 20 % eher. Sie gaben an, dass die Experimente Spaß gemacht hatten. Weiterhin stimmten sie größtenteils zu, viel aus den Experimenten gelernt zu haben. Ob nach dem Kurs erneut in das E-Book geschaut würde, wurde sehr heterogen bewertet, jedoch nicht abgelehnt. Ein Befragter nutze die Möglichkeit, freie Anmerkungen zu notieren: Es sei interessant, nur zu viele Informationen in der kurzen Zeit gewesen.

***Feedback zum Lernarrangement durch die Lehrkraft***

Eine 44-jährige Gymnasiallehrkraft für die Fächer Chemie und Englisch mit 19-jähriger Berufserfahrung begleitete den Kurs bei der Exkursion. In ihrem persönlichen Resultat bewertete sie den Projekttag allgemein mit der zweithöchsten Merkmalsausprägung. Sie gab weiterhin an, dass die Inhalte des Projekttages bezogen auf den Chemieunterricht ein Randthema seien, für das CIRO-Projekt jedoch „sehr relevant“ seien. Ihr Eindruck von den gewählten Experimenten war überwiegend positiv. Dem Experiment zur Redox-Aktivität wurde eine sehr gute Durchführbarkeit und klare Beobachtung sowie ein guter Erkenntnisgewinn zugesprochen. Die Experimente zur Hefe-Brennstoffzelle wurden eher befriedigend bewertet. Eine mögliche Erklärung liefert die freie Anmerkung, dass zwischen den Aufbauten als Ein- oder Zwei-Topf die Erkenntnis zu wenig anders sei. Eine getrennte Bewertung der beiden Experimente war nicht vorgesehen, sodass nicht überprüft werden konnte, ob Einzelbewertungen anders ausfielen.

Das Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle wurde in den geschlossenen Fragen hinsichtlich Durchführbarkeit und Beobachtungen als ausreichend und der Erkenntnisgewinn als befriedigend bewertet. Dem fügt sich der Kommentar an, dass die Schüler zu unkonzentriert für den Versuch gewesen seien. Möglicherweise treffen die vorgenommenen Bewertungen also nur auf die konkrete Durchführung und nicht auf einen generellen Eindruck des Experimentes zu.

Die Gestaltung der Materialien des Kurstages - also die des E-Books - wurde durchgehend mit der zweithöchsten Merkmalsausprägung bewertet. So schien Übersichtlichkeit, Verständlichkeit und Durchführbarkeit überwiegend gegeben. Ein Anmerkung zur Verbesserung der Materialien wurde nicht formuliert.

### 7.5.3. Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II

#### 7.5.3.1. Notwendiges Vorwissen

Die Lernenden sollten über grundlegendes Wissen aus dem vorangegangen Chemieunterricht in der Sekundarstufe I und II verfügen: Neben Elementarteilchen und dem Aufstellen von Reaktionsgleichungen allgemein, der Bedeutung von Stromfluss und der Messgrößen Spannung sowie Stromstärke, sollten Redox-Reaktionen als Elektronenübertragungsreaktionen sowie galvanische Elemente und Brennstoffzellen bekannt sein.
Weiterhin sind für einen gelingenden Ablauf des Lernarrangements laborpraktische Fähigkeiten der Lernenden essentiell.

#### 7.5.3.2. Medien und Materialien

Auch für die Zielgruppe der Sekundarstufe II wurde ein flankierendes E-Book (in PubCoder) angelegt.[19]. Dieses enthält analog zu dem der Sekundarstufe I das Video zur Einführung in die Thematik *mikrobielle Brennstoffzellen* (MBZ-tonlos) in lautloser Version mit Untertiteln. Ebenfalls sind fakultativ die Links zu Videos zur Redox-Aktivität (VRedox) von Hefe sowie der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf- und Ein-Topf-Aufbau (VZweiT, VEinT) hinterlegt.[183]
In eine Zusatzaufgabe sind zudem vier Videos als Links eingebunden, die in Kooperation mit der Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie der Universität Hohenheim entstanden sind. In einem der Videos wird zunächst eine Einführung in die Forschung an mikrobiellen Brennstoffzellen vor Ort gegeben (ITV-MBZ-dt), während im zweiten Video ein authentischer Einblick in die Laborrealität (Labor-MBZ-dt) gegeben wird. Zwei weitere Videos geben Aufschluss über die Werdegänge der Forschenden Dr. ing. Anastasia Oskina und Dr. Padma Priya Ravi (ITV-Priya-dt, ITV-Ana-dt).

#### 7.5.3.3. Experimente

Die in den Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen eingebundenen Experimente entsprechen denen, die in den ersten drei Stunden des Exkurses zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I eingesetzt wurden (siehe Tabelle 7.9). Aus Zeitgründen wurde der Versuch zur enzymatischen Brennstoffzelle nicht einbezogen.

[19] Die Materialien werden auszugsweise in Kapitel 6 vorgestellt und befinden sich vollständig im digitalen Anhang dieser Arbeit.

#### 7.5.3.4. Aufbau und Inhalte

Der *Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen* für die Sekundarstufe II ist als drei Schulstunden zu je 45 Minuten umfassendes Lernsetting angelegt worden. Um die Unterrichtssequenz in der veranschlagten Zeit zu durchlaufen, ist in jeder der drei Unterrichtsstunden die Auswertung eines Experimentes zu sichern (vgl. Tab. 7.9). Die didaktische Begleitforschung wurde im bekannten Format integriert. Im Verlauf absolvieren die Lernenden weitestgehend selbstständig anhand des E-Books das Lernarrangement. Der Verlauf des Exkurses wird nachfolgend skizziert:

1. **Schulstunde:** Die Lernenden überprüfen (und re-aktivieren) im E-Book in einem Quiz zum Selbsttest ihr Vorwissen zu elektrochemischen Grundlagen sowie den Brennstoffzellen laut Lehrplan. Anschließend steigen die Lernenden anhand eines Informationstextes in das Thema des Exkurses ein: Sie erfahren, dass es biologische Brennstoffzellen gibt, die in mikrobielle und enzymatische Brennstoffzellen untergliedert werden. Im nachfolgenden Video zum Kurzportrait mikrobieller Brennstoffzellen wird neben der Funktionsweise auch das Einsatzgebiet mikrobieller Brennstoffzellen und daraus resultierendes Potential für die angestrebte Energiewende verdeutlicht. Aus diesem Video wird die Frage abgeleitet, ob auch Mikroorganismen aus dem Alltag der Lernenden für den Einsatz in mikrobiellen Brennstoffzellen geeignet sind. Dem schließt sich der Versuch zur Überprüfung der Redox-Aktivität von Bäckerhefe an. Nach Auswertung des Versuches wird ein Quiz zum Selbsttest durchlaufen. Optional steht ein Video zur Redox-Aktivität von Bäckerhefe als Hilfestellung zur Verfügung. Die Besprechung der bearbeiteten Aufgaben bildet den Abschluss der ersten Stunde.

2. **Schulstunde:** Um die Eignung von Bäckerhefe als Katalysator in Brennstoffzellen zu überprüfen, bauen die Lernenden die Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau auf. Wenn sie die Spannung über einen Zeitraum von 10 Minuten gemessen haben, werten sie den Versuch in bekannter Weise aus. Die Bäckerhefe wird als geeigneter Biokatalysator in Brennstoffzellen verifiziert. An dieser Stelle erfolgt auch die Zuordnung von Reaktionspartnern in die vereinfachten Redox-Reaktionen der Hefe-Brennstoffzelle im Drag-and-Drop-Format, bevor die Lernenden das Quiz zum Selbsttest durchführen. Es steht als optionale Hilfestellung das Video zur Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau zur Verfügung. Die Schulstunde schließt mit einer Besprechung im Plenum.

3. **Schulstunde:** In einer kurzen Übersicht vergegenwärtigen sich die Lernenden den Zusammenhang von Spannung, Stromstärke, Widerstand und elektri-

scher Leistung. Anschließend realisieren sie die Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau. Es wird eine höhere Zellspannung und somit Leistung als im Zwei-Topf-Aufbau bestimmt. In einem Quiz ordnen die Lernenden den Effekt dem geringeren Innenwiderstand zu. Für sehr schnelle Lernende sind die in Kooperation mit der Universität Hohenheim entstandenen Videos zur mikrobiellen Brennstoffzelle in der aktuellen Forschung sowie Interviews zu den individuellen Werdegängen zweier Forscherinnen hinterlegt. Zur abschließenden inhaltlichen Sicherung des eigentlichen Exkurses bearbeiten die Lernenden eine Concept-Map als Drag-and-Drop-Aufgabe. Die Besprechung der Concept-Map im Plenum rundet den Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen ab.

#### 7.5.3.5. Erprobungssituation

Es bestand die Möglichkeit, ein Lernarrangement im Chemieunterricht eines Q2-Kurses am Rurtal-Gymnasium Düren zu erproben, der Chemie nicht als Abiturprüfungsfach belegt. So wurde die Gelegenheit für diese inhaltliche Ergänzung gewährt. Es standen drei Schulstunden zu je 45 Minuten zur Verfügung: Am Montag den 09.03.2020 wurde eine Doppelstunde und am Mittwoch den 11.03.2020 eine Einzelstunde. Die Durchführung erfolgte in dem regulären Chemieraum. Die iPads der Schule wurden als digitale Endgeräte zur Arbeit mit den E-Books genutzt.

#### 7.5.3.6. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung

Eine graphische und tabellarische Aufbereitung der erhobenen Daten befindet sich im Anhang F.4.1.

***Charakterisierung der Stichprobe***

Zur ersten Doppelstunde des Lernarrangements erschienen 17 Lernende im Alter von 17 - 19 Jahren. Sie waren überwiegend männlich. Zur abschließenden Einzelstunde erschienen 16 Lernende. Bei Items, die in der Vor- und Nacherhebung erhoben wurden sowie dem Feedback, werden nur die Angaben der 15 Teilnehmenden berücksichtigt, die zu beiden Terminen anwesend waren. Die Lernenden waren im Fach Chemie mit Noten im Bereich von 2 - 4, wobei die Noten 3 und 4 mit gleicher Anzahl am Häufigsten vergeben wurden.

***Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne***

Die Befragten fanden ihre reguläre Chemielehrkraft überwiegend gut, wohingegen dem Fach Chemie in der Vorerhebung eine sehr heterogene Beliebtheit attestiert wurde: Eine Person stimmte dem Item, das Fach Chemie zu mögen absolut zu

und drei lehnten diese Aussage ab. In der Nacherhebung fand die Aussage einen insgesamt größeren Zuspruch, sodass das Fach Chemie offenbar etwas an Beliebtheit gewonnen hatte. Dahingegen unterschied sich die in der Vor- und Nacherhebung ausgewiesene Beliebtheit von Naturwissenschaften allgemein nur unwesentlich. Die Befragten gaben an, sich im Chemieunterricht eher anzustrengen. Die große Mehrheit war zudem der Auffassung, dass Chemie zu den „schweren“ Schulfächern gehöre. Die Einschätzungen, ob in der Schule zukunftsrelevante Themen behandelt würden, und, ob Themen des Chemieunterrichts für den jeweiligen Alltag relevant seien, gingen weit auseinander. Ebenso verhielten sich die Angaben, zum Freizeitverhalten: Jede Merkmalsausprägung wurde bei dem Item angewählt, dass man sich in der Freizeit über naturwissenschaftliche Themen informiere. Der Anteil derer, die der Aussage eher zustimmten, überwog leicht.
Ähnlich heterogen gelagert war das naturwissenschaftliche Interesse des Umfeldes: 40 % der Lernenden gab an, dass sich ihre Eltern gar nicht für Naturwissenschaften interessieren. Die deutliche Mehrheit der Elternteile (65 %) hatte beruflich nicht mit Naturwissenschaften zu tun. Dennoch wurden naturwissenschaftliche Themen eher zuhause als im Freundeskreis angesprochen. Die Merkmalsausprägungen variieren an dieser Stelle stark.
Die Zukunftspläne der Lernenden veränderten sich von Vor- zu Nacherhebung wenig: Der überwiegende Teil der Befragten plante, ein Studium aufzunehmen. Jedoch erwog nur ein Fünftel, ein naturwissenschaftliches Studium zu ergreifen. Die Bereitschaft, einen naturwissenschaftlichen Beruf auszuüben, war nach dem Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen etwas stärker ausgeprägt. In der Vorerhebung gaben 60 % der Lernenden einen geplanten Studiengang an. Das Spektrum reichte von Sport über naturwissenschaftlichen bis zu sozialwissenschaftlichen Domänen, insbesondere Bereiche der Ökonomie schienen von Interesse. In der Nacherhebung zeigte sich ein recht ähnliches Bild. Erfreulicherweise gab nun ein Lernender an, Chemie studieren zu wollen.

***Vorwissen und Wissen unmittelbar nach Kursende im Vergleich***

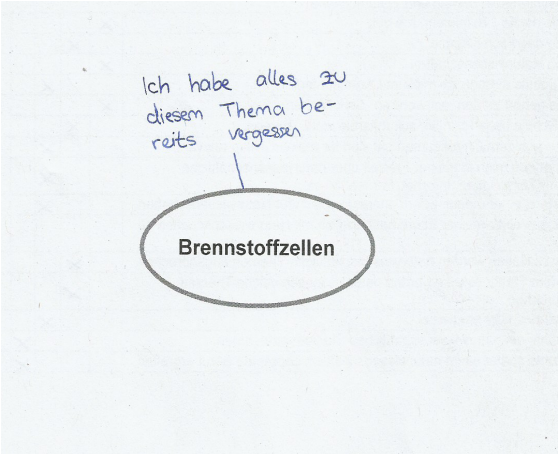
In der Vorerhebung fügten alle Befragten Begriffe in den für die Mindmap vorgesehenen Bereich ein, vgl. 7.11. L10 hat jedoch in der Vor- und Nacherhebung nur Begriffe aufgeführt, diese jedoch nicht in einer Mindmap angeordnet. L8 führte eine Reaktionsgleichung auf, was als ausformulierter Stichpunkt gewertet wurde. Die Lernenden legten kaum Unterkategorien an, formulierten aber einige der Aspekte aus. Insgesamt

schwankt die Anzahl der genannten Begriffe stark, obwohl alle Lernenden gemeinsam als Kurs im Vorfeld das Inhaltsfeld Elektrochemie durchlaufen und potentiell ein ähnlich umfangreiches Vorwissen hatten.

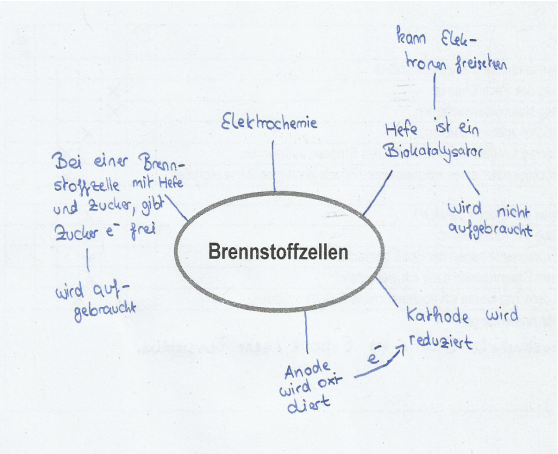
| | | $n_{absolut}$ | $n_{einfach}$ | $n_{Unterkategorie}$ | $n_{ein-Wort}$ | $n_{ausformuliert}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| L1 | vor | 4 | 4 | 0 | 3 | 1 |
| | nach | 7 | 6 | 1 | 3 | 4 |
| L2 | vor | 9 | 9 | 0 | 5 | 4 |
| | nach | 7 | 7 | 0 | 3 | 4 |
| L3 | vor | 9 | 9 | 0 | 4 | 5 |
| | nach | 11 | 11 | 0 | 6 | 5 |
| L4 | vor | 11 | 11 | 0 | 7 | 4 |
| | nach | 10 | 10 | 0 | 3 | 7 |
| L5 | vor | 7 | 7 | 0 | 3 | 4 |
| | nach | 9 | 9 | 0 | 4 | 5 |
| L6 | vor | 5 | 5 | 0 | 2 | 3 |
| | nach | 6 | 6 | 0 | 1 | 5 |
| L7 | vor | 4 | 4 | 0 | 3 | 1 |
| | nach | 9 | 9 | 0 | 5 | 4 |
| L8 | vor | 4 | 4 | 0 | 2 | 2 |
| | nach | 9 | 9 | 0 | 6 | 3 |
| L9 | vor | 10 | 10 | 0 | 6 | 4 |
| | nach | 11 | 7 | 4 | 2 | 9 |
| **L10** | vor | 3 | | | 2 | 1 |
| | nach | 5 | | | 3 | 2 |
| **L11** | vor | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 |
| | nach | 8 | 8 | 0 | 5 | 3 |
| **L12** | vor | 6 | 6 | 0 | 2 | 4 |
| | nach | 5 | 5 | 0 | 0 | 5 |
| **L13** | vor | 4 | 4 | 0 | 1 | 3 |
| | nach | 8 | 7 | 1 | 1 | 7 |
| **L14** | vor | 1 | 1 | | | |
| | nach | 8 | 5 | 3 | 1 | 7 |
| **L15** | vor | 2 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| | nach | 4 | 4 | 0 | 1 | 3 |

Tabelle 7.11: Quantitative Erfassung der vor und nach dem Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen.

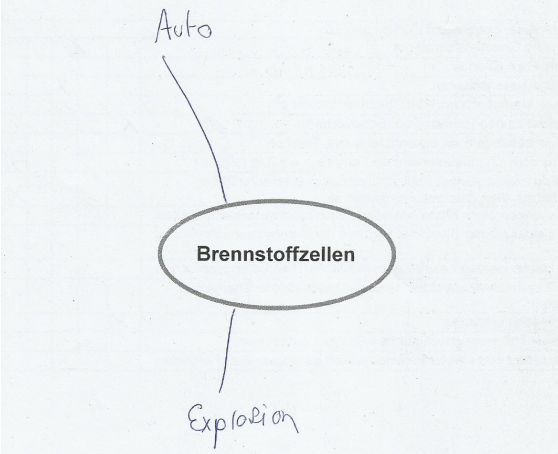
So L14 fügte in die Mindmap im Rahmen der Vorerhebung als einzigen Kommentar ein, dass er alles zu dem Thema Brennstoffzellen bereits vergessen habe (siehe Abbildung 7.12 (a)). Die Mindmaps der Nacherhebung weisen beinahe doppelt so viele Begriffe auf wie die der Vorerhebung, sie sind also an qualitativen Kriterien gemessen komplexer (Tab. 7.11). Zudem sind sie auch qualitativ anders gelagert. Während ein Blick auf die Mindmaps der Vorerhebung einige Begriffe offenbarte, die nicht unmittelbar im Zusammenhang mit Brennstoffzellen stehen, verlagerte sich der Fokus der Begriffe in den Mindmaps der Nacherhebung näher an das Thema. Diese Entwicklung zeigt sich beispielsweise an den Mindmaps der Lernenden L14 und L15 (Abb. 7.12). In beiden Fällen nimmt die Anzahl der eingetragenen Begriffe und auch die inhaltliche Nähe zum Thema Brennstoffzellen zu, sodass hier Inferenzen und Elaborationen semantischer Netzwerke angedeutet werden.



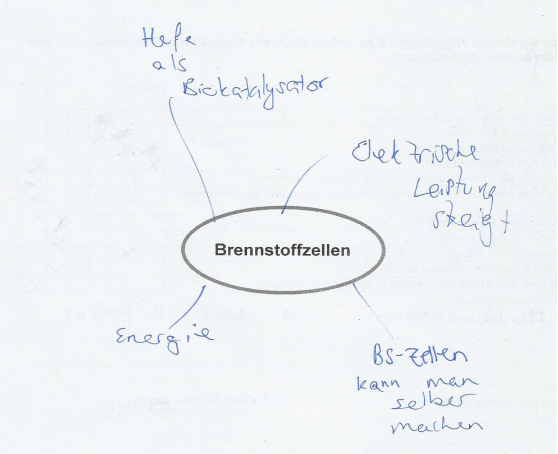

(a) L14: vor dem Kurs angefertigte Mindmap




(b) L14: nach dem Kurs angefertigte Mindmap




(c) L15: vor dem Kurs angefertigte Mindmap




(d) L15 nach dem Kurs angefertigte Mindmap

Abbildung 7.12: Mindmaps der Vor- und Nacherhebung von L14 (a,b) L15 (c,d).

Die Komplexität und inhaltliche Nähe zum zentralen Begriff Brennstoffzellen variiert zwischen den Mindmaps der Lernenden stark. Die in den Mindmaps der Vorerhebung von allen Lernenden (n = 15) aufgeführten Begriffe wurden anhand von Schlagworten in Word-Clouds aufgegriffen. In der Vorerhebung finden sich neben themenfremden Ausdrücken und globalem Wissen einige Fachbegriffe, die dem Inhaltsfeld Elektrochemie zugeordnet werden können (Abb. 7.13): Der prominenteste Begriff ist „Batterie“, wobei zusätzlich verschiedene Batterietypen in den Mindmaps angeordnet wurden. Darüber hinaus finden sich Ausdrücke zur Beschreibung elektrochemischer Systeme, wie etwa „Kathode“, „Anode“, „Reduktion“ und „Oxidation“. Es fällt auf, dass neben Wasserstoff kein weiterer Brennstoff benannt wurde.




Abbildung 7.13: Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen (Sek. II): Begriffe der vor dem Kurs angefertigten Mindmaps.

In der Nacherhebung ist das prominenteste Schlagwort „Biokatalysator Hefe“, was einen direkten Bezug zum inhaltlichen Schwerpunkt des Kurses hat (siehe Abb. 7.14). Neben weiteren Begriffen zum Kursinhalt (Hefe, Zucker, Strom aus Zucker) haben Hinweise auf weitere Brennstoffzelltypen und Anwendungsbereiche Einzug gehalten. Dass in der Vorerhebung angeführte Begriffe erneut in die Mindmaps integriert wurden und insgesamt die Anzahl an Begrifflichkeiten in den Mindmaps der Nacherhebung etwa doppelt so hoch war, kann ein Indiz für eine Elaboration der semantischen Netzwerke sein.




Abbildung 7.14: Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen (Sek. I): Begriffe der nach dem Kurs angefertigten Mindmaps.

***Feedback durch die Lernenden***

Die Mehrheit stimmte der Aussage eher zu, in dem Kurs viel dazugelernt zu haben. Über 70 % stimmten der Aussage voll umfänglich zu, bei den Experimenten Spaß gehabt zu haben. Der Lernertrag anhand der Experimente wurde sehr unterschiedlich von den Lernenden empfunden. 74 % der Befragten gaben an, auch nach dem Exkurs eher noch mal in das E-Book zu schauen zu wollen. Sechs Lernende nutzen die Gelegenheit, freie Anmerkungen zu äußern. Sie waren durchweg positiv und bezogen sich sowohl auf empfundenen Lernzuwachs, sowie die gewählten Experimente und die Aufbereitung im E-Book. Neben der Struktur des E-Books wurden einzelne Elemente, etwa die Quizze oder die zur Unterstützung der Versuchsdurchführung eingebetteten Fotodokumentationen, gelobt (vgl. Abb. 7.15).

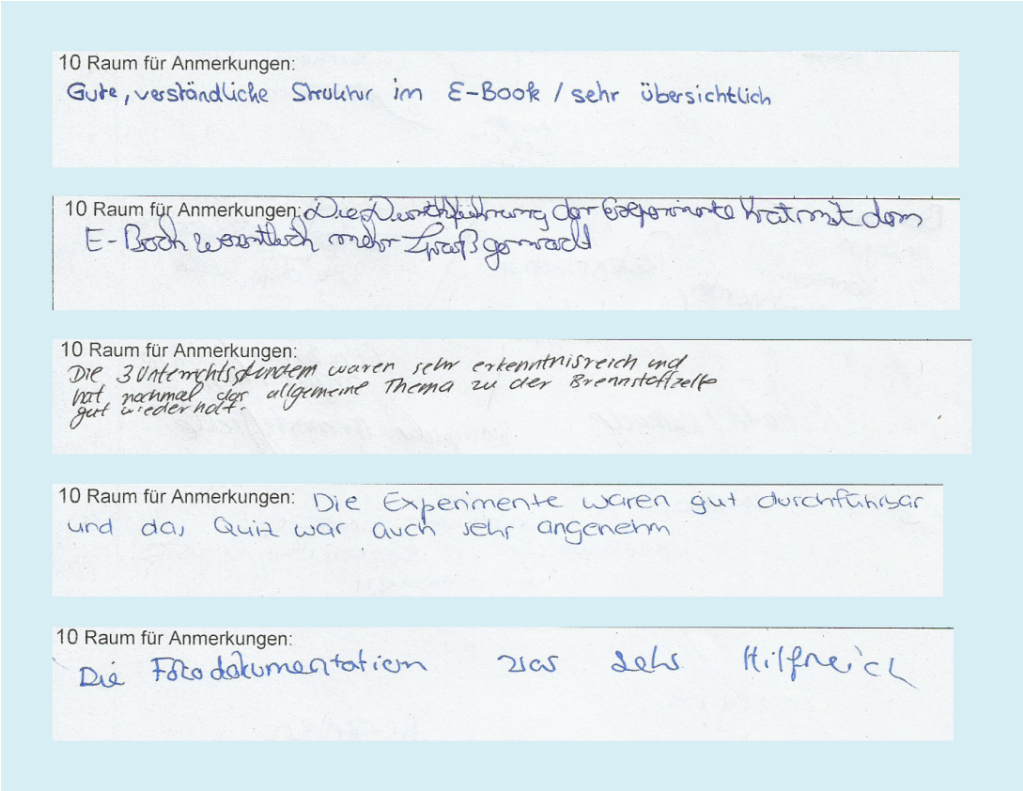



Abbildung 7.15: Zusammenstellung einiger Anmerkungen zum *Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen.*

### 7.5.4. Schlussbemerkungen zu den Exkursen zu biologischen Brennstoffzellen

In einem ersten Schritt zur Implementierung wurden die skizzierten Unterrichtseinheiten mit Lernenden der Sekundarstufe I und II abseits vom regulären Unterrichtsgeschehen erprobt. Anhand des Abgleichs der in der Vor- und Nacherhebung angefertigten Mindmaps wird in beiden Fällen deutlich, dass das Wissensspektrum (zumindest für den Moment) erweitert werden konnte. Das Feedback der Lernenden war überwiegend sehr positiv. Dies ist insbesondere unter dem Aspekt erstaunlich, da sich das Fach Chemie im besuchten Kurs der Sekundarstufe II recht wenig Beliebtheit erfreute. Die freiwilligen Anmerkungen der Lernenden aus der Sekundarstufe II heben insbesondere die Eignung und Strukturierung des E-Books sowie die Experimente hervor.

Eine weitere Erprobung der Unterrichtssequenzen in Kooperation mit Partnerschulen im Regelunterricht ist in Planung. Im Sinne einer iterativen Verbesserung würde der Exkurs für die Sekundarstufe I in mehrere Untereinheiten an verschiedenen Tagen platziert werden, um der Rückmeldung der Lehrkraft zu begegnen. Diese hatte vermerkt, dass die Konzentration der Lernenden mit dem Verlauf des Projekttages abgenommen hatte - was durchaus nachvollziehbar ist, bedenkt man auch die weitere Anreise.
Eine weitere Erprobung des Exkurses für Lernende der Sekundarstufe II war bereits vereinbart, musste jedoch aufgrund der Corona-Krise entfallen.

Da einige Anknüpfungspunkte des Thema *Mikrobielle Brennstoffzellen* an den Regelunterricht der Sekundarstufe II im Fach Chemie gegeben sind, können je nach zeitlichen Kapazitäten die E-Books unterschiedlich intensiv genutzt werden. Beispielsweise kann die Unterrichtssequenz durch ein verbindliches Thematisieren der als Zusatz eingebundenen Videos zur mikrobiellen Brennstoffzelle in der Forschung ausgeweitet werden.

## 7.6. Lehrkräftefortbildung

Aus der eingangs in Abschnitt 1.1.2 vorgestellten Befragung aktiver Chemie-Lehrkräfte ging ein Bedarf an Materialien zu verschiedenen Brennstoffzelltypen hervor. Neben dem Wunsch nach Versuchsdurchführungen wurde dort auch die Bereitschaft, an Lehrkräftefortbildungen zu partizipieren, geäußert.[12] Daher wurde eine umfangreiche Fortbildung *Von alkalischen über alkoholische zu mikrobiellen Brennstoffzellen: Lowcost Experimente für den Einsatz im Chemieunterricht* für Chemielehrkräfte der Sekundarstufe II konzipiert.
Die Lehrkräftefortbildung wurde bislang zweimal durchgeführt, einmal im Rahmen der Fachgruppentagung Chemieunterricht der GDCh in den Räumen der RWTH Aachen und einmal als von der Didaktik der Chemie der Universität Wuppertal ausgeschriebenes Angebot (Tab. 7.12). In beiden Fällen stand ein Zeitraum von 180 Minuten zur Verfügung.

| **Datum** | **Veranstaltungsort** | **Anlass** | **n(Teilnehmer)** |
|---|---|---|---|
| 18.09.2019 | RWTH Aachen | Tagung FGCU GDCh | 9 |
| 26.11.2019 | Universität Wuppertal | Angebot Chemiedidaktik | 5 |

Tabelle 7.12: Rahmendaten zu durchgeführten Lehrkräftefortbildungen.

Eine dritte Erprobung war für den MNU Bundeskongress im April 2020 angemeldet und genehmigt, kam aufgrund der Corona-Krise jedoch nicht zustande. Aus selbigem Grund konnten bislang keine weiteren Termine gefunden werden.

### 7.6.1. Ziele und Verlauf der Fortbildung

Das Ziel der Fortbildung ist es, Lehrkräfte in geschütztem Raum bei der Durchführung von lowcost Versuchen mit geringem Gefährdungspotential zu verschiedenen Brennstoffzellsystemen zu unterstützen und sie mit begleitenden Materialien auszustatten, sodass eine Implementation der Inhalte in den regulären Chemieunterricht erleichtert wird[20]. Fortbildungen gelten generell als geeignetes Instrument, Innovationen in Unterricht zu implementieren.[210] Bei der Konzeption wurden Aspekte zur Erhöhung der Wirksamkeit von Fortbildungen als Teil des Professionalisierungsprozesses beachtet: So wurde eine inhaltliche Fokussierung (auf Brennstoffzellen) und

[20] Ein Poster zur Fortbildung findet sich auf der Homepage der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal [183].

eine Verschränkung von Input-Phasen mit Erprobungsphasen vorgenommen.[210] Dazu erfolgt zunächst ein kurzer inhaltlicher Auftakt im Plenum, in dem auf die Bedeutung von Brennstoffzellen in der angestrebten Energiewende und das allgemeine Funktionsprinzip beleuchtet wird. Der anschließende Hauptteil besteht aus dem selbstständigen Experimentieren der teilnehmenden Lehrkräfte. Die Teilnehmenden entscheiden dabei selbst, welchen Lernschritt sie als nächstes gehen möchten, zum Beispiels ins Skript einlesen, den Versuch gründlich auswerten oder direkt den nächsten Versuch auswerten. Dieses Vorgehen vermittelt Wertschätzung und öffnet Erwachsene für den Lernprozess.[190] Eine Schlussrunde zur Besprechung der Experimente und offener Fragen rundet den Präsenzteil der Fortbildung ab.

Die Wiederholung oder Aufarbeitung fachlicher Inhalte wird durch das umfangreiche Skript in die Eigenverantwortlichkeit der Lehrkraft verlegt.

### 7.6.2. Materialien und Experimente

Da aufgrund organisatorischer Begebenheiten vor der Erprobung des Konzepts keine geeignete Software zum Erstellen eines E-Books bereitstand, wurden zunächst analoge Materialien erstellt. Jeder Teilnehmende erhielt ein Skript, das während der Fortbildung genutzt und anschließend mitgenommen werden konnte. Darüber hinaus lagen an jeder Versuchsstation laminierte Fotodokumentationen zur Nutzung vor Ort aus. Alle Materialien stehen zusätzlich kostenlos auf der Homepage der Didaktik der Chemie der Bergischen Universität Wuppertal zum Download bereit.
Im Fokus des Präsenzteils der Fortbildung steht die Durchführung der Experimente:

- Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle
- Modellversuch zu Brennstoffzellen mit Alltagschemikalien
- Modellversuch zur Direkt-Alkoholischen Brennstoffzelle
- Redox-Aktivität von Bäckerhefe
- Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau
- Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau
- Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase

### 7.6.3. Evaluation der Erprobungen

Aufgrund der geringen Stichprobengröße sind die Einschätzungen der Teilnehmenden beider durchgeführten Erprobungen im Folgenden zusammengefasst dargestellt. Sofern Anmerkungen zur Verbesserung gegeben worden, wird Bezug auf die im Sinne der iterativen Optimierung durchgeführten Maßnahmen genommen. Eine weitere Veranschaulichung der erhobenen Daten befindet sich im Anhang in Abschnitt F.5.

#### 7.6.3.1. Charakterisierung der Stichprobe

Die Fortbildung wurde von insgesamt 14 Lehrkräften durchlaufen. Ein Drittel der Teilnehmenden war weiblich, zwei Drittel männlich. Mit Ausnahme einer Gesamtschullehrkraft unterrichteten sie an Gymnasien.
Die Alterspanne der Teilnehmenden reichte von 32 bis 72 Jahren, wobei die Teilnehmenden im Durchschnitt 50 Jahre alt waren (Abb. 7.16). Eine Lehrkraft merkte an, bereits in Pension zu sein. So divers das Alter der Lehrkräfte war, war auch die Lehrerfahrung: Sie reichte von einem bis 44 Jahren und betrug im Durchschnitt 16 Jahre. Über 57 % der Lehrkräfte verfügte über eine Berufserfahrung von mindestens 10 Jahren. Aufgrund dieser zumeist langjährigen Berufserfahrung der Teilnehmenden wird angenommen, dass fundierte Einschätzungen in die Evaluation der Lehrkräftefortbildung eingeflossen sind.

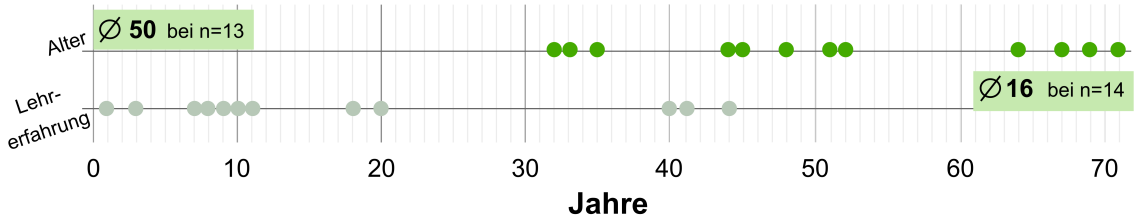



Abbildung 7.16: Verteilung des Alters und der Lehrerfahrung der Teilnehmenden.

Alle Lehrkräfte unterrichteten das Fach Chemie sowie mindestens ein weiteres Fach. 36 % der Lehrkräfte unterrichten zudem Mathe, was somit das am häufigsten mit Chemie kombinierte Fach dieser Stichprobe war. Mit abnehmender Anzahl wurde zudem Biologie und Physik ergänzend unterrichtet, die Fächer NwT[21], Englisch, Erdkunde und Sport jeweils in einem Fall.

[21] Die Abkürzung NwT steht für *Naturwissenschaft und Technik*. Sie bezeichnet ein fachübergreifendes Profilfach in Baden-Württemberg.

#### 7.6.3.2. Eindrücke von den Experimenten

Um den Umfang der Fragebogenerhebung in guter Relation zur Dauer der Fortbildung anzuordnen, wurden die Lehrkräfte nicht zu jedem Versuch befragt. Die Versuche wurden analog zur Anordnung im Skript gemäß der zugrundeliegenden Brennstoffzelltypen in alkalischen, alkoholischen, mikrobiellen und enzymatischen Brennstoffzelle geclustert.
Zu den Modellversuchen zur alkalischen Brennstoffzelle äußerten sich zwei Lehrkräfte nicht, weil sie diese in der Kürze der Zeit die Versuche nicht durchgeführt hatten. Die Hälfte der Lehrkräfte (abzüglich der Enthaltungen 58 %) gaben an, dass die Experimente selbstständig durchgeführt werden können. Die klare Beobachtung sowie der Erkenntnisgewinn wurden sehr ähnlich gewertet. Insgesamt war der Eindruck der Lehrkräfte von den Versuchen zur alkalischen Brennstoffzelle somit eher positiv. Eine Lehrkraft gab zu bedenken, dass die genutzten Verbraucher (Propeller) schwer zu besorgen seien. Ihr wurde via E-Mail Auskunft über die Bezugsquellen der Didaktik der Chemie gegeben.
Die Eindrücke zum Versuch zur alkoholischen Brennstoffzelle sind sehr durchwachsen, was wohl darauf zurückzuführen ist, dass der Aufbau an beiden Fortbildungstagen nicht die erwarteten Ergebnisse zeigte - wie sich auch in der ersten der beiden freien Anmerkungen widerspiegelte. In einer weiteren freien Anmerkung wurden die Bedenken geäußert, dass die (platinierten) Rasierscherfolien schwer zu besorgen seien. Diese sind gebraucht jedoch kostenfrei bei Rasierfachgeschäften erhältlich, sodass man gewissermaßen Upcycling betreibt.
Die Eindrücke zu dem Versuch zur Redox-Aktivität von Hefe, der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei- und Ein-Topfaufbau als die zu mikrobiellen Brennstoffzellen zusammengefasst (Tab. F.45). Diese waren durchweg positiv. Die Mehrheit der Lehrkräfte attestierte eine sehr gute Durchführbarkeit, klare Beobachtung und Erkenntnisgewinn. Dieses Bild verstärkt sich insbesondere, wenn die drei fehlenden Angaben verrechnet werden. Demnach würden neun von elf Befragten der Durchführbarkeit die höchste Merkmalsausprägung zuweisen, was 92 % entspräche. Die wertschätzende Anmerkung, es handele sich um einen schönen Versuch, kann aufgrund der Erhebungsmethode keinem Versuch konkret zugeordnet werden.
Die Mehrheit der Befragten stimmte bei der Beurteilung des Versuchs zur enzymatischen Brennstoffzelle dem Item *eher zu*, dass der Versuch selbstständig durchgeführt werden kann, und, attestiert dem Versuch eine klare Beobachtung. Die Einschätzungen, ob aus dem Experiment eine klare Erkenntnis gewonnen werden kann, variiert. Während die Hälfte der Lehrkräfte dieser Aussage absolut zustimmt, wurden auch gegenteilige Eindrücke beziehungsweise eine Enthaltung geäußert.

Zum Vergleich der Versuchscluster sind in Abbildung 7.17 die Verteilungen der maximalen Zustimmung (6) zu den Items der Versuche angeordnet. Dabei wird deutlich, dass die Versuche zur mikrobiellen Brennstoffzellen in allen drei Items am besten bewertet wurden. Hinsichtlich der Durchführbarkeit schließt sich der Versuch zu enzymatischen Brennstoffzellen an. Das Item zur klaren Beobachtung wurde weniger häufig maximal angegeben, als bei den alkalischen Brennstoffzellen. Dem Item zur resultierenden Erkenntnis ist bei den Versuchen zur alkalischen und enzymatischen Brennstoffzelle gleich häufig eine maximale Ausprägung zugeordnet worden. Dem Modellversuch zur alkoholischen Brennstoffzelle wurden in allen Items mit geringster Häufigkeit die Maximalausprägungen zugewiesen.

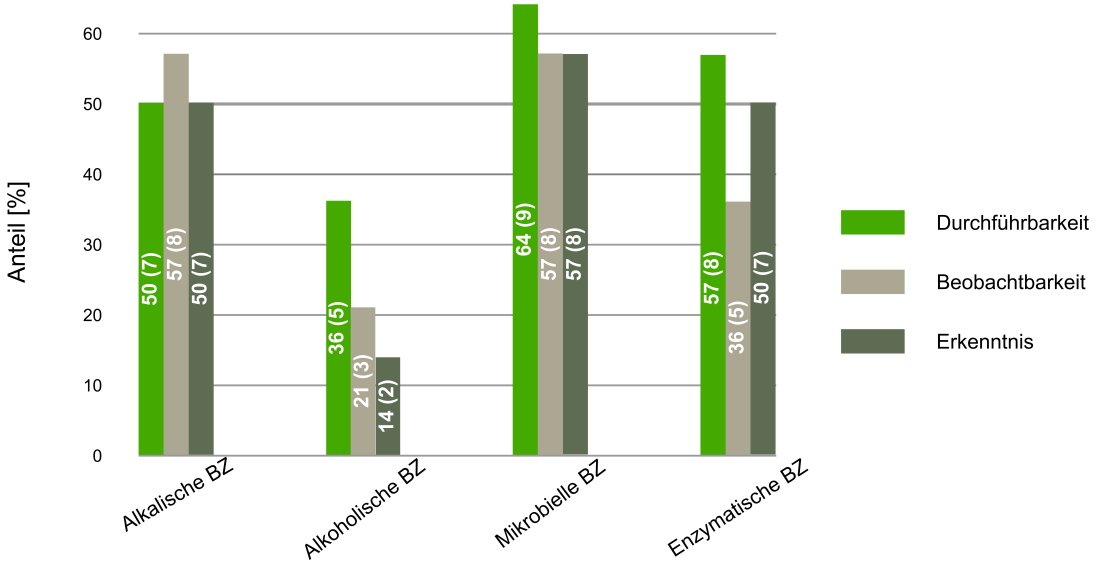



Abbildung 7.17: Verteilung der höchsten Merkmalsausprägung *sehr gut* zum Eindruck von den Experimenten.

Einige Lehrkräfte gaben zudem freie Anmerkungen zur Verbesserung des Versuchs zur enzymatischen Brennstoffzellen (Tab. 7.13).

Gemäß Anmerkungen (2.) und (3.) in Tabelle 7.13 wurde im Nachgang der ersten Erprobung der Lehrkräftefortbildung die Fotodokumentation so überarbeitet, dass nicht mehr zeitgleich die Herstellung dreier Brennstoffzellenstapel, sondern nur eines Stapels abgebildet war. Bei der zweiten Erprobung wurden dahingehend keine Anmerkungen gegeben, sodass nun die Durchführung klarer beschrieben zu seien scheint. In einer weiteren Anmerkung (4.) wurde der Hinweis gegeben, dass ein Messwerterfassungssystem zur Diagrammerstellung ergänzbar sei. In der Fortbildung wurde mit Digitalmultimetern gearbeitet, wie sie bislang eher im schulischen Kontext verfügbar sind. Zudem ließen sie sich leichter zum Veranstaltungsort in Aachen transportieren.

| Wie war Ihr Eindruck von dem Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle? |
|---|
| Freie Anmerkungen:<br>(1.) auch ein sehr schöner Versuch<br>(2.) Anleitung mit mehr Bildern wäre übersichtlicher<br>(3.) Die Versuchsanleitung sollte überarbeitet werden (für eine BZ)<br>(4.) um Messwerterfassungssystem zur Diagrammerstellung<br>im Unterricht ergänzbar |

Tabelle 7.13: Anmerkungen der Lehrkräfte zum Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle.

Sofern Messwerterfassungssysteme verfügbar sind, können diese natürlich optional im Unterricht für diesen und die übrigen Versuche eingebunden werden.

#### 7.6.3.3. Eindrücke vom Material

Es wird deutlich, dass sowohl die Meinungen zur übersichtlichen Gestaltung als auch zum verständlichen Aufbau des Materials stark divergieren. Obwohl eigenen Beobachtungen zufolge kaum ein Blick in das Skript und die eingebundenen Informationstexte wenig gelesen wurde, gaben mit Ausnahme zweier Enthaltungen alle Lehrkräfte eine Einschätzung zu diesen Texten an. Diese wurden verhalten positiv bewertet. Auch die Items zur Einschätzung der Wirksamkeit des Materials für Lernende wurden sehr unterschiedlich angewählt. Womöglich trägt auch hier der Effekt, dass neben der eigenen Durchführung wenig Zeit blieb, sich in das Skript einzulesen. Einige Lehrkräfte gaben freie Anmerkungen. Aufgrund der Anmerkung (1.) wurde

| Wie war Ihr Eindruck von den Materialien zur Fortbildung? |
|---|
| Freie Anmerkungen:<br>(1.) manchmal etwas umständlich geschrieben<br>(2.) Heft ja, laminierte Informationen nicht immer<br>(3.) Versuchsanleitungen als interaktives Video mit H5P erstellen optional<br>zur Fotodokumentation |

Tabelle 7.14: Anmerkungen der Lehrkräfte zu den Materialien zur Fortbildung.

die Materialien kritisch geprüft und versucht, sprachliche Klarheit und Einfachheit zu erreichen. Dagegen konnte (2.) nicht in den Optimierungsprozess integriert werden, da der Text der Durchführungen im Skript und in den Fotodokumentationen im Wortlaut identisch ist, weswegen hier die genaue gewünschte Stellschraube unklar blieb. Weiterhin wurde der Hinweis (3.) geäußert, dass die Versuchsdurchführungen als H5P-Video bereit gestellt werden könnten. Bei H5P handelt es sich um Software

mit der interaktive HTML5-basierte Inhalte erstellt werden können, die in verschiedene Wirtsysteme eingebettet werden.[211] Da unklar war, ob diese H5P-Videos im anvisierten E-Book-Format problemlos integrierbar wären, und, an diese Stelle die in H5P möglichen Interaktionen nicht vonnöten waren, wurde die Idee bislang nicht umgesetzt.

#### 7.6.3.4. Persönliches Resultat

In ihrem persönlichen Resultat bewerteten die Lehrkräfte die Fortbildung im Allgemeinen. Die Mehrheit (57 %) entschied sich für *sehr gut*, die übrigen 43 % für *gut* (vgl. Tab. F.48). Der Aussage, dass die Inhalte der Fortbildung für den Chemieunterricht relevant seien, stimmten jeweils 43 % mit der Ausprägung 6 und 5 zu, 14 % mit der Ausprägung 4. Demnach lehnte keiner der Befragten diese Aussage ab. Ein überwiegender Teil (57 %) stimmte dem Item mit voller Ausprägung zu, Experimente des Workshops im eignen Chemieunterricht einzusetzen. Bei Betrachtung der weiteren Verteilung ist hier zu berücksichtigen, dass aufgrund des Alters der Teilnehmenden womöglich mehr als ein Pensionär in der Stichprobe befindlich ist, was sich wiederum hemmend auf das Antwortverhalten bei diesem Item auswirken könnte.
In einem Freitextformat gaben die Lehrkräfte an, welche der Experimente des Workshops sie im Unterricht einsetzen würden. Einige nannten mehrere, sodass sich der in Abbildung 7.18 visualisierte Eindruck ergab. Erfreulicherweise fanden die im Rahmen dieser Arbeit selbst entwickelten Versuche den meisten Anklang: 64 % gaben an, Versuche zur Hefe-Brennstoffzelle einsetzen zu wollen, und, 43 % der Befragten ebenfalls den Versuch zur enzymatischen Brennstoffzelle. Jeweils 21 % der Lehrkräfte würden ebenfalls die Versuche zur alkalischen und alkoholischen Brennstoffzelle einsetzen, obwohl der gelingender Aufbau der alkoholischen Brennstoffzelle sich im Workshop schwierig gestaltete.

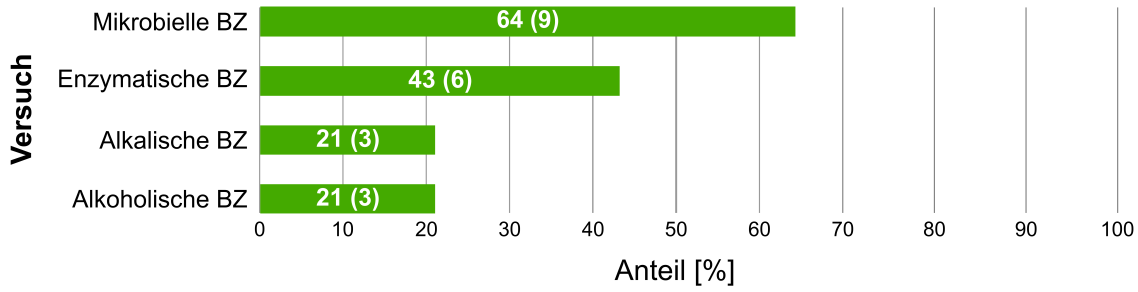



Abbildung 7.18: Einschätzung zur Einbindung der Versuche durch die Lehrkräfte. BZ steht für Brennstoffzelle.

Schlussendlich nutzte eine Lehrkraft den Raum für freie Anmerkungen, um sich für die Fortbildung zu bedanken (vgl. Tab. F.48).

### 7.6.4. Anmerkungen und Ausblick

In den bisherigen Erprobungen wurde überwiegend positives Feedback zur Fortbildung gegeben. Zur weitergehenden Optimierung wird versucht, die Reproduzierbarkeit des Versuchs zur alkoholischen Brennstoffzelle zu steigern. Dies wurde über die Entwicklung der Variante einer DAFC unter Verwendung von Ethanol als Brennstoff und Natron-Lösung als Elektrolyt-Lösung intendiert (Abs. 4.3.6). Eine entsprechende Vorschrift wurde entwickelt, die Erprobung mit Lehrkräften steht noch aus.
Da einige auf das (analoge) Material bezogene Anmerkungen genannt worden sind, ist abzuwarten, ob digitale Begleitmaterialien in Form eines E-Books einen strukturierteren Eindruck auf Lehrkräfte machen. Das E-Book-Format ermöglicht auch die Betrachtung der Bilder der Fotodokumentation im Fullscreen-Modus, sodass womöglich auch die Durchführbarkeit der einzelnen Versuche steigt. Zusätzlich könnten bestehende Videos zu den mikrobiellen Brennstoffzelle eingebunden werden, sodass trotz unterschiedlichster Formate ein Arbeiten ohne Medienbruch möglich wäre.

Die Umsetzung einer Fortbildung mit der in ein E-Book transferierten Materialien steht aufgrund der aktuellen Corona-Krise aus.

# 8. Zusammenfassung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit war es, zu verschiedenen im Schulkontext bislang unterrepräsentierten Brennstoffzellsystemen lowcost Versuche und zugehörige Lernkonzepte für verschiedene Zielgruppen zu entwickeln und zu erproben.

Zur Bewältigung dieser Aufgabenstellung sind Teilziele formuliert worden, die fokussiert worden sind:

1. Aus der Vielzahl existenter Brennstoffzellsysteme sind einige ausgewählt worden, die sowohl in der Technik vertreten beziehungsweise wahrscheinlich von wachsender Bedeutung als auch im medialen Alltag von Lernenden präsent sind und sich zur Experiment-basierten Erschließung im Unterricht eignen. Aufgrund der intendierten Einbettung in den Schulkontext wurden nur Niedertemperatur-Brennstoffzellsysteme einbezogen. Wegen der medialen Präsenz und des hohen Wirkungsgrades fiel die Wahl auf **Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen**, sowohl in der PEMFC- als auch der **AFC**-Variante. Weiterhin wurden **DAFC** aufgrund ihrer bereits bestehenden mobilen Anwendungen und möglicher wachsender Bedeutung inkludiert. Schließlich wurde den **biologischen Brennstoffzelle**n als innovative Systeme eine besondere Beachtung zu teil, da sowohl für **mikrobielle** als auch **enzymatische Brennstoffzellen** derzeit zunehmend Anwendungsbereiche erschlossen werden. Ein signifikanter Vorteil dieser Zelltypen besteht darin, dass diese Systeme komplexe Substrate als Brennstoff nutzen können. Durch das notwendige Zusammenspiel von (Mikro-)Biologie und Chemie bieten sich biologische Brennstoffzellen unmittelbar als Inhalte interdisziplinärer MINT-Lernarrangements an.

2. Zur Realisation von Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoffzellen im PEMFC-Aufbau sind Bausätze genutzt worden, die an dieser Stelle nicht weiter thematisiert werden, da im Schwerpunkt lowcost Schülerversuche benannt und entwickelt werden sollten, wie es auch ein Desiderat der in Kapitel 1.1.2 skizzierten Lehrkräfte-Befragung ist. Zur Umsetzung des Wasserstoff-Sauerstoff-Systems als **AFC** ist daher der Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle nach Tausch u. a. [10] aufgegriffen worden. Der beschriebene Aufbau wurde hinsichtlich eigens

formulierter Kriterien als Geeignetster verifiziert. Da die als Elektrolyt-Lösung genutzte Kalilauge der Konzentration c = 0.1 $\frac{mol}{L}$ jedoch stark alkalisch ist und Scherfolien womöglich nicht immer im Klassensatz verfügbar sind, wurden zusätzlich Modellversuche zur **Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien und -materialien** charakterisiert. Insbesondere bei Lernenden mit weniger laborpraktischer Erfahrung - etwa Lernenden der Primarstufe - bieten sich diese aufgrund des niedrigeren Gefährdungspotentials für den Schülerversuch an. So konnte eine Variante unter Verwendung von Natron-Lösung als Elektrolyt und Bleistiftminen als Elektroden die Bildung von Gasblasen während der Elektrolyse und Rückbildung derer bei Betrieb der Modell-Brennstoffzelle beobachtet und ein Motor für geringere Ströme betrieben werden.
Den Ausgangspunkt zur Wahl eines schulgeeigneten Versuchs zur **DAFC** bildete die Durchführung nach Tausch und Wachtendonk [77]. Das als Brennstoff genutzte Methanol konnte durch Ethanol, die Kalilauge der Konzentration c = 5 $\frac{mol}{L}$ durch Natron-Lösung substituiert werden, wodurch bei gleicher didaktischer Prägnanz des Versuches eine deutlich niedrige Gefährdung besteht: Der positive Effekt des Einleiten von Umgebungsluft auf die Zellspannung ist wiederholt abbildbar.
Mithilfe eines nasschemischen Experiments kann die Redox-Aktivität der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae* und somit die Eignung des Mikroorganismus als Biokatalysator demonstriert werden, sodass dieses Experiment gewissermaßen als Einleitung zu **MFC mit Bäckerhefe** verstanden werden kann. Die Brennstoffzellen unter Verwendung von Bäckerhefe als Biokatalysator wurden in verschiedenen Zellgeometrien realisiert: In der Zwei-Topf-Anordnung wurden ausgehend vom Ansatz nach Silveira u. a. [91] Vereinfachungen getroffen und der Aufbau auf die zur Funktionsweise notwendigen Komponenten reduziert: In Anoden- und Kathodenraum werden Glucose-Lösungen gleicher Konzentration vorlegt, in den Anodenraum zusätzlich Bäckerhefe eingebracht. In die Lösungen ragt jeweils ein Eisen-Nagel als Elektrode, während die als Halbzellenfassungen fungierenden Bechergläser über verdrilltes Toilettenpapier miteinander verbunden sind. Zur Leistungssteigerung wurde dieses reduzierte System in einen Ein-Topf-Aufbau übertragen: Als geeignete Halbzellfassung des Anodenraums wurde eine Eierkarton-Hülse identifiziert. Da in diesem kompakteren Aufbau zwar eine vergleichsweise höhere Spannung und Stromstärke gemessen, aber kein Motor betrieben werden konnte, wurde die Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau mit dem Mikrocontroller *Arduino* gekoppelt, der abhängig von der anliegenden Spannung eine unterschiedliche Anzahl an LEDs einschaltete.

Die Umsetzung der Hefe-Brennstoffzelle in einem kompakten Stapelaufbau brachte keine Leistungssteigerung mit sich, weswegen der Variante keine große Bedeutung zukam.
Neben dem Pilz *Saccharomyces cerevisiae* wurden auch Bakterien als Biokatalysatoren in Brennstoffzellen eingesetzt: Es konnte ein kompakter Stapelaufbau realisiert werden, in dem **Milchsäure-Kulturen** anodenseitig als Katalysator eingesetzt werden.
Als weitere Vertreter von biologischen Brennstoffzellen wurden Versuche zu enzymatischen Brennstoffzellen aufgegriffen: Von Ge u. a. [98] wurde eine **EFC** für didaktische Zwecke unter anodenseitiger Verwendung von **$\beta$-Glucoseoxidase** und kathodenseitigen Einsatzes von **Laccase** vorgeschlagen. Dieses System wurde hinsichtlich der benötigten Komponenten variiert, sodass etwa statt kostenintensiver CNTs Aktivkohle zur Beschichtung der Filterpapier-Elektroden genutzt wird. Zusätzlich wurde die zur Präparation der Elektroden benötigte Zeit von mindestens 40 min auf 10 min reduziert, sodass eine Durchführung des Versuchs in schulrealen Zeiträumen wahrscheinlicher ist.
Da der skizzierte Aufbau in Variation nach Ge u. a. [98] aufgrund der benötigten Enzyme kostenintensiv bleibt, wurde ein Stapelaufbau mit des in Drogerien erhältlichen Enzyms Lactase entwickelt. Anhand der **EFC mit Lactase** kann die Funktionsweise im Schulkontext qualitativ nachvollzogen werden, wenngleich die fachlichen Hintergründe nicht vollständig bekannt sind.
Bei allen Versuchen ist zu berücksichtigen, dass die Nutzung von Alltagsprodukten zwar einen Alltagsbezug schafft und meist die Materialkosten erheblich senkt, es sich jedoch zum Teil um Gemische handelt, die Qualitätsschwankungen unterliegen oder deren Zusammensetzung nicht immer exakt deklariert ist. Daher ist die Interpretation von Versuchen unter Einsatz von Alltagsprodukten nicht immer vollständig möglich.

3. Die (weiter-)entwickelten Experimente wurden didaktisch aufbereitet und in verschiedene Lernarrangements und entsprechende Materialien integriert, die zum Teil BNE-konform sind: Sowohl für Lernende der Sekundarstufe I als auch II wurde ***Brennstoffzellen weitergedacht!*** konzipiert. In diesem fünf mal zwei Zeitstunden umfassenden Lernarrangement werden Brennstoffzellen aus den Blickwinkeln verschiedener MINT-Disziplinen betrachtet, um die Interdisziplinarität aktueller Forschung am Beispiel zu verdeutlichen. Neben einer Chemie-Perspektive wird darin auch eine Biologie-, Physik- und Informatik-Perspektive eingenommen - einzig von der Mathematik wurde aus organisatorischen Gründen abgesehen.

Im Rahmen des Konzeptes ***Alleskönner Brennstoffzellen?!*** für die Sekundarstufe I und II wurden selbige Versuche und ähnliche Fachinhalte integriert, sodass insgesamt eine klassische Perspektive der Chemie auf Brennstoffzellen in ganz verschiedenen Anwendungsbereichen resultierte. Aus organisatorischen Gründen wurde das Format von sechs mal anderthalb Stunden eingehalten.
Zudem wurden Lernkonzepte mit dem Fokus auf biologischen Brennstoffzellen erstellt: Da für den ***Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen*** für die Sekundarstufe I vier Zeitstunden zur Verfügung standen, ist neben mikrobiellen Brennstoffzellen auch die Erschließung enzymatischer Brennstoffzellen in Theorie und experimenteller Praxis vorgesehen worden. Das entsprechende Konzept für die Sekundarstufe II erstreckt sich aus organisatorischen Gründen auf drei Schulstunden, sodass die Inhalte gestrafft und auf die Thematisierung der mikrobiellen Brennstoffzellen am Beispiel der Hefe-Brennstoffzelle reduziert wurden.

4. Es wurde eine ***Lehrkräftefortbildung zum Thema Brennstoffzellen*** gestaltet. Diese ist so angelegt, dass nach kompakter theoretischer Einführung in der Präsenzphase die praktische Erprobung von lowcost Versuchen im Vordergrund steht. Anhand der Begleitmaterialien können die Lehrkräfte auch im Anschluss an die Fortbildung Fachinhalte nachvollziehen. Auf diese Weise wird erstmals eine Implementation der verschiedenen Brennstoffzelltypen und entsprechend innovativen Versuche durch die Lehrkräfte als Multiplikator in den Regelunterricht ermöglicht.

5. Zu den zuvor aufgeführten Lernarrangements sind sowohl digitale als auch analoge Formate zur Begleitung der Lernprozesse gestaltet worden, die jeweils differenziert an die Zielgruppe angepasst worden sind. Neben den **analogen Skripten** beziehungsweise den **E-Books** als digitale Skripte sind **13 Videos** entstanden. Im Schwerpunkt beschäftigen sich die Videos mit mikrobiellen Brennstoffzellen: Ein vertont sowie tonlos konzipiertes Video ebnet über ein Kurzportrait mikrobieller Brennstoffzellen den Einstieg in die Thematik. Unter Anleitung der Autorin erstellte Fabian Krämer drei Videos zur Versuchsdurchführung der Hefe-Brennstoffzellen. In Kooperation mit Forscherinnen der Universität Hohenheim sind zudem videographische Beiträge zu aktueller Forschung an mikrobiellen Brennstoffzellen, ein Einblick in praktische Forschung vor sowie die individuellen Werdegänge in deutscher und englischer Sprache entstanden. Die Realsequenzen sind dabei um Schemata, Beschriftungen und Definitionen ergänzt worden, um Lernenden der Sekundarstufe II einen Zugang zu ermöglichen. Die in Kooperation entstandenen Filme verdeutlichen die Inter-

disziplinarität naturwissenschaftlicher Forschung und explizit die Beiträge zu den Werdegängen können die Berufsorientierung von Lernenden unterstützen.

6. Im Rahmen der organisatorischen Möglichkeiten sind die vormals aufgeführten Konzepte und Materialien erprobt und anhand der Rückmeldung der Teilnehmenden iterativ optimiert worden: Aufgrund des Ortswechsels von Tübingen nach Wuppertal während der Promotion stand der MINT-Klassenraum nicht für Erprobungen zur Verfügung. In Wuppertal konnten die Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!* und *Alleskönner Brennstoffzellen?!* am außerschulischen Lernort Junior Uni situiert werden, sodass beide jeweils für die Zielgruppe der Sekundarstufe I erprobt worden sind. Die Exkurse zu biologischen Brennstoffzellen sind sowohl mit einer Gruppe Lernenden der Sekundarstufe I als auch der Sekundarstufe II einmal durchgeführt und evaluiert worden. Die Lehrkräfte-Fortbildung wurde zweimal durchgeführt, sodass eine Multiplikator-Funktion der teilnehmenden Lehrkräfte initiiert werden konnte.

   Die weitere Erprobung und damit verbundene iterative Optimierung der vorgestellten Lernarrangements verschiedenster Zielgruppen pausiert(e) aufgrund der Corona-Pandemie.

In der vorliegenden Arbeit ist es somit gelungen, einen Beitrag zur Implementation verschiedener Brennstoffzellsysteme mit Fokus auf biologischen Brennstoffzellen als inhaltliche Innovation des MINT-Unterrichts zu leisten.

# 9. Literatur


[1] BP, BP Statistical Review of World Energy, London, **2019**.

[2] BP, BP Statistical Review of World Energy, London, **2020**.

[3] V. Quaschning, *Erneuerbare Energien und Klimaschutz: Hintergründe – Techniken und Planung – Ökonomie und Ökologie – Energiewende*, 4. Aufl., Hanser, München, **2018**.

[4] UN General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: A/RES/70/1, **21 October 2015**.

[5] Engagement Global gGmbH, **2019**, `https://17ziele.de/downloads.html`.

[6] Die Bundesregierung, Hrsg., Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Neuauflage 2016, Berlin, **2016**, `www.deutsche-nachhaltigkeitsstrategie.de`.

[7] Nationale Plattform Bildung für nachhaltige Entwicklung, BNE: Nationaler Aktionsplan Bildung für nachhaltige Entwicklung: Der deutsche Beitrag zum UNESCO-Weltaktionsprogramm, Berlin, **2017**.

[8] H. Seybold, A. Beule, „Nachhaltigkeit lehren: Kompetenzaufbau bei Lehrenden und Multiplikatoren“, *Pädagogik* **2015**, 28–32.

[9] C. Nerdel, *Grundlagen der Naturwissenschaftsdidaktik: Kompetenzorientiert und aufgabenbasiert für Schule und Hochschule*, **2017**.

[10] M. W. Tausch, C. Bohrmann, M. Seesing, „Eine no-cost Brennstoffzelle“, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2002**, *51*, 43–44.

[11] T. Witteck, B. Most, D.-S. Di Fuccia, I. Eilks, „Mit unvollständigen Versuchsprotokollen lernen.“, *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* **2012**, *23*, 54–59.

[12] R. Grandrath, C. Bohrmann-Linde, „Fuel cells in the chemistry classroom – a brief survey among German chemistry teachers“, *ARiSE* **2020**, *1*, 13–16.

[13] P. Kurzweil, O. Schmid, *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung*, 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, **2016**.

[14] M. Pehnt, *Energierevolution Brennstoffzelle? Perspektiven, Fakten, Anwendungen*, WILEY-VCH, Weinheim, **2002**.

[15] C. H. Hamann, W. Vielstich, *Elektrochemie*, 4., WILEY-VCH, Weinheim, **2005**.

[16] R. Pohl, A. Antognini, F. Nez, F. D. Amaro, F. Biraben, J. M. R. Cardoso, D. S. Covita, A. Dax, S. Dhawan, L. M. P. Fernandes, A. Giesen, T. Graf, T. W. Hänsch, P. Indelicato, L. Julien, C.-Y. Kao, P. Knowles, E.-O. Le Bigot, Y.-W. Liu, J. A. M. Lopes, L. Ludhova, C. M. B. Monteiro, F. Mulhauser, T. Nebel, P. Rabinowitz, J. M. F. Dos Santos, L. A. Schaller, K. Schuhmann, C. Schwob, D. Taqqu, J. F. C. A. Veloso, F. Kottmann, „The size of the proton“, *Nature* **2010**, *466*, 213–216.

[17] R. Holze, „Polymerelektrolyt: RD-16-06371 (2012)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-16-06371`.

[18] M. Klell, H. Eichlseder, A. Trattner, *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung*, 4., aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, **2018**, `http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20447-1`.

[19] T. Badenhop, „Brennstoffzellen in der Hausenergieversorgung“ in *Wasserstoff und Brennstoffzelle*, (Hrsg.: J. Töpler, J. Lehmann), Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, **2014**, S. 133–146.

[20] L. M. Uhlig, *Charakterisierung von Elektrokatalysatoren für den Einsatz in alkalischen Brennstoffzellen - Dissertation*, Oldenburg, **2018**.

[21] N. Ramaswamy, S. Mukerjee, „Fundamental Mechanistic Understanding of Electrocatalysis of Oxygen Reduction on Pt and Non-Pt Surfaces: Acid versus Alkaline Media“, *Advances in Physical Chemistry* **2011**, 1–17.

[22] S. Karamanolis, *Brennstoffzellen: Schlüsselelemente der Wasserstofftechnologie*, 1. Aufl., Vogel, Würzburg, **2003**.

[23] T. Jurzinsky, *Untersuchungen an Anodenmaterialien für die Alkalische Direkt Methanol Brennstoffzelle - Dissertation*, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, **2017**.

[24] M. Bertau, K. Räuchle, H. Offermanns, „Methanol - die Basischemikalie“, *Chemie in unserer Zeit* **2015**, *49*, 312–329.

[25] B. Janzing, „Vielfalt im Tank: WISSEN_Bioenergie“, *Neue Energie : das Magazin für Klimaschutz und erneuerbare Energien* **2017**, *27*, 34.

[26] S. Gilman, „The Mechanism of Electrochemical Oxidation of Carbon Monoxide and Methanol on Platinum. II. The Reactant-Pair Mechanism for Electrochemical Oxidation of Carbon Monoxide and Methanol“, *The Journal of Physical Chemistry* **1964**, *68*, 70–80.

[27] A. B. Delpeuch, T. Asset, M. Chatenet, C. Cremers, „Electrooxidation of Ethanol at Room Temperature on Carbon-Supported Pt and Rh-Containing Catalysts: A DEMS Study“, *Journal of The Electrochemical Society* **2014**, *161*, F918–F924.

[28] M. Ahmed, I. Dincer, „A review on methanol crossover in direct methanol fuel cells: Challenges and achievements“, *International Journal of Energy Research* **2011**, *35*, 1213–1228.

[29] O. P. Sahu, S. Basu, „Direct Alcohol Alkaline Fuel Cell as Future Prospectus“, *Advanced Energy: An International Journal (AEIJ)* **2014**, *1*, 43–52.

[30] F. Davis, S. P. J. Higson, „Biofuel cells - recent advances and applications“, *Biosensors & bioelectronics* **2007**, *22*, 1224–1235.

[31] J. M. Berg, J. L. Tymoczko, G. J. Gatto jr., L. Stryer, *Stryer Biochemie*, 8. Auflage, Springer Spektrum, Berlin, **2018**, `http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-54620-8`.

[32] H. Cypionka, *Grundlagen der Mikrobiologie*, 4. Aufl., Springer, Berlin und Heidelberg, **2010**.

[33] U. Schröder, „Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency“, *Physical Chemistry Chemical Physics* **2007**, 2619–2629.

[34] M. C. Potter, „Electrical Effects Accompanying the Decomposition of Organic Compounds“, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **1911**, *84*, 260–276.

[35] U. Schröder, F. Harnisch, „Eine Technologie im Aufbruch: Mikrobielle Brennstoffzellen und ihr Weg in die Anwendung“, *LABORPRAXIS* **2011**, 20–22.

[36] S. Geitmann, „Mikrobielle Brennstoffzellen haben Potential: Entwicklung schreitet langsam voran.“, *HZwei. Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen* **2018**, 40–41.

[37] M. Agler-Rosenbaum, U. Schröder, F. Harnisch, „Mikroben unter Strom: Von der Abwassertechnologie zur Bioelektrotechnologie“, *Biologie in unserer Zeit* **2013**, *43*, 96–103.

[38] V. Chabert, L. Babel, M. P. Feg, M. Karamash, E. S. Madivoli, N. Herault, J. M. Dantas, C. A. Salgueiro, B. Giese, K. M. Fromm, „Kinetik und Mechanismus der mineralischen Atmung: Eisen-Häme synchronisieren die Geschwindigkeit des Elektronentransfers“, *Angewandte Chemie* **2020**, 12430–12435.

[39] B. Huang, S. Gao, Z. Xu, H. He, X. Pan, „The Functional Mechanisms and Application of Electron Shuttles in Extracellular Electron Transfer“, *Current microbiology* **2018**, 99–106.

[40] S. Beblawy, T. Bursac, C. Paquete, R. Louro, T. A. Clarke, J. Gescher, „Extracellular reduction of solid electron acceptors by Shewanella oneidensis“, *Molecular microbiology* **2018**, *109*, 571–583.

[41] S. Babanova, Y. Hubenova, M. Mitov, „Influence of artificial mediators on yeast-based fuel cell performance“, *Journal of bioscience and bioengineering* **2011**, *112*, 379–387.

[42] P. Kaiser, S. Reich, D. Leykam, M. Willert-Porada, A. Greiner, R. Freitag, „Electrogenic single-species biocomposites as anodes for microbial fuel cells“, *Macromolecular Bioscience* **2017**, 1–10.

[43] R. Kumar, L. Singh, A. W. Zularisam, F. I. Hai, „Microbial fuel cell is emerging as a versatile technology: A review on its possible applications, challenges and strategies to improve the performances“, *International Journal of Energy Research* **2018**, *42*, 369–394.

[44] K. Rabaey, N. Boon, S. D. Siciliano, M. Verhaege, W. Verstraete, „Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer“, *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* **2004**, *70*, 5373–5382.

[45] J. J. Fornero, M. Rosenbaum, L. T. Angenent, „Electric Power Generation from Municipal, Food, and Animal Wastewaters Using Microbial Fuel Cells: Review“, *Electroanalysis* **2010**, *22*, 832–843.

[46] H. Hiegemann, M. Lübken, P. Schulte, K.-G. Schmelz, „Hochskalierung mikrobieller Brennstoffzellen: Aktivkohle als Alternative zum hochpreisigen Platin“, **2016**.

[47] L. F. M. Rosa, C. Koch, B. Korth, F. Harnisch, „Electron harvest and treatment of amendment free municipal wastewater using microbial anodes: A case study“, *Journal of power sources* **2017**, 319–323.

[48] Z. Wang, X. Mei, J. Ma, Z. Wu, „Recent Advances in Microbial Fuel Cells Integrated with Sludge Treatment“, *Chemical Engeneering & Technology* **2012**, *35*, 1733–1743.

[49] C. Zhong, B. Zhang, L. Kong, A. Xue, J. Ni, „Electricity generation from molasses wastewater by an anaerobic baffled stacking microbial fuel cell“, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* **2011**, 406–413.

[50] K. Ganesh, J. R. Jambeck, „Treatment of landfill leachate using microbial fuel cells: Alternative anodes and semi-continuous operation“, *Bioresource Technology* **2013**, 383–387.

[51] Y. Jiang, A. C. Ulrich, Y. Liu, „Coupling bioelectricity generation and oil sands tailings treatment using microbial fuel cells“, *Bioresource Technology* **2013**, 349–354.

[52] W. Ding, S. Cheng, L. Yu, H. Huang, „Effective swine wastewater treatment by combining microbial fuel cells with flocculation“, *Chemosphere* **2017**, 567–573.

[53] S. Wilkinson, „Gastrobots - Benefits and Challenges of Microbial Fuel Cells in FoodPowered Robot Applications“, *Autonomous Robots* **2000**, 99–111.

[54] C. Santoro, C. Arbizzani, B. Erable, I. Ieropoulos, „Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review“, *Journal of power sources* **2017**, 225–244.

[55] J. Choulera, G. A. Padgetta, P. J. Cameronc, K. Preussd, M.-M. Titiricid, I. Ieropoulos, M. Di Lorenzoa, „Towards effective small scale microbial fuel cells for energy generation from urine“, *Electrochimica Acta* **2016**, 89–98.

[56] X. A. Walter, A. Stinchcombe, J. Greenman, I. Ieropoulos, „Urine transduction to usable energy: A modular MFC approach for smartphone and remote system charging“, *Applied Energy* **2017**, 575–581.

[57] J. R. Trapero, L. Horcajada, J. J. Linares, J. Lobato, „Is microbial fuel cell technology ready? An economic answer towards industrial commercialization“, *Applied Energy* **2017**, 698–707.

[58] T. Tommasi, G. Lombardelli, „Energy sustainability of Microbial Fuel Cell (MFC): A case study“, *Journal of power sources* **2017**, 438–447.

[59] R. L. Heydorn, C. Engel, R. Krull, K. Dohnt, „Strategien zur gezielten Verbesserung des anodenseitigen Elektronentransfers in mikrobiellen Brennstoffzellen“, *Chemie Ingenieur Technik* **2019**, *91*, 744–757.

[60] A. T. Yahiro, S. M. Lee, D. O. Kimble, „Bioelectrochemistry: I. ENZYME UTILIZING BIO-FUEL CELL STUDIES“, *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Specialized Section on Biophysical Subjects* **1964**, *88*, 375–383.

[61] M. Rasmussen, S. Abdellaoui, S. D. Minteer, „Enzymatic biofuel cells: 30 years of critical advancements“, *Biosensors & bioelectronics* **2016**, *76*, 91–102.

[62] M. Falk, Z. Blum, S. Shleev, „Direct electron transfer based enzymatic fuel cells“, *Electrochimica Acta* **2012**, 191–202.

[63] R. D. Milton, S. D. Minteer, „Direct enzymatic bioelectrocatalysis: differentiating between myth and reality“, *J. R. Soc. Interface* **2017**, 1–13.

[64] E. Katz, I. Willner, A. B. Kotlyar, „A non-compartmentalized glucose $|O2biofuelcellbybioengine$ *Journal of Electroanalytical Chemistry* **1999**, 64–68.

[65] A. R. Pereira, G. Sedenho, J. C. de Souza, F. Crespilho, „Advances in enzyme bioelectrochemistry“, *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **2018**, *90*, 825–857.

[66] C. Fischer, A. Fraiwan, S. Choi, „A 3D paper-based enzymatic fuel cell for self-powered, low-cost glucose monitoring“, *Biosensors & bioelectronics* **2016**, *79*, 193–197.

[67] G. Slaughter, T. Kulkarni, „A self-powered glucose biosensing system“, *Biosensors & bioelectronics* **2016**, *78*, 45–50.

[68] N. Mano, F. Mao, A. Heller, „Characteristics of a miniature compartment-less glucose-oxygen biofuel cell and its operation in a living plant“, *JACS Journal of American Chemical Society* **2003**, 6588–6594.

[69] S. Cosnier, A. Le Goff, M. Holzinger, „Towards glucose biofuel cells implanted in human body for powering artificial organs: Review“, *Electrochemistry Communications* **2014**, 19–23.

[70] R. D. Milton, F. Giroud, A. E. Thumser, S. D. Minteer, R. C. T. Slade, „Hydrogen peroxide produced by glucose oxidase affects the performance of laccase cathodes in glucose oxygen fuel cells: FAD-dependent glucose dehydrogenase as a replacement“, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2013**, 19371–19379.

[71] C. Bohrmann, M. Tausch, „Das leuchtende Scherblatt: Elektrochemolumineszenz mit unbedenklichen Chemikalien“, *Chemie in unserer Zeit* **2002**, *36*, 164–167.

[72] H. Zeilinger, Das neue Warenkundehandbuch: Wie funktioniert das?, (Hrsg.: Faber-Castell Vertrieb GmbH), Stein, **2020**, `https://www.faber-castell.de/service/warenkundehandbuch`.

[73] H. P. Latscha, U. Kazmaier, H. A. Klein, *Organische Chemie: Chemie-Basiswissen II*, 6. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, **2008**.

[74] J. Seibel, B. Fugmann, A. Lützen, „Cellulose: RD-03-00833 (2009)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/6M2RL`.

[75] A. F. Holleman, N. Wiberg, *Grundlagen und Hauptgruppenelemente*, De Gruyter, **2017**.

[76] S. Gräber, „Backpulver: RD-02-00047 (2003)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-02-00047`.

[77] *Chemie 2000+: Sekundarstufe II: Gesamtband: Nordrhein-Westfalen*, (Hrsg.: M. Tausch, M. von Wachtendonk), Buchner, Bamberg, **2007**.

[78] H.-J. Belzer, E. Frenzel, L. Hohenberger, R. Kellner, M. Neunzig, A. Piechoki, B. Proll, R. Radtke, U. Ritzmann, Richtlinien zur Sicherheit im Unterricht (RISU-NRW): Empfehlung der Kultusministerkonferenz: Beschluss der KMK vom 09.09.1994 i. d. F. vom 14.06.2019.

[79] A. A. Khuhro, Y. Ali, M. Najam-Uddin, S. Khan, „A Technological, Economical and Efficiency Review of Direct Methanol Fuel Cell“, *iCoMET 2018* **2018**, 1–4.

[80] G. M. Walker, „Yeasts“ in *M. Schaechter (Ed.), Desk encyclopedia of microbiology (2nd ed.). London: Academic Press/Elsevier.* S. 1174–1187.

[81] H. P. Bennetto, „Electricity generation by microorganisms“, *Biotechnology Education* **1990**, *1*, 163–168.

[82] R. Rossi, L. Setti, „Effect of methylene blue on electron mediated microbial fuel cell by Saccharomyces cerevisiae“, *Environmental Engineering and Management Journal* **2016**, *16*, 2011–2018.

[83] S. Wilkinson, J. Klar, S. Applegarth, „Optimizing Biofuel Cell Performance Using a Targeted Mixed Mediator Combination“, *Electroanalysis* **2006**, *18*, 2001–2007.

[84] L. Völker, M. Mösche, Backhefe - natürlich rein, (Hrsg.: Wissensforum Backwaren), Wien, Berlin, **2012**.

[85] Y. Khan, T. Gieger, I. Eilks, „Lebensmittel in den Kühlschrank! Oder: Einfache Experimente zur Reaktionskinetik mit Bäckerhefe“, *MNU-Journal* **2010**, *63*, 89–93.

[86] J. Geiser, P. Carrico, „Saccharomyces cerevisiae“, *Salem Press Encyclopedia of Health* **2019**.

[87] H. Wenck, K. Höner, *Katalyse - Biokatalyse: Konzept, Experiment, Anwendung*, Aulis-Verlag Deubner, Köln, **2001**.

[88] C. Bohrmann, *Photoelektrochemie und Elektrolumineszenz: Experimentelle und multimediale Erschließung eines neuen Themengebietes für die Lehre - Dissertation*, Duisburg-Essen, **2003**.

[89] D. Zeller, *Didaktische Erschließung von Titandioxid für den Chemieunterricht - Entwicklung und Optimierung von Experimenten, didaktischen Konzepten und Medien - Dissertation*, Wuppertal, **2019**.

[90] M. U. Heffen, *Photoredoxsysteme zur Konversion und chemischen Speicherung von Solarenergie - Dissertation*, Wuppertal, **2017**.

[91] G. Silveira, M. Ikegaki, J. M. Schneedorf, „A low-cost yeast-based biofuel cell: An educational green approach“, *Green Chemistry Letters and Reviews* **2017**, *10*, 32–41.

[92] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen: Chemie, Düsseldorf, **2013**, `https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/151/KLP_GOSt_Chemie.pdf`.

[93] Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, Hrsg., Stoffliste zur DGUV Regel 113-018, Berlin, **2020**, `https://degintu.dguv.de/`.

[94] B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, K. Rabaey, „Microbial fuel cells: methodology and technology“, *Environmental Science & Technology* **2006**, *40*, 5181–5192.

[95] E. T. Sayed, T. Tsujiguchi, N. Nakagawa, „Catalytic activity of baker's yeast in a mediatorless microbial fuel cell“, *Bioelectrochemistry (Amsterdam Netherlands)* **2012**, *86*, 97–101.

[96] J. Almer, T. Gerl, „Die mikrobiologische Hefebrennstoffzelle als Schülerübung“, *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* **2014**, *64*, 47–49.

[97] B. O. Horváth, D. N. Sárdy, N. Kellner, I. Magyar, „Effects of High Sugar Content on Fermentation Dynamics and Some Metabolites of Wine-Related Yeast Species Saccharomyces cerevisiae, S. uvarum and Starmerella bacillaris“, *Food Technology & Biotechnology* **2020**, *58*, 76–83.

[98] J. Ge, R. Schirhagl, R. N. Zare, „Glucose-Driven Fuel Cell Constructed from Enzymes and Filter Paper“, *Journal of Chemical Education* **2011**, *88*, 1283–1286.

[99] S. Lange, M. Gänzle, „Milchsäurebakterien: RD-13-02412 (2006)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/AYX5E`.

[100] M. A. Mehaia, M. Cheryan, „Membrane Bioreactors: A New Approach to Fermentation of Agricultural And Food Processing Wastes“ in *Perspectives in biotechnology and applied microbiology*, (Hrsg.: D. I. Alani, M. Moo-Young), Elsevier Applied Science Publishers, London, New York, **1986**, S. 287–294.

[101] I. González-Rodríguez, P. Gaspar, B. Sánchez, M. Gueimonde, A. Margolles, A. R. Neves, „Catabolism of glucose and lactose in Bifidobacterium animalis subsp. lactis, studied by 13C Nuclear Magnetic Resonance“, *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* **2013**, *79*, 7628–7638.

[102] H.-D. Barke, G. Harsch, A. Marohn, S. Krees, *Chemiedidaktik kompakt*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, **2015**.

[103] D. Böttcher, „Laccasen: RD-12-00041 (2008)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/PKT7Y`.

[104] O. Morozova, G. P. Shumakovich, M. A. Gorbacheva, S. V. Shleev, A. I. Yaropolov, „Blue Laccases“, *Biochemistry (Moscow)* **2007**, *72*, 1136–1150.

[105] M. Holzinger, A. Le Goff, S. Cosnier, „Carbon nanotube enzyme biofuel cells“, *Electrochimica Acta* **2012**, 179–190.

[106] G. R. Palmore, H. Bertschy, S. H. Bergens, G. M. Whitesides, „A methanol dioxygen biofuel cell that uses NAD-dependent dehydrogenases as catalysts: Application of an electro-enzymatic method to regenerate nicotinamide adenine dinucleotide at low overpotentials“, *Journal of Electroanalytical Chemistry* **1998**, *443*, 155–161.

[107] C. Lang, J. Hartmann-Schreiner, „beta-Galactosidase: RD-07-00060 (2009)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/HP1B1`.

[108] C. Porciúncula González, C. Giacomini, G. Irazoqui, „Survey of ß-Galactosidases properties: applications to transglycosylation process“ in *Beta-galactosidase*, (Hrsg.: E. Kras), Cell biology research progress, Nova Science Publishers, New York, **2019**, S. 65–116.

[109] J.-L. Bresson, A. Flynn, M. Heinonen, H. Korhonen, M. Løvik, A. Martin, H. Przyrembel, S. Salminen, S. Strain, I. Tetens, H. van den Berg, H. van Loveren, H. Verhagen, M. Gueimonde, B. Moseley, S. Strobel, H. Szajewska, „Scientific Opinion on the substantiation of health claims related to lactase enzyme and breaking down lactose (ID 1697, 1818) pursuant to Article 13(1) of Regulation (EC) No 1924/2006: EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA)“, *EFSA Journal* **2009**, *7*, 1–13.

[110] G. Rehner, H. Daniel, *Biochemie der Ernährung*, 3. Aufl., Spektrum akademischer Verlag, Heidelberg, **2010**.

[111] S. K. Sharma, N. Sehgal, A. Kumar, „Lactase from Clarias Gariepinus and its Application in Development of Lactose Sensor“, *Sensors & Transducers Journal* **2007**, *8*, 1458–1469.

[112] D. M. Sedzro, S. F. Bellah, H. Akbar, S. Billah, „Structure, Function, Application and Modification Strategy of ß –Galactosidase“, *Journal of Multidisciplinary Research and Reviews* **2018**, *1*, 10–16.

[113] D. H. Juers, T. D. Heightman, A. Vasella, J. D. McCarter, O. L. Mackenzie, S. G. Withers, B. W. Matthews, „A Structural View of the Action of Escherichia coli (lacZ) ß-Galactosidase“, *Biochemistry* **2001**, *40*, 14781–14794.

[114] M. L. Sinnott, „Catalytic Mechanisms of Enzymic Glycosyl Transfer“, *Chemical Reviews* **1990**, *90*, 1171–1202.

[115] A. Warmerdam, *Synthesis of galacto-oligosaccharides with ß-galactosidases - Dissertation*, **2013**.

[116] M. Simovic, A. Milivojevic, M. Corovic, K. Banjanac, D. Bezbradica, „Whey valorization using transgalactosylation activity of immobilized b-galactosidase“, *International Journal of Food Science and Technology* **2019**, 3074–3082.

[117] D. E. Koshland, „Stereochemistry and the mechanism of the enzymatic reactions“, *Biological Review* **1953**.

[118] M. A. Glomb, „Kohlenhydrate“ in *Moderne Lebensmittelchemie*, (Hrsg.: M. Fischer, M. A. Glomb), Behr´s Verlag, Hamburg, **2015**, S. 133–198.

[119] K.-D. Kulbe, „Enzymtechnologie und nachwachsende Rohstoffe: Biotechnik“, *Nachr. Chem. Tech. Lab.* **1988**, *36*, 612–624.

[120] N. Welsch, „Phenolrot: RD-16-01599 (2006)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/FTCSH`.

[121] N. Welsch, „Neutralrot: RD-14-00976“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/NYMTL`.

[122] N. Welsch, M. Neupert, „Methylenblau: RD-13-01867 (2014)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/lexicon/RD-13-01867`.

[123] E. J. Guy, E. W. Bingham, „Properties of ß-Galactosidase of Saccharomyces lactis in Milk and Milk Products“, *Journal of Dairy Science* **1978**, *61*, 147–151.

[124] Römpp-Redaktion, „Geschirrspülmittel: RD-07-00865 (2005)“ in *Römpp [Online]*, (Hrsg.: F. Böckler, B. Dill, U. Dingerdissen, G. Eisenbrand, F. Faupel, B. Fugmann, T. Gamse, R. Matissek, G. Pohnert, G. Sprenger), Georg Thieme Verlag, Stuttgart, `https://roempp.thieme.de/8XRAZ`.

[125] H.-D. Belitz, W. Grosch, P. Schieberle, *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*, 6. Aufl., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, **2008**.

[126] A. Kropp, *Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung: Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, **2019**.

[127] I. Pufé, *Nachhaltigkeit*, 3. Aufl., UVK Verlagsgesellschaft mbH mit UVK/Lucius, Konstanz und München, **2017**.

[128] G. de Haan, „Gestaltungskompetenz als Kompetenzkonzept für Bildung für nachhaltige Entwicklung“ in *Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung*, (Hrsg.: I. Bormann, G. de Haan), **2008**.

[129] United Nations, Declaration of the United Nations Conference on the Human Environment, (Hrsg.: United Nations Environment Programme), Stockholm, **1972**.

[130] Vereinte Nationen, Hrsg., Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen: UNFCCC, Rio.

[131] Vereinte Nationen, Agenda 21: Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung: Rio de Janeiro, Juni 1992, **1992**.

[132] Sekretariat der Klimarahmenkonvention mit Unterstützung des deutschen Bundesumweltministeriums, Hrsg., Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, Bonn, **1997**.

[133] Vereinte Nationen, Hrsg., Bericht des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung: Johannesburg (Südafrika), 26. August - 4. September 2002: A/CONF.199/20, **2002**.

[134] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Leitlinie für Bildung nachhaltige Entwicklung: Schule in NRW Nr.: 9052, Düsseldorf, **2019**, `https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Schulsystem/Unterricht/BNE/Kontext/Leitlinie_BNE.pdf`.

[135] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg., Mit MINT in die Zukunft! Der MINT-Aktionsplan des BMBF. Berlin, **2019**, `https://www.bmbf.de/pub/MINT_Aktionsplan.pdf`.

[136] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg., Perspektive MINT: Wegweiser für MINT-Förderung und Karrieren in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik, Berlin, **2012**.

[137] Gokus, Susanne, *MINT Nachwuchsbarometer 2017. Fokusthema: Bildung in der digitalen Transformation.* München und Hamburg, **2017**.

[138] T. Seidel, S. Reinhold, D. Holzberger, S. Y. Mok, A. Schiepe-Tiska, K. Reiss, *Wie gelingen MINT-Schulen? Anregungen aus Forschung und Praxis.* Waxmann, Münster und New York, **2016**, `https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-pedocs-151194`.

[139] Homepage der MINT Schulen NRW, `https://bwnrw.de/schulewirtschaft/aktivitaeten/MINT/excellenz-netzwerke-nrw/mint-schule-nrw`.

[140] Homepage des MINT EC Netzwerkes: Das nationale Excellence-Schulnutzwerk, https://www.mint-ec.de/.

[141] H. Itzek-Greulich, S. Schwarzer in Implementation fachdidaktischer Innovation im Spiegel von Forschung und Praxis, (Hrsg.: GDCP), **2016**, S. 512–515.

[142] A. Zendler, „Unterrichtsmethoden: Steckbriefe, 2 Prozessmodelle und Beispiele“ in *Unterrichtsmethoden für MINT-Fächer*, (Hrsg.: A. Zendler), Springer Vieweg, Wiesbaden, **2018**, S. 21–80.

[143] Medienpädagogischer Forschungsverbund Südwest, Hrsg., JIM-Studie 2019: Jugend, Information, Medien: Basisuntersuchungzum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger, Stuttgart, **2019**, https://www.mpfs.de/fileadmin/files/Studien/JIM/2019/JIM_2019.pdf.

[144] Rat für Kulturelle Bildung e. V., Hrsg., Jugend / Youtube / Kulturelle Bildung. Horizont 2019: Studie: Eine repräsentative Umfrage unter 12- bis 19 Jährigen zur Nutzung kultureller Bildungsangebote an digitalen Kulturorten, Essen, **2019**, https://www.rat-kulturelle-bildung.de/fileadmin/user_upload/pdf/Studie_YouTube_Webversion_final.pdf.

[145] U. Schmid, L. Goetz, J. Behrens, Monitor digitale Bildung: Schulen im digitalen Zeitalter, (Hrsg.: Bertelsmann Stiftung), **2017**.

[146] B. Eickelmann, K. Drossel, Schule auf Distanz - Perspektiven und Empfehlungen für den neuen Schulalltag: Eine repräsentative Befragung von Lehrkräften in Deutschland, (Hrsg.: Vodaphone Stiftung Deutschland), **2020**, https://www.vodafone-stiftung.de/schule-auf-distanz/.

[147] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Hrsg., Verwaltungsvereinbarung DigitalPakt Schule 2019 bis 2024, Bonn, **2019**, https://www.bmbf.de/files/VV_DigitalPaktSchule_Web.pdf.

[148] Medienberatung NRW, Hrsg., Medienkompetenzrahmen NRW, Münster und Düsseldorf, **2019**, https://medienkompetenzrahmen.nrw/fileadmin/pdf/LVR_ZMB_MKR_Broschuere.pdf.

[149] D. Hillmayr, F. Reinhold, L. Ziernwald, K. Reiss, *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht der Sekundarstufe: Einsatzmöglichkeiten, Umsetzung und Wirksamkeit*, Waxmann, Münster und New York, **2017**, https://www.waxmann.com/?eID=texte&pdf=3766Volltext.pdf&typ=zusatztext.

[150] Kultusministerkonferenz, Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife: Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 18.06.2020, Bonn, Berlin, **2020**, https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Chemie.pdf.

[151] Ministerium für Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg., Kernlehrplan für die Hauptschule in Nordrhein-Westfalen: Lernbereich Naturwissenschaften Biologie, Chemie, Physik, Düsseldorf, **2011**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/lehrplaene_download/hauptschule/NW_HS_KLP_Endfassung.pdf.

[152] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur - Landesinstitut für Schule, Hrsg., Beispiel für einen schulinternen Lehrplan zum Kernlehrplan für Hauptschulen: Chemie, Soest, **2011**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SI/HS/Nawi/Chemie/HC_HS_Chemie_110928_Downloadfassung.pdf.

[153] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg., Kernlehrplan für die Realschule in Nordrhein-Westfalen: Chemie, Düsseldorf, **2011**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/149/KLP_RS_CH.pdf.

[154] Qualitäts- und UnterstützungsAgentur - Landesinstitut für Schule, Hrsg., Beispiel eines schulinternen Lehrplans für die Realschule im Fach: Chemie, Soest, **2011**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SI/RS/Chemie/SiLP_RS_CH.pdf.

[155] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg., Kernlehrplan für die Gesamtschule – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen: NaturwissenschaftenBiologie, Chemie, Physik, Düsseldorf, **2013**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/130/KLP_GE_NW.pdf.

[156] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Hrsg., Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen: Chemie, Düsseldorf, **2008**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/150/gym8_chemie.pdf.

[157] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin, Rahmenlehrplan für die gymnasiale Oberstufe: Chemie, Berlin, **2006**, https://www.berlin.de/sen/bildung/unterricht/faecher-rahmenlehrplaene/rahmenlehrplaene/.

[158] Ministerium für Bildung, Jugend und Sport Land Brandenburg, Hrsg., Rahmenlehrplan für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe im Land Brandenburg: Chemie, Potsdam, **2018**, https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/gymnasiale_oberstufe/curricula/2018/RLP_GOST_Chemie_BB_2018.pdf.

[159] Bremer Landesinstitut für Schule, Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe - Qualifikationsphase -: Chemie: Die Gymnasiale Oberstufe im Land Bremen, (Hrsg.: Die Senatorin für Bildung und Wissenschaft), Bremen, **2008**, https://www.lis.bremen.de/schulqualitaet/curriculumentwicklung/bildungsplaene/sekundarbereich_ii___allgemeinbildend-16698.

[160] Hessisches Kultusministerium, Lehrplan Chemie: Gymnasialer Bildungsgang Gymnasiale Oberstufe, **2010**, https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/go-chemie.pdf.

[161] Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern, Rahmenplan für die Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe: Chemie, Schwerin, **2019**.

[162] Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung Rheinland-Pfalz, Lehrplan Chemie Sekundarstufe II, Mainz, **1998**, https://lehrplaene.bildung-rp.de/.

[163] Ministerium für Bildung, Familie, Frauen und Kultur Saarland, Gymnasiale Oberstufe Saar (GOS) Lehrplan Chemie, Saarbrücken, **2008**, https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/CH-GOS-Feb2008.pdf.

[164] Schulministerium Nordrhein-Westfalen, https://www.schulministerium.nrw.de/docs/Schulsystem/Medien/Lernmittel/Kontext/Zuordnung/index.html.

[165] *Chemie im Kontext: [Kontexte, Medien, Basiskonzepte]; Sekundarstufe II*, 1. Aufl., [Nachdr.], (Hrsg.: R. Demuth, I. Parchmann, B. Ralle, J. Baur), Cornelsen, Berlin, **2008**.

[166] K. Arnold, Barthel. Helmut, V. Dietrich, A. Eberle, W. Felber, A. Grimmer, A. Grimmer, D. Henning, A. Jenckel, M. Karohs, B. Labahn, E. Ludwig, U. Lüttgens, R. Malz, J. Peters, G. Röbisch, S. Schäfer, B. Teichert, K. Tischendorf, E. Uhlemann, *Chemie Oberstufe: Gesamtband: Allgemeine Chemie, Physikalische Chemie, Organische Chemie*, [Westliche Bundesländer, Neubearb.], 1. Aufl., 1. Dr, Cornelsen, Berlin, **2010**.

[167] *Chemie heute - S II: Gesamtband*, Sekundärbereich II, Druck A, (Hrsg.: W. Asselborn, M. Jäckel, K. T. Risch), Schroedel, Braunschweig, **2013**.

[168] *Chemie heute S II - Nordrhein-Westfalen Qualifikationsphase*, Nordrhein-Westfalen, S II, Dr. A, (Hrsg.: R. Schulte-Coerne), Schroedel, Braunschweig, **2014**.

[169] *Chemie 2000+ Qualifikationsphase: NRW Sek. 2*, (Hrsg.: C. Bohrmann-Linde, S. Kröger, P. Krollmann, M. Tausch, M. von Wachtendonk, S. Krees), Buchner, C. C., Bamberg, **2014**.

[170] P. Gietz, P. Nelle, C. Penz, W. Schierle, M. Sternberg, *Elemente Chemie für die gymnasiale Oberstufe in Nordrhein-Westfalen*, 1. Aufl., Klett, Stuttgart und Leipzig, **2015**.

[171] H. Wenck, K. Kammer, U. Maerz, „Neue Experimente mit Brennstoffzellen“, *Chemie in der Schule* **1995**, 57–61.

[172] J. M. Orth, H. Wenck, „Biochemische Brennstoffzellen im schulchemischen Experiment“, *CHEMKON* **2001**, *8*, 138–142.

[173] H. Huntemann, H. Honkomp, I. Parchmann, W. Jansen, „Die Wasserstoff-Luft-Brennstoffzelle mit Methanolspaltung zur Gewinnung des Wasserstoffs: Der Fahrzeugantrieb der Zukunft?“, *CHEMKON* **2001**, *8*, 15–21.

[174] M. Sina, „Die echte low-cost-Brennstoffzelle: Aufbauten für Schüler*innenexperimente, die fast nichts kosten“, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2003**, *52*, 24–27.

[175] V. U. Hoffmann, „Brennstoffzellen. Schlüsseltechnologie einer nachhaltigen Energiewirtschaft“, *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* **2004**, *15*, 4–9.

[176] J. Kuhn, „Energieversorgung mit Wasserstoff und Brennstoffzellen. Ein projektorientierter Zugang zur nachhaltigen Energieverwendung“, *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule* **2006**, *55*, 20–28.

[177] M. Stöter, J. Freienberg, W. Jansen, „Die Niedertemperatur-Kohlenstoff-Brennstoffzelle“, *CHEMKON* **2008**, *15*, 162–170.

[178] M. Stöter, I. Parchmann, W. Jansen, „Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle“, *CHEMKON* **2009**, *16*, 187–193.

[179] J. Enßle, B. Grau, P. Menzel, „DMFC: Direkt-Methanol-Brennstoffzellen. Ein Vorschlag für Einführung, Experimente und mögliche Reaktionen“, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2013**, *62*, 9–13.

[180] A. Habekost, „Messungen an Brennstoffzellen“, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2013**, *62*, 13–18.

[181] H. Nickel, „Die Brennstoffzelle als Modell. Veranschaulichung der Vorgänge in einer Brennstoffzelle“, *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* **2015**, *26*, 45–46.

[182] B. Sieve, „Mikrobiologische Brennstoffzellen - Strom durch Hefe? Abituraufgabe“, *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* **2015**, *26*, 47–48.

[183] Homepage der Chemiedidaktik der Universität Wuppertal, `https://chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/index.php?id=4859&`.

[184] H.-B. Brosius, A. Haas, F. Koschel, *Methoden der empirischen Kommunikationsforschung: Eine Einführung.* VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, **2012**.

[185] C. Helfferich, „Leitfaden- und Experteninterviews“ in *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*, (Hrsg.: N. Baur, J. Blasius), Springer Fachmedien, Wiesbaden, **2014**, S. 559–574.

[186] F. Krämer, *Konzeption und Gestaltung von Lernvideos zu photogalvanischen Zellen und Hefe-Brennstoffzellen für den Chemieunterrichts*, Tübingen, **2019**.

[187] J. K. Romstadt, J. Martens, N. Fuhrhop, „Warum versteht uns keiner?“, *Nachrichten aus der Chemie* **2019**, 10–12.

[188] T. van Gog, „The Signaling (or Cueing) Principle in Multimedia Learning“ in *The Cambridge handbook of multimedia learning*, (Hrsg.: R. E. Mayer), Cambridge University Press, Cambridge, **2014**, S. 263–275.

[189] P. Ayres, J. Sweller, „The Split-Attention Principle in Multimedia Learning“ in *The Cambridge handbook of multimedia learning*, (Hrsg.: R. E. Mayer), Cambridge University Press, Cambridge, **2014**, S. 206–226.

[190] J. Meyerhoff, C. Brühl, *Fachwissen lebendig vermitteln: Das Methodenhandbuch für Trainer und Dozenten*, 4., überarbeitete Auflage, Springer Gabler, Wiesbaden, **2017**, `http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-09625-0`.

[191] R. E. Mayer, „Cognitive Theorie of Multimedia Learning“ in *The Cambridge handbook of multimedia learning*, (Hrsg.: R. E. Mayer), Cambridge University Press, Cambridge, **2014**, S. 43–71.

[192] *Unterrichtsmethoden für MINT-Fächer: Bausteine für die Verbesserung von Lernwirksamkeit und Unterrichtsqualität*, (Hrsg.: A. Zendler), Springer Vieweg, Wiesbaden, **2018**.

[193] P. A. Kirchner, J. Sweller, R. E. Clark, „Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching“, *Educational Psychologist* **2006**, *41*, 75–86.

[194] J. Wirth, H. Thillmann, J. Künsting, H. E. Fischer, D. Leutner, „Das Schülerexperiment im naturwissenschaftlichen Unterricht. Bedingungen der Lernförderlichkeit einer verbreiteten Lehrmethode aus instruktionspsychologischer Sicht“, *Zeitschrift für Pädagogik* **2008**, *54*, 361–375.

[195] W. Beywl, K. Zierer, „10 Jahre Visible Learning - 10 Jahre Lernen sichtbar machen“, *Pädagogik (Weinheim)* **2018**, *70*, 36–41.

[196] I. Eilks, B. Ralle, „Participatory Action Research within Chemical Education: Ralle, Bernd; Eilks, Ingo (Hrsg.): Research in chemical education - What does this mean?, 2002, Shaker, Aachen, Germany“ in *Ralle, Bernd; Eilks, Ingo (Hrsg.): Research in chemical education - What does this mean?*, S. 87–98.

[197] B. Ralle, D.-S. Di Fuccia, „Aktionsforschung als Teil fachdidaktischer Entwicklungsforschung“ in *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, (Hrsg.: D. Krüger, I. Parchmann, H. Schecker), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, **2014**, S. 43–55.

[198] K. W. Kallus, *Erstellung von Fragebogen*, 2. Aufl., Facultas Verlags- und Buchhandels AG, Wien, **2016**.

[199] M. Hasselhorn, A. Gold, *Pädagogische Psychologie: erfolgreiches Lernen und Lehren*, Kohlhammer, Stuttgart, **2006**.

[200] K. Ingenkamp, U. Lissmann, *Lehrbuch der Pädagogischen Diagnostik*, 6. Aufl., Beltz, Weinheim, **2008**.

[201] J. Dörschelln, *Organische Leuchtdioden – Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht - Dissertation*, Köln, **2018**.

[202] I. Esslinger-Hinz, M. Wigbers, N. Giovannini, J. Hannig, L. Herbert, L. Jäkel, C. Klingmüller, B. Lange, N. Neubrech, E. Schnepf-Rimsa, *Der ausführliche Unterrichtsentwurf*, Beltz, Weinheim und Basel, **2013**.

[203] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium / Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen: Biologie: Heft 4722, Düsseldorf, **2013**, `https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/bi/GOSt_Biologie_Endfassung.pdf`.

[204] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Kernlehrplan für das Gymnasium – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen: Physik: Heft 3411, Düsseldorf, **2008**, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/lehrplaene_download/gymnasium_g8/gym8_physik.pdf.

[205] Homepage der Junior Uni Wuppertal, Wuppertal, https://www.junioruni-wuppertal.de/de/.

[206] M. Lehner, *Didaktische Reduktion*, *Bd. 3715*, 2. Aufl., UTB GmbH, Bern, **2020**.

[207] A. Schächt, *Qualität naturwissenschaftlich-technischer Lernumgebungen für Kinder und Jugendliche: Die außerschulische Lernumgebung Junior Uni im Vergleich zur Schule - Dissertation*, School of Education, Wuppertal, **2017**.

[208] C. Kasemann, „WSW: Die Wasserstoff-Busse kommen“, *Westdeutsche Zeitung* **29.08.2019**, https://www.wz.de/nrw/wuppertal/wsw-die-wasserstoffbusse-kommen_aid-45431519..

[209] R. Grandrath, C. Bohrmann-Linde, „Experimentieren mit interaktiven E-Books zu mikrobiellen Brennstoffzellen: - Lerneinheiten für die Sekundarstufen I und II -“, *MNU-Journal* **2020**.

[210] F. Lipowsky, D. Rzejak, „Was macht Fortbildungen für Lehrkräfte erfolgreich? Ein Update“ in *Nachhaltige Professionalisierung für Lehrerinnen und Lehrer.* (Hrsg.: B. Groot-Wilken, R. Koerber), wbv media, Bielefeld, **2019**, S. 15–56.

[211] Homepage des H5P-Portales, https://h5p.org/.

[212] Ministerium für Jugend, Kultus und Sport Baden-Württemberg, Bildungsplan des Gymnasiums - Chemie, Stuttgart, **2016**, http://www.bildungsplaene-bw.de/site/bildungsplan/get/documents/lsbw/export-pdf/depot-pdf/ALLG/BP2016BW_ALLG_GYM_CH.pdf.

[213] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, Genehmigter Lehrplan - gültig für Jgst. 8 bis 12: Chemie, München, **2010**, http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_26195.html.

[214] Landesinstitut für Lehrerbildung und Schulentwicklung, Bildungsplan gymnasiale Oberstufe: Chemie, (Hrsg.: Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung), Hamburg, **2009**, https://www.hamburg.de/contentblob/1475194/bf7b01c3faaa85e8b71a69480373a142/data/chemie-gyo.pdf.

[215] Niedersächsisches Kultusministerium, Hrsg., Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe das Berufliche Gymnasium das Abendgymnasium das Kolleg: Chemie, Hannover, **2017**, https://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/ch_go_kc_druck_2017.pdf.

[216] Sächsischen Staatsinstitut für Bildung und Schulentwicklung, Lehrplan Gymnasium: Chemie: 2004/2007/2009/2011, (Hrsg.: Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport), Dresden, **2009**, https://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/1395_lp_gy_chemie_2019.pdf?v2.

[217] Ministerium für Bildung Sachsen-Anhalt, Fachlehrplan Gymnasium: Chemie, Magdeburg, **2016**, https://lisa.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MK/LISA/Unterricht/Lehrplaene/Gym/FLP_Gym_Chemie_LTn.pdf.

[218] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Hrsg., Lehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium, Gesamtschule: Chemie, Kiel, **2002**, https://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=119.

[219] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein, Fachanforderungen Chemie: Allgemein bildende Schulen Sekundarstufe I Sekundarstufe II, Kiel, **2019**, https://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=225.

[220] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife: Chemie, Erfurt, **2012**, http://www.schulportal-thueringen.de/media/detail?tspi=2285.

*Die Internetquellen wurden letztmalig am 08.03.2021 aufgerufen und waren somit verfügbar.*

# 10. Abbildungsverzeichnis


1.1. Symbole der 17 Nachhaltigkeitsziele.[5] . . . . . 2
1.2. Beispielhafte Eindrücke vom Wissenstand Studierender zur alkalischen Brennstoffzelle. . . . . 4

2.1. Allgemeiner Aufbau von Brennstoffzellen. . . . . 9
2.2. Schematische Darstellung eines Stacks. Eigene Abbildung angelehnt an Pehnt [14, S. 48]. . . . . 11
2.3. Schematischer Aufbau einer komplexen elektrolytischen Doppelschicht. Eigene Abbildung angelehnt an Hamann und Vielstich [15, S. 124]. . 13

3.1. Schematische Darstellung des Aufbaus einer Nafion®-Membran. Eigene Darstellung, adaptiert nach Holze [17]. . . . . 16
3.2. Wasserstoffoxidation an der Dreiphasengrenze. Eigene Darstellung, adaptiert nach Kurzweil und Schmid [13]. . . . . 18
3.3. Mechanismen der Methanoloxidation im Alkalischen. Adaptiert nach Jurzinsky [23, S. 10]. . . . . 21
3.4. Schematischer Aufbau biologischer Brennstoffzellen. . . . . 24
3.5. Strukturformel von ATP. . . . . 26
3.6. ATP-ADP-Zyklus. Darstellung adaptiert nach Berg u. a. [31]. . . . . 26
3.7. Beispielhafte Kopplung einer Kohlenstoffoxidation mit der ATP-Synthese. . . . . 27
3.8. Oxidierte Form des Elektronencarriers $NAD^+$. . . . . 27
3.9. Schematische Darstellung der Mechanismen extrazellulären Elektronentransportes. Adaptiert nach Schröder [33] und Agler-Rosenbaum u. a. [37]. . . . . 30
3.10. Funktionsschema einer enzymatischen Brennstoffzelle. *Mit * gekennzeichnete Komponenten sind optional.* Eigene Darstellung angelehnt an Rasmussen u. a. [61]. . . . . 34

4.1. Aufbau des Modellversuchs zur alkalischen Brennstoffzelle. . . . . 38
4.2. Spannung bei Betrieb der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Konzentration der Kalilauge. . . . . 39

4.3. Beispielhafte Eindrücke vom Schäumungsverhalten der Kalilauge der Konzentration 1.0 $\frac{mol}{L}$ während der Elektrolyse. . . . . 40
4.4. Makroskopische Ansichten der Adsorption von Gasblasen an Elektrodenoberflächen während der Elektrolyse. . . . . 42
4.5. Mikroskopische Ansichten der Elektrodenoberflächen. . . . . 43
4.6. In Abhängigkeit von Elektrolyt-Konzentration und Elektroden ausgebildete Zellspannung bei Betrieb der Brennstoffzelle. *S. steht für Scherfolien; G. für Graphitstäbe; B. für Bleistiftminen.* . . . . . 43
4.7. Zellspannung des Zwei-Topf-Aufbaus bei Betrieb der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Elektroden. . . . . 45
4.8. Zellspannung bei Betrieb der Modell-Brennstoffzellen mit Kochsalz-Elektrolyt nach 30 s Elektrolyse. . . . . 48
4.9. Zellspannungen bei Betrieb der Modell-Brennstoffzelle mit Kochsalz-Elektrolyt an Bleistiftminen; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse. . . . . 48
4.10. Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Backpulver-Elektrolyt an Scherfolien; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse. . . . . 50
4.11. Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Backpulver-Elektrolyt an Bleistiftminen; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse. . . 51
4.12. Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Natron-Elektrolyt an Scherfolien; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse. . . . . 53
4.13. Zellspannungen der Modell-Brennstoffzelle mit Natron-Elektrolyt an Bleistiftminen; links nach 30 s und rechts nach 60 s Elektrolyse. . . . . 54
4.14. Zellspannungen der Modell-Brennstoffzellen mit Leitungswasser. *S. steht für Scherfolien, B. für Bleistiftminen.* . . . . . 54
4.15. Aufbau des Modellversuchs zur alkoholischen Brennstoffzelle. . . . . 57
4.16. Zellspannungen der DAFC mit den Brennstoffen Methanol beziehungsweise Ethanol. Einleiten von Umgebungsluft grau hinterlegt. . . . . 58
4.17. Zellspannungen der DAFC mit Ethanol in Abhängigkeit von der Elektrolyt-Konzentration. . . . . 60
4.18. Aufsicht auf die durch verschiedene Materialien separierten Halbzellen des DAFC-Modellversuchs nach 300 s Messzeit. Anodenhalbzellen jeweils links. . . . . 61
4.19. Zellspannungen der DAFC mit Ethanol unter Verwendung verschiedener Materialien zur Separation der Halbzellen. . . . . 61
4.20. Zellspannungen der DAFC mit Ethanol als Brennstoff bei $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ bei variierter Luftzufuhr. . . . . 63

4.21. Zellspannungen der DAFC mit Ethanol als Brennstoff bei $c(KOH) = 2\frac{mol}{L}$ mit verschiedenen Platin-Elektroden. . . . . 65
4.22. Zellspannungen der DAFC mit verschiedenen Elektrolyt-Lösungen und gepulster Luftzufuhr. . . . . 66
4.23. Eindrücke vom Aufbau des Modellversuchs zur DAFC. . . . . 67
4.24. Ansichten der Bäckerhefe *Saccharomyces cerevisiae*. . . . . 69
4.25. Schematische Übersicht katabolischer Stoffwechselprozesse. . . . . 70
4.26. Stark reduzierter Überblick über den Citratzyklus. Adaptiert nach Berg u. a. [31]. . . . . 71
4.27. Verlauf der alkoholischen Gärung. . . . . 71
4.28. Zyklischer Elektronentransportmechanismus in mikrobiellen Brennstoffzellen auf Hefe-Basis. *MB für Methylenblau, NR für Neutralrot. Elektron schematisch für beliebige Anzahl an Elektronen.* Eigene Darstellung in Anlehnung an Babanova u. a. [41, S. 385]. . . . . 73
4.29. Struktur der oxidierten und reduzierten Form von Methylenblau. . . . 73
4.30. Struktur der oxidierten und reduzierten Form von Neutralrot. . . . . 74
4.31. Farbverlauf einer mit Methylenblau versetzten Hefe-Glucose-Suspension. T = 23 °C. . . . . 74
4.32. Schaumbildung einer wässrigen Suspension aus Hefe, Methylenblau, Glucose bei einer Temperatur von 30 °C während zweiminütiger Reaktionszeit. . . . . 76
4.33. Eindrücke von der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei-Topf-Anordnung nach Silveira u. a. [91]. . . . . 79
4.34. Im Zusammenhang des Nachbaus der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau nach Silveira u. a. [91] gemessene Spannungen. T = 24 °C. 80
4.35. In Abhängigkeit des Einsatzes exogener Mediatoren gemessene Zellspannungen. T = 22 °C. . . . . 82
4.36. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der eingesetzten Elektrolyt-Brücke. T = 22 °C. . . . . 84
4.37. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der in der Toilettenpapier-Brücke eingesetzten Elektrolyt-Lösung. T = 22 °C. . . . . 85
4.38. Von links nach rechts: Makroskopisches Aussehen der Graphitfolie, des Graphitvlies sowie des Graphitgewebes. . . . . 86
4.39. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Kohlenstoff-Elektroden. *B.: Bleistiftminen verschiedener Längen.* T = 22 °C. . . . . 86

4.40. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Metall-Elektroden. T = 22 °C. . . . . 87
4.41. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Lösung im Kathodenraum. T = 22 °C. . . 89
4.42. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit des Massenanteils Glucose in Lösung. T = 22 °C. . . . . 91
4.43. Veränderung des pH-Wertes in der Anodenhalbzelle der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau. Wachstumsbereich grün, letaler Bereich rot; Zuordnung nach Walker [80, S. 483]. T = 22 °C. . . . . 92
4.44. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit des eingesetzten Substrates. T = 21 °C. . . . . 93
4.45. Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei-Topf-Anordnung zur Messung des Einflusses kontinuierlicher Luftzufuhr. . . . . 94
4.46. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der Luftzufuhr in den Kathodenraum. T = 21 °C. . . . . 95
4.47. Vereinfachter Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle in der Zwei-Topf-Anordnung. 96
4.48. Auswahl verwendeter Halbzellfassungen zur Realisierung der Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung. . . . . 98
4.49. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der Halbzellfassung. T = 22 °C. . . . . 99
4.50. In Anlehnung an Bennetto [81] durchgeführte Spannungsmessung einer Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau, unterteilt nach der im Kathodenraum verwendeten Lösung. T = 23 °C. . . . . 100
4.51. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau in Abhängigkeit des Substrates. T = 21 °C. . . . . 102
4.52. Programm zum Zuschalten der LED in Abhängigkeit der gemessenen Spannung. . . . . 103
4.53. Visualisierung der Spannung in der Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung durch Zuschalten von LED. . . . . 105
4.54. Vereinfachter Aufbau der Hefe-Brennstoffzelle in der Ein-Topf-Anordnung. 106
4.55. Möglicher Kompaktaufbau der Hefe-Brennstoffzelle. . . . . 107
4.56. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-Aufbau in Abhängigkeit der verwendeten Elektroden. T = 21 °C. . . . . 108
4.57. Zellspannung der Hefe-Brennstoffzelle im kompakten Stapel-Aufbau. T = 21 °C. . . . . 109
4.58. Ansichten des Milchsäure-Kulturen-Präparats. . . . . 111
4.59. Stapelaufbau einer mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Bakterien. 113

4.60. Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit des verwendeten Substrats. T = 22 °C. . . . . 114
4.61. Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit der Einwaage des Milchsäure-Kulturen-Präparates. T = 22 °C. . . . . 116
4.62. Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit des verwendeten Tensids. T = 22 °C. . . . . 117
4.63. Stapelaufbau einer mikrobiellen Brennstoffzelle. Links entspricht die Reservoirfläche der Elektrodenfläche, rechts ist diese geringer. . . . . 118
4.64. Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit der Elektrodenfläche. T = 22 °C. . . . . 119
4.65. Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit der Elektrodenbeschichtung. T = 22 °C. . . . . 120
4.66. Mikroskopische Ansicht verschiedener Filterpapierbeschichtungen. . . 121
4.67. Zellspannung der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Kulturen in Abhängigkeit des verwendeten Reservoirs. T = 22 °C. . . . . 122
4.68. Schematischer Aufbau und Funktionsweise der EFC mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase. . . . . 126
4.69. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in den Varianten der langen sowie kurzen Vorbereitung. T = 29 °C. . . . . 129
4.70. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit der Elektroden-Beschichtung. T = 29 °C. 130
4.71. Variation des Materials zur Elektrodenbeschichtung. *AK steht für Aktivkohle.* . . . . 131
4.72. Möglichkeiten des Zusammenbaus der EFC. . . . . 132
4.73. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit des Zusammenbaus. T = 22 °C. . . . . 132
4.74. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit der Auftragszyklen. T = 22 °C. . . . . 133
4.75. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit des Tensids. T = 29 °C. . . . . 134
4.76. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase (und Laccase). T = 29 °C. . . . . 135
4.77. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Glucoseoxidase und Laccase in Abhängigkeit der Elektrodenflächen. T = 22 °C. . . . 136
4.78. Ansichten des für die Messreihen genutzten Lactase-Präparats. . . . . 138

4.79. Strukturen der $\beta$-Galactosidase aus der Hefe *Kluyveromyces lactis*. Entnommen aus Porciúncula González u. a. [108, S. 79]. . . . . 140
4.80. Mechanismus der Hydrolyse von Lactose durch $\beta$-Galactosidase aus der Hefe. Adaptiert nach Porciúncula González u. a. [108, S. 82]. . . . 141
4.81. Strukturen des Phenolrot-Moleküls. . . . . 142
4.82. Nachweis der pH-Aktivität von Lactase-Präparat mit Phenolrot in verschiedenen Stadien. . . . . 143
4.83. *Links:* Test der pH-Aktivität mit zuvor thermisch behandeltem Enzym-Präparat; *rechts:* Nachweis der Redox-Aktivität mit Methylenblau. . . 143
4.84. Absorptionsspektren zum Test der Redox-Aktivität von Lactase-Präparat unter Verwendung von Methylenblau-Indikator. . . . . 145
4.85. Absorptionsspektren zum Test der Redox-Aktivität von reiner Lactase unter Verwendung von Methylenblau-Indikator. . . . . 146
4.86. Variation der Zellfixierung der EFC mit Lactase im Stapelaufbau. . . 147
4.87. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit der Fixierung. T = 20 °C. . . . . 148
4.88. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase unter Verwendung einer Haarklemme in Abhängigkeit der Einwaage. T = 20 °C. 149
4.89. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit der vorausgehenden Behandlung des Enzym-Präparats. T = 20 °C. . . . . 150
4.90. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit des verwendeten Tensids. T = 19 °C. . . . . 151
4.91. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit des verwendeten Wassers. T = 19 °C. . . . . 152
4.92. Ansichten der eingesetzten Graphitflocken. . . . . 152
4.93. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase in Abhängigkeit der verwendeten Elektrodenbeschichtung. *Susp. steht für Suspension.* T = 20 °C. . . . . 153
4.94. Mikroskopische Ansichten der eingesetzten Elektroden (-beschichtungen). 153
4.95. Ansichten der EFC mit Lactase-Präparat im Zwei-Topf-Aufbau. . . . 155
4.96. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase im Zwei-Topf-Aufbau. *Rühren* bezieht sich auf den Anodenraum. T = 22 °C. . 157
4.97. pH-Wert in Lösung während der $\beta$-Galactosidase-Aktivität verschiedener Darreichungsformen. T = 22 °C. . . . . 158
4.98. Vorgehen bei dem Monitoring des kathodenseitigen Sauerstoffgehaltes in der EFC mit Lactase. . . . . 159

4.99. Zellspannung der enzymatischen Brennstoffzelle mit Lactase im Zwei-Topf-Aufbau in Abhängigkeit der Luftzufuhr. T = 20 °C. . . . . 160

5.1. Schnittmengenmodell zur Beschreibung von NE. Eigene Darstellung in Anlehnung an Pufé [127, S. 110] . . . . . 164
5.2. Dimensionen von Nachhaltiger Entwicklung mit ausgewählten Inhaltsaspekten nach Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen [134, S. 18]. Eigene Darstellung. . . . . 166
5.3. Schematischer Vergleich zweier in der Literatur vorgeschlagener Aufbauten der Hefe-Brennstoffzelle. . . . . 178

6.1. Einblicke in das Video Labor-MBZ-dt. . . . . 183
6.2. Einblicke in das Video **MBZ-tonlos** mit Untertiteln. . . . . 185
6.3. Einblicke in das Video VRedox. . . . . 186
6.4. Ausschnitte aus Begleitmaterialien zur Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau für Lernende der Sekundarstufe I. . . . . 188
6.5. Ausschnitte aus Begleitmaterialien zum Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* für Lernende der Sekundarstufe II. . . . . 189
6.6. Ausschnitte aus Begleitmaterialien zur Lehrkräftefortbildung. . . . . 190
6.7. Zuordnung der in den E-Books eingesetzten Icons. . . . . 192
6.8. Einblick in ein PubCoder basiertes E-Book für die Sekundarstufe II. . 193

7.1. Behaltensleistung in Abhängigkeit der Aktionsformen. Eigene Darstellung nach Meyerhoff und Brühl [190]. . . . . 196
7.2. Zyklen partizipativer Aktionsforschung. Eigene Darstellung adaptiert nach Eilks und Ralle [196]. Eigener Wirkungsbereich grün hinterlegt. 197
7.3. Aufbau des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . . . 208
7.4. Aufbau einer Mindmap zu *Brennstoffzellen als MINT-Thema*. . . . . 212
7.5. Word-Cloud der in den Mindmaps nach dem Lernsetting *Brennstoffzellen weitergedacht!* aufgeführten Begriffe. . . . . 219
7.6. Aufbau des Lernarrangements *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . . 225
7.7. Aufbau einer Mindmap zum *Anwendungsspektrum von Brennstoffzellen*. 227
7.8. Mindmaps eines Teilnehmenden des Kurses. . . . . 230
7.9. Word-Clouds zu den Begriffen der Mindmaps des Kurses *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . . 231
7.10. Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen (Sek. I): Begriffe der vor dem Kurs angefertigten Mindmaps. . . . . 241
7.11. Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen (Sek. I): Begriffe der nach dem Kurs angefertigten Mindmaps. . . . . 241

7.12. Mindmaps der Vor- und Nacherhebung von L14 (a,b) L15 (c,d). . . . 248
7.13. Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen (Sek. II): Begriffe der vor dem Kurs angefertigten Mindmaps. . . . . 249
7.14. Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen (Sek. I): Begriffe der nach dem Kurs angefertigten Mindmaps. . . . . 250
7.15. Zusammenstellung einiger Anmerkungen zum *Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen.* . . . . . 251
7.16. Verteilung des Alters und der Lehrerfahrung der Teilnehmenden. . . . 255
7.17. Verteilung der höchsten Merkmalsausprägung *sehr gut* zum Eindruck von den Experimenten. . . . . 257
7.18. Einschätzung zur Einbindung der Versuche durch die Lehrkräfte. BZ steht für Brennstoffzelle. . . . . 259

F.1. Soziodemographie der Teilnehmenden des Schnupperkurses zum Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15 . . . . . 326
F.2. Soziodemographie der Teilnehmenden am Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6 . . . . . 328
F.3. Verteilung der Chemienoten der Kursteilnehmer des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . . . 328
F.4. Soziodemographie der Teilnehmenden am Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. Grüne Balken entsprechen Vor-, graue der Nacherhebung. . . . . 337
F.5. Notenverteilung der Kursteilnehmer Lernarrangements *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . . 338
F.6. Soziodemographie der Teilnehmenden am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I. . . . . 342
F.7. Notenverteilung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. . . . . 342
F.8. Soziodemographie der Teilnehmenden am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II. Grüne Balken entsprechen Vor-, graue der Nacherhebung. . . . . 349
F.9. Notenverteilung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. . . . . 350
F.10. Soziodemographie der teilnehmenden Lehrkräfte. . . . . 354
F.11. Durch die Lehrkräfte unterrichtete Schulfächer. . . . . 354

# 11. Tabellenverzeichnis


1.1. r/p-Ratio verschiedener fossiler Energieträger in Jahren bezogen auf Europa allgemein und speziell auf Deutschland. . . . . 1
1.2. Von den Lehrkräften im Chemieunterricht thematisierte Brennstoffzelltypen. *BZ steht für Brennstoffzelle.* . . . . . 5

3.1. Thermodynamische Daten der Brennstoffe Wasserstoff, Methanol und Ethanol. Daten aus Jurzinsky [23, S. 4] entnommen. . . . . 23
3.2. Auswahl in MFC eingesetzter exogener Redox-Mediatoren. . . . . 32

4.1. Überspannungen zur Abscheidung von Wasserstoff und Sauerstoff an Platin und Graphit bei einer Stromdichte von 1 $\frac{mA}{cm^2}$ in alkalischem Medium, * in saurem Medium. Daten aus Hamann und Vielstich [15, S. 430, 431] entnommen. . . . . 41
4.2. Widerstände der Backpulver-Suspensionen verschiedener Einwaagen. Abstand der Messfühler 1.5 cm. . . . . 51
4.3. Kennwerte der Natron-Lösungen verschiedener Einwaagen. . . . . 52
4.4. Spannungsdifferenzen bei Einleiten von Umgebungsluft. . . . . 57
4.5. pH-Werte der eingesetzten Konzentrationen an Kalilauge. . . . . 60
4.6. Spannungsdifferenzen im DAFC-Modellversuch bei Einleiten von Gasen. 63
4.7. Zeitraum bis zum Einsetzen der Entfärbung der Methylenblau-Suspension bei Verwendung von Trockenhefe. . . . . 76
4.8. Übersicht über die Einwaagen beziehungsweise den Auftrag des Milchsäure-Kulturen-Präparats. . . . . 115
4.9. Übersicht der den Einwaagen des Milchsäure-Kulturen-Präparats entsprechenden Stromstärken. T = 22 °C. . . . . 116
4.10. Auftrag der Komponenten zur Beschichtung der Elektroden und Widerstand der Beschichtung. Abstand der Messfühler 1.5 cm. . . . . 120
4.11. Übersicht über die Zellleistung ausgewählter Varianten der MFC mit Milchsäure-Kulturen-Präparat. t = 10 min. . . . . 124
4.12. Übersicht über die Einwaagen beziehungsweise den Auftrag des Lactase-Präparats. . . . . 148

4.13. Übersicht der den Einwaagen des Lactase-Präparats entsprechenden Stromstärken. T = 20 °C. . . . . 149
4.14. Stromstärke der EFC mit Lactase in der Zwei-Topf-Anordnung. *Rühren bezieht sich jeweils auf die Anodenhalbzelle.* T = 22 °C. . . . . 156
4.15. Gehalt an gelöstem Sauerstoff [$\frac{mg}{L}$] im Elektrolyt des Kathodenraums der EFC mit Lactase in Abhängigkeit vom Messzeitpunkt. *Rühren bezieht sich jeweils auf die Anodenhalbzelle.* T = 22 °C. . . . . 159

5.1. Übersicht der Gestaltungskompetenzen nach Haan [128, S. 23]. . . . . 165
5.2. Übersicht über die Verankerung der für die Lernarrangements zur Brennstoffzelle wichtigen Fachinhalte in den Lehrplänen der Sekundarstufe I in NRW. . . . . 170
5.3. Situierung von Brennstoffzellen in ausgewählten Schulbüchern für den Chemieunterricht der Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen. . . . . 175

6.1. Übersicht über die 13 im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit entstandenen Videos. . . . . 180
6.2. Leitfadeninterview zum Werdegang von Dr. Padma Priya Ravi. . . . 182
6.3. Übersicht über im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellte analoge Materialien. . . . . 187
6.4. Übersicht über die erstellten interaktiven E-Books. . . . . 191

7.1. Den Ziffern der Likert-Skala entsprechende Formulierungen. . . . . 198
7.2. Items zur Erfassung von Anhaltspunkten zu persönlichem Interesse, Umfeld und Zukunftsplänen der Lernenden. Mit Stern (*) markierte Items wurden auch in der Nacherhebung erfasst. . . . . 199
7.3. Items zur Bewertung von Experimenten und Materialien durch Lehrkräfte. Angelehnt an Dörschelln [201] und Zeller [89]. . . . . 202
7.4. Übersicht über die im Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* platzierten Experimente und ihre Intentionen. *BZ steht für Brennstoffzelle.* . . . . . 207
7.5. Verlaufsplan für die Schnupperaktion zum Kurs *Brennstoffzellen weitergedacht!*. Experimente **fett** hervorgehoben. . . . . 213
7.6. Quantitative Erfassung der vor und nach dem Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!* angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen. . 219
7.7. Übersicht über die im Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* platzierten Experimente und ihre Intentionen. *BZ steht für Brennstoffzelle.* . . . . . 224

7.8. Quantitative Erfassung der vor und nach dem Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!* angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen. 230
7.9. Kompakte Übersicht der Experimente als Eckpunkte des Exkurses zu biologischen Brennstoffzellen. . . . . 235
7.10. Quantitative Erfassung der vor und nach dem Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen. . . . . 240
7.11. Quantitative Erfassung der vor und nach dem Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen angefertigten Mindmaps. Absolute Zahlen. . . . . 247
7.12. Rahmendaten zu durchgeführten Lehrkräftefortbildungen. . . . . 253
7.13. Anmerkungen der Lehrkräfte zum Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle. . . . . 258
7.14. Anmerkungen der Lehrkräfte zu den Materialien zur Fortbildung. . . 258

B.1. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzte Geräte. . . . . 303
B.2. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete Chemikalien. . . . 304
B.3. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzte sonstige Komponenten. 306

C.1. Tabellarische Übersicht über den digitalen Anhang dieser Arbeit. . . 318

D.1. Thematische Verankerung von Brennstoffzellen in den Lehrplänen des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II . . . . . 319

E.1. Items zur Erfassung von Anhaltspunkten zur Motivation zur Kursteilnahme. . . . . 321
E.2. Items zur Reflexion und Feedback. . . . . 321

F.1. Verlaufsplan der ersten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . . 323
F.2. Verlaufsplan der zweiten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . 324
F.3. Verlaufsplan der dritten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . 324
F.4. Verlaufsplan der vierten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . 325
F.5. Verlaufsplan der fünften Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*. . . 325
F.6. Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden des Schnupperkurses zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15 . . . . . 326
F.7. Lieblingsfächer der Teilnehmenden des Schnupperkurses zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15 . . . . . 326
F.8. Feedback der Teilnehmenden des Schnupperkurses zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15 . . . . . 327
F.9. Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!* im Fach Chemie. Gerundete Noten. n = 6 . . . . . 329
F.10. Beweggründe zur Teilnahme an *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6 329

F.11. Persönliches Interesse der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6 . . . . . 330
F.12. Interesse des Umfeldes der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6 . . . . . 331
F.13. Zukunftspläne der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6 . . . . . 331
F.14. Geplante Studiengänge der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6 . . . . . 332
F.15. Feedback der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6333
F.16. Verlaufsplan der ersten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . . 334
F.17. Verlaufsplan der zweiten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . 334
F.18. Verlaufsplan der dritten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . 335
F.19. Verlaufsplan der vierten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . 335
F.20. Verlaufsplan der fünften Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . 335
F.21. Verlaufsplan der sechsten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. . . . 336
F.22. Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden von *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. Gerundete Noten. n = 8 . . . . . 338
F.23. Beweggründe zur Teilnahme an *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. n = 8 339
F.24. Persönliches Interesse der Teilnehmenden von *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. n = 8; *** n = 5** . . . . . 340
F.25. Feedback der Teilnehmenden von *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. n = 5341
F.26. Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. Gerundete Noten. n = 10 . . . . . 343
F.27. Beweggründe zur Teilnahme am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen. n = 10 . . . . . 343
F.28. Persönliches Interesse der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. n = 10 . . . . . 344
F.29. Interesse des Umfeldes der Teilnehmenden der Sekundarstufe I. n = 10345
F.30. Zukunftspläne der Teilnehmenden der Sekundarstufe I. n = 10 . . . . 345
F.31. Geplante Studiengänge der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. n = 10 . . . . . 345
F.32. Feedback der Teilnehmenden am Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I. n = 10 . . . . . 346
F.33. Eindruck einer Lehrkraft vom Experiment zur Redox-Aktivität von Bäckerhefe. n = 1 . . . . . 346
F.34. Eindruck einer Lehrkraft von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle. n = 1 . . . . . 347

F.35. Eindruck einer Lehrkraft von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle. n = 1 . . . . . 347
F.36. Eindruck einer Lehrkraft von den Materialien. n = 1 . . . . . 348
F.37. Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. Gerundete Noten. n = 17 . . . . . 350
F.38. Persönliches Interesse der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. n = 17; *** n = 15** . . . . . 351
F.39. Interesse des Umfeldes der Teilnehmenden der Sekundarstufe II. n = 17351
F.40. Zukunftspläne der Teilnehmenden der Sekundarstufe II. * n = 15 . . 352
F.41. Geplante Studiengänge der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. n = 15 . . . . . 352
F.42. Feedback der Teilnehmenden am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II. n = 15 . . . . . 353
F.43. Eindruck der Lehrkräfte von den Experimenten zur alkalischen Brennstoffzelle. n = 14 . . . . . 355
F.44. Eindruck der Lehrkräfte vom Experiment zur alkoholischen Brennstoffzelle. n = 14 . . . . . 355
F.45. Eindruck der Lehrkräfte von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle. n = 14 . . . . . 356
F.46. Eindruck der Lehrkräfte vom Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle. n = 14 . . . . . 356
F.47. Eindruck der Lehrkräfte von den Materialien zur Fortbildung. n = 14 357
F.48. Persönliches Resultat der Lehrkräfte von den zur Fortbildung. n = 14 358

# A. Glossar

**Aerob** Der Begriff bezeichnet die Gegenwart von Sauerstoff als abiotischen Faktor. Organismen, die nur in Gegenwart von Sauerstoff existieren können, werden als aerobe Organismen (Aerobier) gefasst. Gegenteil: *Anaerob.*

**Autotroph** Als autotroph werden Organismen bezeichnet, die unter Nutzung des Sonnenlichts in der Photosynthese chemische Brennstoffe herstellen und sich somit selbst ernähren können. Gegenteil: *Heterotroph*

**Bakterien** Bakterien gehören zu den Prokaryoten. Sie sind folglich etwa $1\,\mu$m große Einzeller, deren Inneres nicht durch Membranen kompartimentiert ist. Sie verfügen demnach auch über keinen Zellkern.

**Enzym** Unter dem Begriff Enzyme werden leistungsstarke und hochspezifische Katalysatoren verstanden, die Reaktionen in biologischen Systemen um das Millionenfache und mehr beschleunigen. Die meisten Enzyme sind Proteine. Die Katalyse findet am aktiven Zentrum des Enzyms statt, durch dessen Beschaffenheit die Spezifität festgelegt wird.

**Eukaryoten** Eukaryoten sind Lebewesen, deren Zellen stark kompartimentiert sind. Sie verfügen über einen Zellkern. Die einzelnen Zellen sind etwa $20\,\mu$m groß. Gegenteil: *Prokaryoten*

**Gärung** Als Gärungen werden die katabolen Stoffwechselprozesse beschrieben, die sich unter anaeroben Bedingungen an die Glykolyse anschließen. Je nach entstehendem Produkt unterscheidet man zwischen Milchsäure- und alkoholischer Gärung. Die Gärungen sind weniger energieeffizient als die Atmung.

**Glykolyse** Der Begriff Glykolyse beschreibt den ersten katabolen Stoffwechselweg. Er verläuft anaerob. In dieser Folge von Reaktionen wird ein Molekül Glucose in zwei Moleküle Pyruvat umgewandelt, gleichzeitig werden zwei Moleküle ATP gebildet. Unter aeroben Bedingungen schließt sich die Atmung, unter anaeroben Bedingungen eine Gärung an.

**Mikroorganismen** Mikroorganismen (Mikroben) sind evolutionär betrachtet die ältesten Lebewesen, aus denen sich andere Lebensformen entwickelt haben. In einer einzelnen Zelle vereinen sie in Organellen alle lebenswichtigen Funktionen. Mikroorganismen weisen die größte Diversität aller Lebewesen auf, zu ihnen gehören neben den Pilzen beispielsweise auch die Bakterien. Aufgrund ihrer geringen Größe von maximal 20 $\mu$m sind sie für das bloße Auge nicht sichtbar.

**Pilze** Die echten Pilze *Mycobionta* sind überwiegend Mikroorganismen. Sie verfügen über septierte Hyphen und Zellwände, die charakteristischerweise Chitin enthalten. Da Pilze über kein Chlorophyll verfügen und keine Photosynthese betreiben können, sind die heterotroph.

# B. Experimentalteil

## B.1. Geräte

| **Typ** | **Bezeichnung** | **Hersteller** | **Bezugsquelle** |
|---|---|---|---|
| *Mikroskop* | Lichtmikroskop Keyence VHD-1000X | Keyence | Bestand BUW |
| *Messgerät* | Cassy Lab 2, Pocket Cassy® | LD Didactic | www.ld-didactic.de |
| | Checker®, Portable pH Meter | HANNA Instruments® | Bestand BUW |
| | Digitalmultimeter 3419 | Peak Tech® | www.ld-didactic.de |
| | Digitalmultimeter | Peak Tech® | www.ld-didactic.de |
| | Sauerstoffmessgerät OX 4100 H | VWR | Bestand BUW |
| | wireless pH Electrode (pH/ISE/ORP) | PASCO | Conatex Didactic |
| *Netzgerät* | selectable switching mode power supply 1320 | Peak Tech® | www.ld-didactic.de |
| *Verbraucher* | DC-Kleinstmotor 2230T015S | FAULHABER | www.faulhaber.com |
| *Aquarienpumpe* | Tetra APS 50 | Tetra | www.amazon.de |
| | EDEN 105-105G | EDEN | Conrad |
| *Mikrocontroller* | Arduino Uno Starter Kit | Arduino | Conrad |
| *Spektral-photometer* | Specord 200 Plus | Analytik Jena | Bestand BUW |

Tabelle B.1: Im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzte Geräte.

## B.2. Chemikalien und sonstige Komponenten

| **Chemikalie** | **Bezugsquelle** | **Gebinde** | **CAS-Nummer** |
|---|---|---|---|
| Agar (s) | Merck | 100 g | 9002-18-0 |
| Aktivkohle, C (s) | Sigma Aldrich | 1 kg | 7440-44-0 |
| Carbon Nanotubes, multi-walled >98 % C (s) | Sigma Aldrich | 1 g | 308068-56-6 |
| Ethanol, $CH_3CH_2OH$ (l) | Carl Roth | 2 L | 64-17-5 |
| D-Fructose, $C_6H_{12}O_6$ (s) | Merck | 1 kg | 57-48-7 |
| D-Glucose, $C_6H_{12}O_6$ (s) | Fisher Scientific | 1 kg | 50-99-7 |
| Glucoseoxidase | Sigma Aldrich | 50 000 units | 9001-37-0 |
| Graphitflocken, C (s) | Alfa Aesar | 250 g | 7782-42-5 |
| Kaliumchlorid, KCl (s) | Carl Roth | 1 kg | 7447-40-7 |
| Kaliumhexacyanoferrat, $C_6FeK_3N_6$ (s) | Carl Roth | 1 kg | 13746-66-2 |
| Kaliumhydroxid, KOH (s) | Carl Roth | 1 kg | 1310-58-3 |
| Kaliumnitrat, $KNO_3$ (s) | Carl Roth | 1 kg | 7757-79-1 |
| Laccase | Sigma Aldrich | 1 g | 80498-15-3 |
| Lactase aus der Hefe *Kluyveromyces lactis* | Sigma Aldrich | 50 mL | 9031-11-2 |
| Lactose, $C_{12}H_{22}O_{11}$ (s) | Merck | 1 kg | 10039-26-6 |
| Methanol, $CH_3OH$ (l) | Carl Roth | 2 L | 67-56-1 |
| Methylenblau, $C_{16}H_{18}ClN_3S$ (s) | Merck | 1 g | 61-73-4 |
| Natriumdodecylsulfat, $NaC_{12}H_{25}SO_4$ (s) | Sigma Aldrich | 500 g | 151-21-3 |
| Natriumhydrogenphosphat-Dihydrat, $Na_2HPO_4 \cdot {}_2H_2O$ | Merck | 1 kg | 10028-24-7 |
| Neutralrot, $C_{15}H_{17}ClN_4$ (s) | Sigma Aldrich | 1 g | 553-24-2 |
| Phenolrot, $C_{19}H_{14}O_5S$ (s) | Merck | 1 g | 143-74-8 |
| D-Saccharose, $C_{12}H_{24}O_{12}$ (s) | Fluka | 250 mg | 57-50-1 |
| Sauerstoff, $O_2$ (g) | Bestand BUW | | 7782-44-7 |

Tabelle B.2: Im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete Chemikalien.

| **Komponente** | **Bezeichnung** | **Hersteller** | **Bezugsquelle** |
|---|---|---|---|
| *Elektroden* | Bleistiftminen, HB 3,15 mm | Stabilo ® | Drogerie |
| | Büroklammern | | |
| | Eisen-Bleche | HEDINGER | |
| | Eisen-Nägel | | Baumarkt |
| | Graphitfolie | | Conrad |
| | Graphitgewebe, Probe | DITF | DITF |
| | Graphitstäbe, ⌀ 3,05 mm | Alfa Aesar® | |
| | Graphitvlies, Probe | DITF | DITF |
| | Kupfer-Bleche | HEDINGER | |
| | Platin-Bleche | | |
| | Rasierscherfolien | Braun | Braun |
| | Rundfilter, ⌀ 125 mm | WIN LAB® | |
| | Silber-Bleche | HEDINGER | |
| | Topfreiniger | Profissimo | Drogerie |
| | Zink-Bleche | HEDINGER | |
| *Elektrolyt-Brücken* | Bierdeckelfilz | Profissimo | Drogerie |
| | Eierkarton | | |
| | Küchenpapier | Profissimo | Drogerie |
| | Öko-Flachfilter für Dunstabzugshauben | Profissimo | Drogerie |
| | Schwammtücher | Profissimo | Drogerie |
| | Toilettenpapier | | Drogerie |
| | U-Rohr aus Glas | | |
| *Halbzell-fassungen* | Eierkarton, farblos | | Supermarkt |
| | Faltenfilter ⌀ 15 mm | Macherey-Nagel | |
| | Soxhlet-Extraktionshülsen, ⌀ 3 cm, Länge 8 cm | | Glasladen Uni Tübingen |
| | Teebeutel | Profissimo | Drogerie |
| *Haushalts-chemikalien* | Backpulver (15 g Pck.) | Belbake | Supermarkt |
| | Frischhefe | | Supermarkt |
| | Kaisernatron (50 g Pck.) | Kaiser | Supermarkt |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | Lactase-Tabletten, 12.000 FCC | Mivolis | Drogerie |
| | Milchsäure-Kulturen, 20 Kapseln pro Pck. | Mivolis | Drogerie |
| | Milchzucker (500 g Pck.) | Mivolis | Drogerie |
| | Spülmittel | Frosch | Drogerie |
| | Tafelsalz, fein (500 g Pck.) | REWE Beste Wahl | Supermarkt |
| | Trockenhefe (7 g Pck.) | RUF | Supermarkt |
| *Sonstige* | Dreiwegehahn | | Bestand BUW |
| | Dressingbecher, Volumen 30 mL | | Supermarkt |
| | Foldback-Klammern | Staples | Drogerie |
| | Glucose-Teststreifen | Quantofix® | Bestand BUW |
| | Haarklemmen | | Drogerie |
| | Haarnadeln | | Drogerie |
| | Heißklebepistole | Lux | Baumarkt |
| | Heißklebestifte | Westcott | Baumarkt |
| | Schmirgelpapier | | Baumarkt |
| | Schlauchmaterial | | Bestand BUW |
| | Spritze, Volumen 60 mL | Inject® | Bestand BUW |
| | Verschlussdraht | Profissimo | dm |

Tabelle B.3: Im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzte sonstige Komponenten.

# B.3. Experimentieranweisungen

## B.3.1. Modellversuch zur alkalischen Brennstoffzelle

### B.3.1.1. Aufbau in der Ein-Topf-Zellgeometrie

Die Versuchsvarianten wurden in Anlehnung an Tausch u. a. [10] aufgebaut: In einem 50 mL-Becherglas werden 40 mL der Elektrolyt-Lösung vorgelegt. Sofern Rasierscherfolien als Elektroden genutzt werden, werden zwei davon aufgerollt und mit jeweils einer Krokodilklemme fixiert. Andernfalls wird jeweils ein/e Graphitstab /Bleistiftmine fixiert. Die Enden der Krokodilklemmen werden durch Löcher in der Schaumstoffhalterung gesteckt und jeweils mit einem Kabel verbunden. Der Abstand zwischen den Löchern beträgt 1.5 cm. Die Schaumstoffhalterung wird mithilfe von Stativmaterial geklammert, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist. Die Elektroden werden in der Halterung soweit in die Flüssigkeit im Becherglas eingebracht, dass die Krokodilklemmen keinen Kontakt zur Flüssigkeit haben. Anschließend wird 30 s oder 60 s mit einer Spannung von 4.5 V elektrolysiert. Schließlich wird die Zellspannung vermessen oder der Motor angeschlossen.

### B.3.1.2. Aufbau in der Zwei-Topf-Zellgeometrie

Diese Versuchsvariante wurde ebenfalls in Anlehnung an Tausch u. a. [10] adaptiert: In zwei 25 mL-Bechergläsern werden jeweils 20 mL der Elektrolyt-Lösung vorgelegt. Sofern Rasierscherfolien als Elektroden genutzt werden, werden zwei davon aufgerollt und mit jeweils einer Krokodilklemme fixiert. Andernfalls wird jeweils eine Bleistiftmine fixiert. Die Enden der Krokodilklemmen werden durch Löcher in der Schaumstoffhalterung gesteckt und jeweils mit einem Kabel verbunden. Der Abstand zwischen den Löchern beträgt 1.5 cm. Die Schaumstoffhalterung wird mithilfe von Stativmaterial geklammert, sodass der Aufbau gegen Umfallen gesichert ist. Die Elektroden werden in der Halterung soweit in die Flüssigkeit im Becherglas eingebracht, dass die Krokodilklemmen keinen Kontakt zur Flüssigkeit haben. Ein Blatt Toilettenpapier wird der Länge nach gerollt, verdrillt, zu einem Bogen geformt und zur Verbindung der Lösungen in den Bechergläsern genutzt. Anschließend wird 60 s mit einer Spannung von 4 V elektrolysiert. Schließlich wird die Zellspannung vermessen.

## B.3.2. Modellversuche zur Brennstoffzelle mit Alltagschemikalien

### B.3.2.1. Aufbau in der Ein-Topf-Zellgeometrie

Die Versuchsvarianten wurden analog zu denen des Modellversuchs zur alkalischen Brennstoffzelle in Anlehnung an Tausch u. a. [10] aufgebaut.

## B.3.3. Modellversuch zur Direkt-alkoholischen Brennstoffzelle

Das Vorgehen orientiert sich stark an dem Modellversuch zur methanolischen Brennstoffzelle nach Tausch und Wachtendonk [77]: Durch Einkleben eines Separators mit Heißkleber wird ein kleiner Plastikbecher in zwei etwa gleich große Räume aufgeteilt. Zwei Rasierscherfolien werden aufgerollt und jeweils mit einer Krokodilklemme fixiert. In eine der Rollen wird ein Gaseinleitungsschlauch gesteckt und die gesamte Rolle mit einem Verschlussdraht versehen. Die präparierten Rasierscherfolien werden in die Räume des Plastikbechers eingebracht. Der Gaseinleitungsschlauch wird über einen Dreiwegehahn mit der Spritze verbunden. Anodenseitig wird eine Mischung aus Elektrolyt und Brennstoff im gleichen Volumenverhältnis beziehungsweise kathodenseitig (Gaseinleitung) nur Elektrolyt gegeben. Die Elektroden werden über ein Messgerät verbunden, bevor (über die Spritze) Luft in den Kathodenraum eingebracht wird.

### B.3.3.1. Präparation der Schwammtücher

Der Spülschwamm (= Schwammtuch) wurde vor Einsatz als Halbzellseparation mit klarem Wasser gewaschen und anschließend getrocknet.

## B.3.4. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Bäckerhefe

### B.3.4.1. Redox-Aktivität von Bäckerhefe

Unter Rühren wird eine Suspension aus 15 mL dest. Wasser und 10 g Frischhefe (1 g Trockenhefe) erstellt. Zu dieser werden ebenfalls unter kontinuierlichem Rühren 2 g Glucose gegeben. Die Suspension wird mit 2-3 Tropfen der Farbstoff-Lösung der Konzentration 0.1 $\frac{mol}{L}$ versetzt.

### B.3.4.2. Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau

**B.3.4.2.1. Versuchsanordnung nach Silveira u. a. [91]:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils eine HB-Bleistiftmine (2 mm x 10 cm)

hineinragt. Ein ca. 15 cm langes und im Durchmesser etwa 4 mm großes U-Rohr aus Glas wird mit Agar in Kaliumchlorid-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ gefüllt und dient als Elektrolyt-Brücke zwischen den beiden Bechergläsern. In das als Kathodenhalbzelle genutzte Becherglas werden 20 mL des mit gelben Blutlaugensalz ($c = 0.025\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$) versetzten Phosphatpuffers der Konzentration $c = 0.05\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ vorgelegt. In das als Anodenhalbzelle genutzte Becherglas werden ebenfalls 20 mL des Phosphatpuffers der Konzentration $c = 0.05\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ sowie 2 mL der Methylenblau-Lösung ($c = 0.010\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$) sowie 1 mL der Glucose-Lösung ($c = 0.4\,\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{mL}}$) gegeben. Die Zellspannung wird vermessen. Nach Stabilisation der messbaren Spannung werden 2 mL Hefe-Suspension in die Anodenhalbzelle eingebracht. Die Hefe-Suspension wurde zuvor aus 0.8 g Trockenhefe und 2 mL Puffer-Lösung hergestellt. Die auftretende Spannungsdifferenz wird dem Stoffwechsel der Hefe zugesprochen.

**B.3.4.2.2. Einfluss exogener Redox-Mediatoren:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils eine HB-Bleistiftmine (2 mm x 10 cm) hineinragt. Ein ca. 15 cm langes und im Durchmesser etwa 4 mm großes U-Rohr aus Glas wird mit Agar in Kaliumchlorid-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ gefüllt und dient als Elektrolyt-Brücke zwischen den beiden Bechergläsern. In das als Kathoden- sowie Anodenhalbzelle genutzte Becherglas werden 25 mL beziehungsweise 23 mL einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ gegeben. Im als Anoden-Halbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Zusätzlich werden 2 mL der Methylenblau-Lösung ($c = 0.010\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$) beziehungsweise 2 mL der Neutralrot-Lösung ($c = 0.010\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$), 2 mL eines Gemisches aus gleichen Volumenanteilen der Methylenblau-Lösung und der Neutralrot-Lösung oder weitere 2 mL der Glucose-Lösung in die Anodenhalbzelle eingebracht. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.3. Variation der Elektrolyt-Brücke:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils eine HB-Bleistiftmine (2 mm x 10 cm) hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ vorlegt. Im als Anoden-Halbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über die jeweilige gewählte Brücke verbunden. Es werden Bierdeckelfilz, Eierkartonpappe, Küchen- und Toilettenpapier jeweils in der Kaliumchlorid-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ getränkt und als Verbindung der Halbzellen genutzt. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.4. Variation der Elektrolyt-Lösung in der Brücke:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils eine HB-Bleistiftmine (2 mm x 10 cm) hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$

vorlegt. Im als Anoden-Halbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über die jeweilige präparierte Brücke verbunden. Das verdrillte Toilettenpapier wird Kaliumchlorid-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$, Kaliumnitrat-Lösung der Konzentration $c = 1.5\,\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{L}}$ beziehungsweise gar nicht getränkt und als Verbindung der Halbzellen genutzt. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.5. Variation der Elektroden:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils eine Elektrode hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ vorlegt. Im als Anodenhalbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke verbunden. Die Elektroden-Materialien werden pro Aufbau variiert, wobei immer in Anoden- und Kathodenhalbzelle während einer Messung dieselben Materialien genutzt werden. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.6. Variation der Lösung im Kathodenraum:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils ein Eisen-Nagel hineinragt. Im als Anodenhalbzelle genutzten Becherglas werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ vorlegt und 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Im als Kathodenhalbzelle genutzten Becherglas werden 25 mL der jeweilig zu erprobenden Lösung eingebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke verbunden. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.7. Variation des Glucose-Gehaltes der Lösungen im Anoden- und Kathodenraum:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils ein Eisen-Nagel hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit der jeweilig gewählten Konzentration vorlegt. Im als Anodenhalbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke verbunden. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.8. Veränderung des pH-Wertes im Anodenraum:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils ein Eisen-Nagel hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit mit $\omega = 10\,\%$ vorlegt. Im als Anoden-Halbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als

Elektrolyt-Brücke verbunden. Der pH-Wert im Anodenraum wird mithilfe eines pH-Meters vermessen.

**B.3.4.2.9. Variation des Substrats:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils ein Eisen-Nagel hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL der jeweiligen Saccharid-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ vorlegt. Im als Anoden-Halbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke verbunden. Die Zellspannung wird vermessen.

**B.3.4.2.10. Einfluss des Lufteintrags in die Kathodenhalbzelle:** Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils ein Eisen-Nagel hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 25 mL einer Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ vorlegt. Im als Anodenhalbzelle genutzten Becherglas werden 1.5 g Bäckerhefe unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke verbunden. In die Kathodenhalbzelle werden händisch mithilfe einer Spritze im Abstand von 5 min 10 mL Umgebungsluft zugeführt. Alternativ erfolgt die Zufuhr kontinuierlich über eine Aquarienpumpe mit einem Durchsatz laut Hersteller von 400 $\frac{L}{h}$. Die Zellspannung wird vermessen.

### B.3.4.3. Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau

**B.3.4.3.1. Variation der Halbzellfassung:** (Die becherartige Fassung wird mit der Öffnung nach oben mithilfe der Büroklammer am Rand des 100 mL-Becherglases befestigt.) Die Elektroden werden mithilfe von Stativmaterial fixiert. Zu 1,5 g Hefe werden im 25 mL-Becherglas 25 mL destilliertes Wasser unter Rühren mit dem Glasstab eingebracht, bis keine Klumpen mehr sichtbar sind. 2,5 g Glucose werden unter Rühren mit dem Glasstab in die Hefe-Suspension eingebracht. Die Hefe-Suspension wird in den Faltenfilter überführt und an der Anode fixiert, unmittelbar im Anschluss wird Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ in den Bereich außerhalb gegeben. (Die Suspension wird in die becherartige Fassung und zeitgleich die Glucose-Lösung in den Bereich außerhalb überführt.) Die Zellspannung wird gemessen.

**B.3.4.3.2. Versuchsanordnung nach Bennetto [81]:** Ein Glasgefäß stellt die Fassung für die Brennstoffzelle dar. In das Gefäß reichen zwei als Elektrode genutzte Graphitstäbe. Die Graphitstäbe sind durch Kupferdrähte mit Kabeln verbunden. In einem separaten Gefäß wird eine Suspension aus *E. coli*, Wasser, einer „geringen Menge“ Glucose und Methylenblau (c = 5 - 10 $\frac{mmol}{L}$) angesetzt und mithilfe eines

Phosphat-Puffers auf pH 7 eingestellt. Im Gefäß zur Fassung der Brennstoffzelle wird eine Kaliumhexacyanidoferrat(III)-Lösung (c = 0.01 - 0.10 $\frac{mol}{L}$) vorgelegt und ebenfalls mithilfe eines Phosphat-Puffers auf pH 7 eingestellt. Vor Inbetriebnahme der Brennstoffzelle wird zunächst die „Anoden-Suspension“ im separaten Gefäß bis zur Entfärbung des Methylenblaus stehen gelassen. Bei Raumtemperatur nimmt dieser Vorgang mehrere Minuten in Anspruch. Schließlich wird die Suspension in einen Dialysebeutel (Eierkarton-Hülse) überführt, an der Anode fixiert und es erfolgt die Vermessung von Spannung und Stromstärke.

**B.3.4.3.3. Variation des Substrats:** Die Eierkarton-Hülse wird mit der Öffnung nach oben mithilfe der Büroklammer am Rand des 100 mL-Becherglases befestigt. Die Elektroden werden mithilfe von Stativmaterial fixiert. Zu 1,5 g Hefe werden im 25 mL-Becherglas 25 mL destilliertes Wasser unter Rühren mit dem Glasstab eingebracht, bis keine Klumpen mehr sichtbar sind. 2,5 g Saccharid werden unter Rühren mit dem Glasstab in die Hefe-Suspension eingebracht. Die Suspension wird in die Eierkarton-Hülse und zeitgleich die Saccharid-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ in den Bereich außerhalb überführt. Die Zellspannung wird gemessen.

**B.3.4.3.4. Kopplung mit dem Mikrocontroller *Arduino*:** Die Eierkarton-Hülse wird mit der Öffnung nach oben mithilfe der Büroklammer am Rand des 100 mL-Becherglases befestigt. Die Elektroden werden mithilfe von Stativmaterial fixiert. Zu 1,5 g Hefe werden im 25 mL-Becherglas 25 mL destilliertes Wasser unter Rühren mit dem Glasstab eingebracht, bis keine Klumpen mehr sichtbar sind. 2,5 g Glucose werden unter Rühren mit dem Glasstab in die Hefe-Suspension eingebracht. Die Suspension wird in die Eierkarton-Hülse und zeitgleich die Glucose-Lösung mit $\omega = 10\,\%$ in den Bereich außerhalb überführt. Die Enden der Bananenkabel des *Arduino* werden jeweils mit einem der Eisen-Nägel in Kontakt gebracht.

### B.3.4.4. Hefe-Brennstoffzelle im Kompakt-Aufbau

**B.3.4.4.1. Variation der Elektroden:** Eine Suspension aus 1.5 g Trockenhefe, 2 g Glucose und 4 mL destilliertem Wasser wird erstellt. Diese wird in einen verengten Faltenfilter eingebracht, in den eine Elektrode hineinragt. Auf diesen Aufbau wird möglichst plan eine Gegenelektrode gelegt, gegebenenfalls über eine Haarklemme fixiert. An die Elektroden wird jeweils eine Krokodilklemme angeschlossen und die Zellspannung vermessen.

**B.3.4.4.2. Variation des Aufbaus:** Pro geplanter Brennstoffzelle werden drei 2x2 cm große Quadrate aus Filterpapier sowie ein Streifen Parafilm der Maße 1x6 cm

ausgeschnitten - im Verlauf werden die Mengenangaben zur Anfertigung dreier Zellen genannt. In einem Becherglas wird eine Suspension aus 3 mL destilliertem Wasser, 60 mg Aktivkohle und 30 mg Natriumdodecylsulfat erstellt. Die Suspension wird zu gleichen Teilen in zwei Schnappdeckelgläser überführt. Eine der Suspensionen wird mit 500 mg Trockenhefe versetzt, das Schnappdeckelglas gekennzeichnet. Zur Herstellung der Elektroden werden pro Suspension drei Filterpapierstücke mit 0.5 mL der Suspensionen versehen. In der 10 min Einwirkzeit werden 25 mL einer gesättigten Glucose-Lösung hergestellt. Ein bislang unbehandeltes Stück Filterpapier wird darin 5 min getränkt.
Auf dem Parafilmstreifen wird das Filterpapier mit Hefe-Suspension, das Glucose-getränkte Filterpapier (Reservoir) und das mit Aktivkohle-Suspension versetzte Filterpapier gestapelt, wobei die jeweiligen Beschichtungen dem Reservoir zugewandt sind. Nach Umklappen des Parafilmstreifens wird der Aufbau mithilfe einer Haarklammer fixiert. An die Filterpapier-Elektroden wird jeweils eine Krokodilklemme angeschlossen. Die Zellspannung wird vermessen.

### B.3.5. Mikrobielle Brennstoffzellen mit Milchsäure-Bakterien

**Anfertigen und Betrieb der mikrobiellen Brennstoffzelle mit Milchsäure-Bakterien im kompakten Stapelaufbau:** Pro geplanter Brennstoffzelle werden drei 2x2 cm große Quadrate aus Filterpapier sowie ein Streifen Parafilm der Maße 1x6 cm ausgeschnitten - im Verlauf werden die Mengenangaben zur Anfertigung dreier Zellen genannt. In einem Becherglas wird eine Suspension aus 3 mL destilliertem Wasser, 60 mg Aktivkohle und 30 mg Natriumdodecylsulfat erstellt. Die Suspension wird zu gleichen Teilen in zwei Schnappdeckelgläser überführt. Eine der Suspensionen wird mit Milchsäure-Kulturen-Präparat versetzt, das Schnappdeckelglas gekennzeichnet. Zur Herstellung der Elektroden werden pro Suspension drei Filterpapierstücke mit 0.5 mL der Suspensionen versehen. In der 10 min Einwirkzeit werden 25 mL einer gesättigten Substrat-Lösung hergestellt. Ein bislang unbehandeltes Stück Filterpapier wird darin 5 min getränkt.
Auf dem Parafilmstreifen wird das Filterpapier mit Milchsäure-Bakterien-Suspension, das Substrat-getränkte Filterpapier (Reservoir) und das mit Aktivkohle-Suspension versetzte Filterpapier gestapelt, wobei die jeweiligen Beschichtungen dem Reservoir zugewandt sind. Nach Umklappen des Parafilmstreifens wird der Aufbau mithilfe einer Haarklammer fixiert. An die Filterpapier-Elektroden wird jeweils eine Krokodilklemme angeschlossen. Die Zellleistung wird vermessen.

## B.3.6. Enzymatische Brennstoffzelle mit $\beta$-Glucoseoxidase und Laccase

### B.3.6.1. Aufbau nach Ge u. a. [98]

**Vorbereitung:** Zur Herstellung der leitfähigen Tinte zur Elektroden-Beschichtung werden 100 mg CNTs in 100 mL destilliertem Wasser gelöst und mit 50 mg Natriumdodecylsulfat versetzt. Zwei Quadrate der Kantenlänge 3 cm und ein etwas größeres Quadrat werden aus Filterpapier ausgeschnitten. 2.5 mL der leitfähigen Tinte werden mit 10 mg Laccase vermengt; weitere 2.5 mg der leitfähigen Tinte mit 10 mg Glucoseoxidase. Die beiden Filterpapier-Quadrate werden jeweils mit 100 $\mu$L einer der Suspensionen beschichtet und für 10 min (20 min) trocknen gelassen. Der Zyklus aus Beschichtung und Trocknung erfolgt weitere vier (fünf) mal. Mithilfe von leitfähigem Kleber wird je ein Kupferdraht an die Elektrode geklebt.
**Aufbau der Brennstoffzelle:** Das größere Filterpapier wird zwischen die beiden beschichteten Filterpapiere gestapelt, der Stapel mit einem Parafilm-Streifen und einer Foldback-Klammer fixiert. Der gesamte Stapel wird für 5 min in eine bei pH 7.4 gepufferte Glucose-Lösung der Konzentration 10 $\frac{mmol}{L}$ eingebracht.
**Betrieb der Zelle:** Die Zelle wird aus der Lösung entfernt, die Elektroden über die Kupferdrähte mit Krokodilklemmen verbunden und die Zellspannung vermessen.

## B.3.7. Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase

### B.3.7.1. Nachweis der Stoffwechsel-Aktivität von Lactase:

1 g Milchzucker werden in 20 mL Leitungswasser gelöst (und auf 37 °C erwärmt). Es werden fünf Tropfen der Phenolrot-Lösung der Konzentration 0.005 $\frac{mol}{L}$ (bzw. Methylenblau- oder Neutralrot-Lösung) und schließlich eine zermörserte Tablette des Lactase-Präparats eingebracht. Die Zeit bis zur Umfärbung wird notiert.

### B.3.7.2. Vorgehen zur Aufnahme von Absorptionsspektren:

**Messungen zur Aktivität von Lactase-Präparat:** Die Referenzmessung wird mit Wasser durchgeführt. Zunächst wird die Absorption einer Methylenblau-Lösung der Konzentration 0.00004 $\frac{mol}{L}$ im Bereich von 350-800 nm als Referenzspektrum aufgenommen. 1 g Milchzucker werden in 20 mL einer Methylenblau-Lösung der Konzentration 0.00004 $\frac{mol}{L}$ gelöst. Eine zermörserte Tablette des Lactase-Präparats wird unter Rühren eingebracht, ehe die Suspension filtriert und im Intervall von 5 min über einen Zeitraum von 90 min die Absorption im Bereich von 350-800 nm bestimmt wird.

**Messungen zur Aktivität von reiner Lactase:** Die Referenzmessung wird mit Wasser und Glycerin im Verhältnis von 3:1 durchgeführt. Zunächst wird ebenfalls die Absorption einer Methylenblau-Lösung der Konzentration 0.00004 $\frac{mol}{L}$ im Bereich von 350-800 nm als Referenzspektrum aufgenommen. 1 g Milchzucker werden in 15 mL einer Methylenblau-Lösung der Konzentration 0.00005 $\frac{mol}{L}$ gelöst und mit 5 mL der reinen Lactase in Glycerin versetzt. Im Intervall von 5 min wird die Absorption über einen Zeitraum von 90 min im Bereich von 350-800 nm bestimmt.

#### B.3.7.3. Grundlegender Aufbau der Stapelvariante:

**Vorbereitung:** Eine Lactase-Tablette wird gemörstert. Pro geplanter Brennstoffzelle werden drei 2x2 cm große Quadrate aus Filterpapier ausgeschnitten (die folgenden Mengenangaben beziehen sich auf drei Brennstoffzellen). In einem Schnappdeckelglas wird eine Suspension aus 1.5 mL dest. Wasser, 30 mg Aktivkohle und 15 mg Natriumdodecylsulfat erstellt, im anderen Schnappdeckelglas eine Suspension aus 1.5 mL dest. Wasser, 30 mg Aktivkohle, 15 mg Natriumdodecylsulfat und 100 mg Lactase. Jeweils drei Filterpapierquadrate werden in zwei Petrischalen gelegt. Die drei Filterpapiere in der einen Schale werden mit jeweils 0.5 mL der Lactase-Suspension beziehungsweise in der anderen Schale mit 0.5 mL der wässrigen Suspension versetzt. Es folgt eine Einwirkzeit von 10 min. In der Zwischenzeit wird ein bislang unbehandeltes Stück Filterpapier in gesättigter Lactose-Lösung getränkt. Pro geplanter Brennstoffzelle wird ein Streifen Parafilm (etwa 1x5 cm) pro geplanter Brennstoffzelle zurecht geschnitten.
**Aufbau der Brennstoffzelle:** Mithilfe einer Pinzette werden die Komponenten der Brennstoffzelle mit etwas Versatz zueinander auf den Parafilm-Streifen gestapelt: Parafilm, Filterpapier mit Lactase, Lactose-getränktes Filterpapier, Filterpapier mit wässriger Suspension. Dabei wird sichergestellt, dass die Enzyme und die Aktivkohle-Beschichtung dem Lactose-Reservoir zugewandt sind. Der Aufbau wird nach Umklappen des Parafilm-Streifens mithilfe einer Foldback-Klammer fixiert.
**Betrieb der Brennstoffzelle:** Die Krokodilklemmen werden an den überstehenden Teil der Elektroden geklammert. Die präparierte Brennstoffzelle wird auf eine umgekehrte dritte Petrischale gelegt, die glatte und etwas erhöhte Unterlage dient der Stabilisierung der Kontaktfläche. Die Zellspannung wird vermessen.

#### B.3.7.4. Grundlegender Aufbau der Zwei-Topf-Anordnung:

Als Halbzellfassung dienen 25 mL-Bechergläser, in die jeweils eine gerollte Scherfolie als Elektrode hineinragt. In beiden Bechergläsern werden 15 mg Natriumdodecylsulfat vorlegt. Während das als Kathodenhalbzelle genutzte Becherglas mit 25 mL dest.

Wasser gefüllt wird, werden im als Anodenhalbzelle genutzten Becherglas 2.5 g Lactose und eine gemörserte Lactase-Tablette (1 mL der Lactase in Glycerin) unter Rühren in Suspension gebracht. Die Halbzellen werden über verdrilltes Toilettenpapier als Elektrolyt-Brücke verbunden. Die Zellspannung wird vermessen, der Glucose-Gehalt über Teststreifen bestimmt.
Optional wird die Suspension (Lösung) im Anodenraum gerührt beziehungsweise im Kathodenraum Umgebungsluft eingeleitet.

# C. Übersicht des digitalen Anhangs

| **Ordner** | **ggf. Unterordner** | **Dateiname /-beschreibung** |
|---|---|---|
| 1. Einleitung | | Fotos der bearbeiteten Klausuraufgabe |
| 2. Materialien | 1. Videos | MBZ-tonlos.mp4<br>MBZ-Ton.mp4<br>VRedox.mov<br>VZweiT.mov<br>VEinT.mov<br>ITV-Ana-dt.mp4<br>ITV-Ana-en.mov<br>ITV-Priya-dt.mp4<br>ITV-Priya-en.mov<br>ITV-MBZ-dt.mp4<br>ITV-MBZ-en.mp4<br>Labor-MBZ-dt.mp4<br>Labor-MBZ-en.mp4 |
| | Interview- und Videotexte | MBZ-Film-Text.pdf<br>Interviewsituation-Hohenheim-dt.pdf<br>Interviewsituation-Hohenheim-en.pdf<br>ITV-MBZ-dt.pdf<br>ITV-MBZ-en.pdf<br>Labor-MBZ-dt.pdf<br>Labor-MBZ-en.pdf<br>ITV-Ana-dt.pdf<br>ITV-Ana-en.pdf |

| | | |
|---|---|---|
| | | ITV-Priya-dt.pdf<br>ITV-Priya-en.pdf |
| | 2. Fotodokumentationen | SEK-I<br>SEK-II |
| | 3. Skripte | Skript-BZ-weitergedacht-SEK-I.pdf<br>Skript-BZ-weitergedacht-SEK-II.pdf<br>Skript-AK-BZ-SEK-I.pdf<br>Skript-AK-BZ-SEK-II.pdf<br>Skript-Fortbildung-<br>Brennstoffzellen.pdf |
| | 4. E-Books | BZ-weitergedacht!-SEK-I.epub<br>BZ-weitergedacht!-SEK-II.epub<br>Alleskoenner-BZ-SEK-I.epub<br>Alleskoenner-BZ-SEK-II.epub<br>CIRO-E-Book.epub<br>BBZ-E-Book-SEK-I.epub<br>BBZ-E-Book-SEK-II.epub<br>Lehrer-BBZ-E-Book-SEK-I.epub<br>Lehrer-BBZ-E-Book-SEK-II.epub<br>Fortbildung-Brennstoffzellen.epub |
| 3. Lern-<br>arrangements | 1. Brennstoffzellen<br>weitergedacht | Material zur Erprobung<br>Material zur Begleitforschung |
| | 2. Alleskönner<br>Brennstoffzellen? | Material zur Begleitforschung |
| | 3. Exkurse zu biologischen<br>Brennstoffzellen | Begleitforschung SEK-I<br>Begleitforschung SEK-II |
| | 4. Lehrkräftefortbildung | Material zur Erprobung<br>Material zur Begleitforschung |

Tabelle C.1: Tabellarische Übersicht über den digitalen Anhang dieser Arbeit.

# D. Brennstoffzellen in den Lehrplänen des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II

| **Bundesland** | **Themenbereich** |
|---|---|
| Baden-Württemberg | Elektrische Energie und Chemie[212] |
| Bayern | Redoxgleichgewichte[213] |
| Berlin | Energie und chemische Reaktion[157] |
| Brandenburg | Elektrochemie in Alltag und Technik[158] |
| Bremen | Elektrochemie[159] |
| Hamburg | Nachhaltigkeit und Umweltchemie[214] |
| Hessen | Wahlthema: Angewandte Chemie[160] |
| Mecklenburg-Vorpommern | Elektrochemie (Galvanische Elemente)[161] |
| Niedersachsen | Basiskonzept Donator-Akzeptor[215] |
| Nordrhein-Westfalen | Elektrochemie[92] |
| Rheinland-Pfalz | Elektrochemische Stromerzeugung[162] |
| Saarland | Redoxreaktion[163] |
| Sachsen | Elektrochemische Reaktionen[216] |
| Sachsen-Anhalt | Donator-Akzeptor[217] |
| Schleswig-Holstein | Donator-Akzeptor-Konzept[218][219] |
| Thüringen | Atommodelle, Redoxreaktionen und Elektrochemie[220] |

Tabelle D.1: Thematische Verankerung von Brennstoffzellen in den Lehrplänen des Chemieunterrichts in der Sekundarstufe II

# E. Items der Schülerfragebögen zur Motivation und Reflexion

| **Motivation zur Kursteilnahme** |
|---|
| aus allgemeiner Neugierde. |
| weil ich in den Ferien nichts anderes zu tun habe. |
| (weil ich bereits öfter Junior Uni Kurse besucht habe.) |
| wegen eines teilnehmenden Freundes / einer teilnehmenden Freundin. |
| weil meine Eltern es möchten. |
| weil ich nach einer möglichen Studienperspektive suche. |

Tabelle E.1: Items zur Erfassung von Anhaltspunkten zur Motivation zur Kursteilnahme.

| **Reflexion und Feedback** |
|---|
| Ich habe in dem Kurs/Projekt viel dazugelernt. |
| Die Experimente haben mir Spaß gemacht. |
| Aus den Experimenten habe ich viel gelernt. |
| Nach dem Kurs werde ich nochmal in das Skript/E-Book schauen. |

Tabelle E.2: Items zur Reflexion und Feedback.

# F. Ergänzungen zu den Lernarrangements

## F.1. Ergänzungen zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*

### F.1.1. Verlaufspläne der Einheiten

In den nachfolgenden Tabellen steht EA für Einzel-, PA für Partner- und GA für Gruppenarbeit.

| | **Inhalte** | **Sozialform** | **Materialien** |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung | Plenum | |
| | Erhebung von Interesse und Vorwissen | EA | Fragebogen |
| | Impuls: Notwendigkeit der Energiewende | Plenum | Gegenstände aus Erdölprodukten |
| | Erdölverbrauch vs. Ressourcen | | |
| **Erarbeitung** | SDG und Energiewende | EA, PA | Skript |
| | Elektrochemische Grundbegriffe | EA | Skript |
| | Funktionsweise von Brennstoffzellen | EA | Skript |
| | Gewinnung von Wasserstoff recherchieren und beurteilen | EA | Skript |
| | Ist eine Metall-Luft-Zelle eine Brennstoffzelle? | PA | Experimentierset |
| **Sicherung** | Zusammenfassung der Einheit<br>Schwerpunkt: Funktion von Brennstoffzellen<br><br>Raum für offene Fragen | Plenum | Skript |

Tabelle F.1: Verlaufsplan der ersten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung<br>Domäne Chemie<br>Erläuterung des Ablaufes | Plenum<br><br>Plenum | |
| **Erarbeitung** | Leitfähigkeit von Flüssigkeiten bestimmen<br>Leitfähigkeiten ergründen | PA<br>PA | Versuch [1]<br>Skript |
| | Untersuchung von Elektroden in der AFC | PA | Versuch |
| | Alkohole als Brennstoffe<br>DAFC mit Ethanol betreiben | PA<br>PA | Skript<br>Versuch |
| **Sicherung** | Zusammenfassung der Einheit<br>Beste Wahl der untersuchten Komponenten in Übersichtsgraphik integrieren<br><br>Raum für offene Fragen | Plenum | Skript |

Tabelle F.2: Verlaufsplan der zweiten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung<br>Domäne Biologie<br>Vorstellen der Fragestellungen | Plenum | |
| **Erarbeitung** | Redox-Aktivität von Hefe | PA | Versuch |
| | Bedeutung der Redox-Aktivität von Hefe | PA | Skript |
| | Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau | PA | Versuch |
| | Hefe-Brennstoffzelle im Ein-Topf-Aufbau | PA | Versuch |
| | Hefe als Biokatalysator in Brennstoffzellen | | Skript |
| | Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase | PA | Versuch |
| **Sicherung** | Ausfüllen von Mindmaps | GA | Mindmaps |
| | Besprechen der ausgefüllten Mindmaps<br>Raum für offene Fragen | Plenum | Mindmaps |
| | Optional: Eintragen der Erkenntnisse in Tabelle | EA | Skript |

Tabelle F.3: Verlaufsplan der dritten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung<br>Domänen Physik, Informatik und Ingenieurswissenschaften<br>Fragestellungen und Vorgehen | Plenum | |
| **Erarbeitung** | Elektrische Leistung | PA | Skript |
| | Naturwissenschaftlicher Erkenntnisweg | PA | Skript |
| | Planung zur Leistungsoptimierung | PA | Skript |
| | Variation der Hefe-Brennstoffzelle | PA | Versuch |
| | Vorstellung der Variationen | GA | Versuche |
| | Demo: Koppeln mit Mikrocontroller | Plenum | Versuch |
| **Sicherung** | Demo: Programmierung des Mikrocontrollers | Plenum | Präsentation |
| | Sammeln der Effekte auf die Zellleistung<br>Raum für offene Fragen | Plenum | Skript |
| | Optional: Eintragen der Erkenntnisse in Tabelle | EA | Skript |

Tabelle F.4: Verlaufsplan der vierten Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung<br>Zuweisung der Einheiten | Plenum | |
| **Reflexion** | Reflexion der Einheiten | GA | Skript |
| | Vorbereitung einer Präsentation | GA | Skript, Mindmap, Versuch |
| | Wechselseitiges Vorstellen der Präsentationen | Plenum | Mindmap |
| | Werdegänge von MINT-Forschern<br>Raum für offene Fragen | Plenum | Videos |
| | Erhebung von Feedback und aktuellem Wissen | EA | Fragebogen |

Tabelle F.5: Verlaufsplan der fünften Einheit *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

## F.1.2. Evaluation der Teilerprobung

Sofern nicht anders gekennzeichnet, erfolgen die Angaben in Prozent. Die absoluten Zahlen sind in Klammern ergänzt. k.A. steht für *keine Angabe*.
Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung.

### F.1.2.1. Charakterisierung der Stichprobe

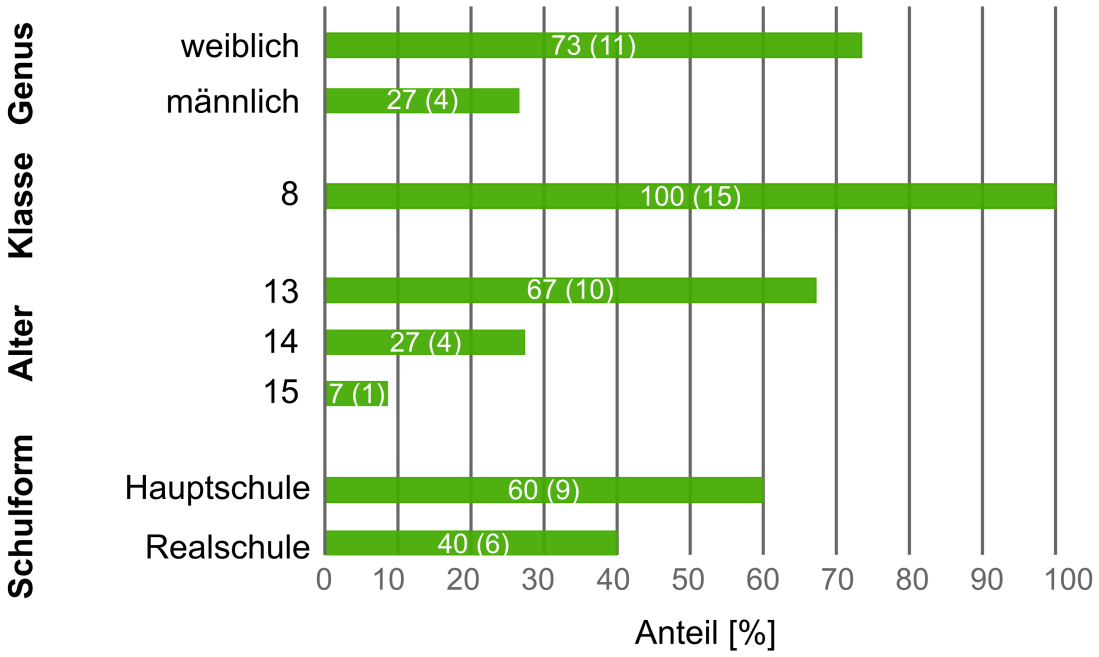



Abbildung F.1: Soziodemographie der Teilnehmenden des Schnupperkurses zum Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15

| Note | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| letzte Chemienote | | 27 (4) | 33 (5) | 27 (4) | | | 14 (2) |

Tabelle F.6: Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden des Schnupperkurses zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15

| **Schulfach** | **Sport** | **Englisch** | **Kunst** | **Deutsch** |
|---|---|---|---|---|
| **Nennung** | 60 (9) | 20 (3) | 13 (2) | 7 (1) |

Tabelle F.7: Lieblingsfächer der Teilnehmenden des Schnupperkurses zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15

### F.1.2.2. Persönliches Resultat der Teilnehmenden

| Der Kurs hat mir sehr gut gefallen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 53 (8) | 20 (3) | 27 (4) | | | | |
| Die Experimente haben mir Spaß gemacht. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 67 (10) | 13 (2) | 20 (3) | | | | |
| Ich habe heute viel Neues gelernt. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 53 (8) | 40 (6) | 7 (1) | | | | |
| Freie Anmerkungen: Es war ok. | | | | | | | |

Tabelle F.8: Feedback der Teilnehmenden des Schnupperkurses zu *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 15

## F.1.3. Evaluation der Erprobung

Sofern nicht anders gekennzeichnet, erfolgen die Angaben in Prozent. Die absoluten Zahlen sind in Klammern ergänzt. k.A. steht für *keine Angabe*.
Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung.

### F.1.3.1. Charakterisierung der Stichprobe

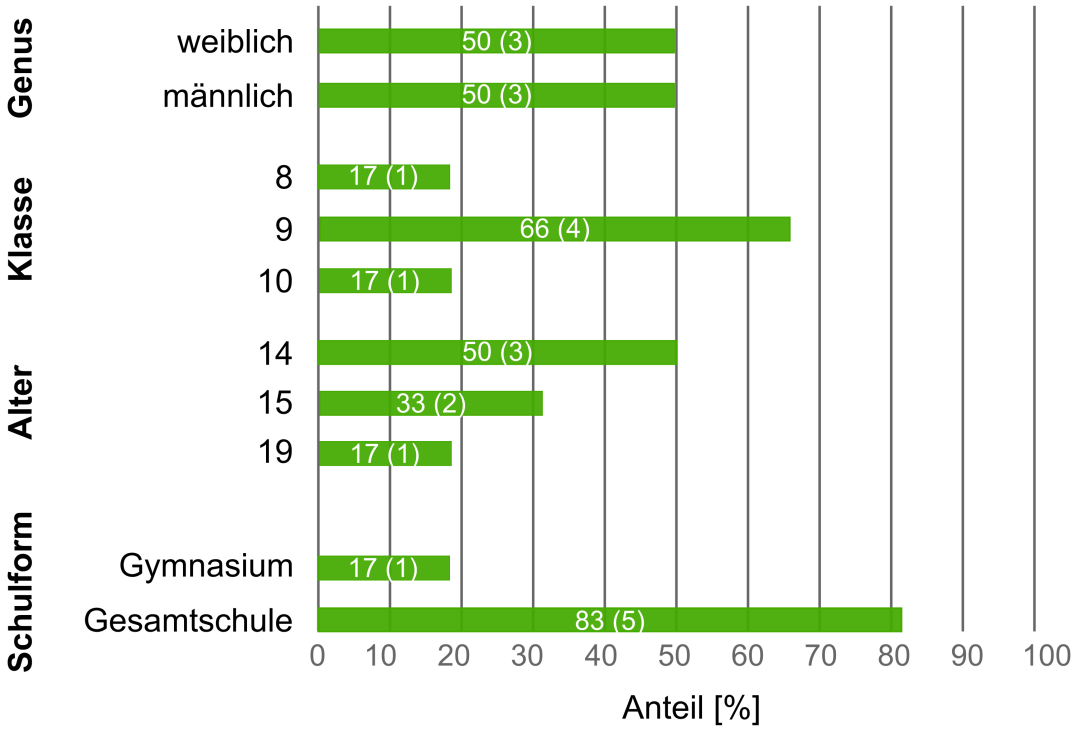



Abbildung F.2: Soziodemographie der Teilnehmenden am Lernarrangement *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

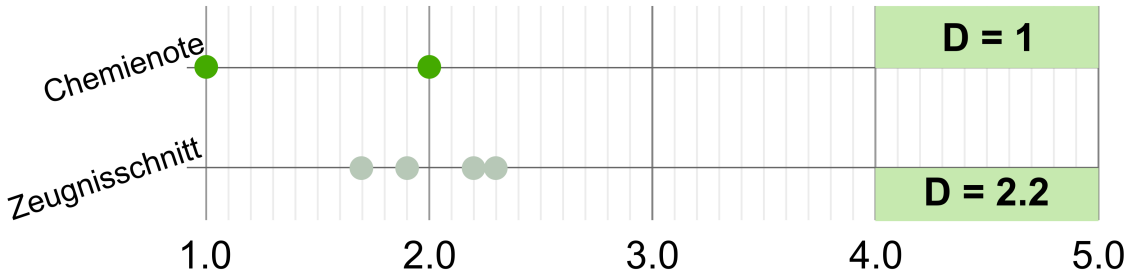



Abbildung F.3: Verteilung der Chemienoten der Kursteilnehmer des Lernarrangements *Brennstoffzellen weitergedacht!*.

| Note | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| letzte Chemienote | 50 (3) | 33 (2) | | | | 17 (1) |
| Zeugnisschnitt | | 83 (5) | | | | 17 (1) |

Tabelle F.9: Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!* im Fach Chemie. Gerundete Noten. n = 6

### F.1.3.2. Motivation zur Projektkursteilnahme

Warum nimmst du am Projektkurs teil?

| aus allgemeiner Neugierde | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 50 (3) | 33 (2) | 17 (1) | | | | |
| **weil ich in den Ferien nichts anderes zu tun habe** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 33 (2) | | | 17 (1) | 50 (3) | |
| **weil ich bereits öfter Junior Uni Kurse besucht habe** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 33 (2) | | 17 (1) | | | 50 (3) | |
| **wegen eines teilnehmenden Freundes** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 17 (1) | | | 17 (1) | 66 (4) | |
| **weil meine Eltern es möchten** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 17 (1) | | | | 17 (1) | 66 (4) | |
| **weil ich nach einer Studienperspektive suche** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 17 (1) | 17 (1) | | | 17 (1) | 50 (3) | |

Tabelle F.10: Beweggründe zur Teilnahme an *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

### F.1.3.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne

Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung. k.A. steht für *keine Angabe*.

| Ich mag das Fach Chemie. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 17 (1) | 33 (2) | 50 (3) | | | | |
| n(nach) | 50 (3) | 33 (2) | 17 (1) | | | | |

| Ich mag Naturwissenschaften. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 33 (2) | 17 (1) | 50 (3) | | | | |
| n(nach) | 33 (2) | 33 (2) | 33 (2) | | | | |

| In der Schule strenge ich mich im Chemieunterricht an. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 33 (2) | 17 (1) | | 33 (2) | 17 (1) | | |

| Chemie gehört zu den „schweren“ Schulfächern. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | | | | 33 (2) | | 66 (4) | |

| In der Schule behandeln wir zukunftsrelevante Themen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 17 (1) | 17 (1) | 17 (1) | 17 (1) | 17 (1) | 17 (1) | |

| Themen aus dem Chemieunterricht sind für meinen Alltag relevant. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | | | 50 (3) | | 17 (1) | 33 (2) | |

| Ich informiere mich in meiner Freizeit über naturwissenschaftliche Themen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 33 (2) | | | 17 (1) | 33 (2) | 17 (1) | |

Tabelle F.11: Persönliches Interesse der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

| Mindestens einer meiner Eltern interessiert sich für Naturwissenschaften. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 50 (3) | | 17 (1) | 17 (1) | 17 (1) | | |

| Mindestens einer meiner Elternteile hat beruflich mit Naturwissenschaften zu tun. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 33 (2) | | | | | 66 (4) | |

| Bei mir zuhause werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 17 (1) | 33 (2) | | | 17 (1) | 33 (2) | |

| In meinem Freundeskreis werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 33 (2) | | | 33 (2) | | 33 (2) | |

Tabelle F.12: Interesse des Umfeldes der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

| Ich möchte später studieren. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 50 (3) | 17 (1) | 17 (1) | | 17 (1) | | |
| n(nach) | 50 (3) | 17 (1) | | 33 (2) | | | |

| Ich möchte ein naturwissenschaftliches Studium aufnehmen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 17 (1) | | | 17 (1) | 17 (1) | 50 (3) | |
| n(nach) | 17 (1) | | | 50 (3) | | 33 (2) | |

| Ich möchte später einen naturwissenschaftlichen Beruf ergreifen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 17 (1) | | | 17 (1) | 17 (1) | 50 (3) | |
| n(nach) | 17 (1) | | 33 (2) | | 17 (1) | 33 (2) | |

Tabelle F.13: Zukunftspläne der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

| **Angabe** | **n(vor)** | **n(nach)** |
|---|---|---|
| Physik | 17 (1) | 17 (1) |
| Informatik | 17 (1) | 17 (1) |
| Architektur | 17 (1) | 17 (1) |
| keine | 50 (3) | 50 (3) |

Tabelle F.14: Geplante Studiengänge der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

### F.1.3.4. Feedback zum Lernarrangement

| Ich habe in dem Kurs viel dazugelernt. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 83 (5) | 17 (1) | | | | | |
| Die Experimente haben mir Spaß gemacht. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 50 (3) | 50 (3) | | | | | |
| Aus den Experimenten habe ich viel gelernt. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 83 (5) | 17 (1) | | | | | |
| Nach dem Kurs werde ich nochmal in das Skript schauen. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 83 (5) | 17(1) | | | | | |
| Ich interessiere mich jetzt für MINT. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| Freie Anmerkungen: Vielen Dank! Der Kurs hat mir sehr viel Spaß gemacht. | | | | | | | |
| Spannend und weiter so! | | | | | | | |
| Es war ein sehr netter und lustiger Kurs | | | | | | | |

Tabelle F.15: Feedback der Teilnehmenden von *Brennstoffzellen weitergedacht!*. n = 6

## F.2. Ergänzungen zu *Alleskönner Brennstoffzellen?!*

### F.2.1. Verlaufspläne der Einheiten

In den nachfolgenden Tabellen steht EA für Einzel-, PA für Partner- und GA für Gruppenarbeit.

| | **Inhalte** | **Sozialform** | **Materialien** |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung | Plenum | |
| | Erhebung von Interesse und Vorwissen | EA | Fragebogen |
| | Impuls: Notwendigkeit der Energiewende | Plenum | Gegenstände aus Erdölprodukten |
| | Erdölverbrauch vs. Ressourcen | | |
| **Erarbeitung** | SDG und Energiewende | EA, PA | E-Book |
| | Elektrochemische Grundbegriffe | EA | E-Book |
| | Funktionsweise von Brennstoffzellen | EA | E-Book |
| | Ist eine Metall-Luft-Zelle eine Brennstoffzelle? | PA | Experimentierset |
| **Sicherung** | Zusammenfassung der Einheit<br>Schwerpunkt: Funktion von Brennstoffzellen<br><br>Raum für offene Fragen | Plenum | E-Book |

Tabelle F.16: Verlaufsplan der ersten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

| | **Inhalte** | **Sozialform** | **Materialien** |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung | Plenum | |
| | Impuls: Artikel zu „Wasserstoff-Bussen“ der Wuppertaler Stadtwerke | EA/PA | E-Book |
| **Erarbeitung** | Betrieb des PEM-BZ-Modellautos | GA | Experimentierset |
| | Modellversuch zur Alkalischen Brennstoffzelle<br>Prozesse in den Brennstoffzellen | PA | Versuch<br>E-Book |
| | Recherche: Gewinnung von Wasserstoff<br>eventuell: Recherche zu „power-to-gas“ | EA<br>EA | E-Book, Handy<br>E-Book |
| **Sicherung** | Zusammenfassung der Einheit<br>Schwerpunkt: Ablaufende Reaktionen in den Modell-Brennstoffzellen<br><br>Raum für offene Fragen | Plenum | E-Book |

Tabelle F.17: Verlaufsplan der zweiten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| Einstieg | Begrüßung | Plenum | |
| | Impuls: Video | Plenum | Beamer |
| | MBZ-tonlos | PA | E-Book |
| Erarbeitung | Redox-Aktivität von Bäckerhefe | PA | Versuch |
| | Aufgaben zur Redox-Aktivität | PA | E-Book |
| | Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau | PA | Versuch |
| | Information zu Hefe in Brennstoffzellen | PA | E-Book |
| Sicherung | Zusammenfassung der Einheit | Plenum | E-Book |
| | Raum für offene Fragen | | |

Tabelle F.18: Verlaufsplan der dritten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| Einstieg | Begrüßung | Plenum | |
| | Aufgabenstellung | Plenum | |
| Erarbeitung | Elektrische Leistung | PA | E-Book |
| | Hefe-Brennstoffzelle im Zwei-Topf-Aufbau | PA | Versuch |
| | Aufgaben zur Hefe-Brennstoffzelle | PA | E-Book |
| | Erstellen von Concept-Maps zu mikrobiellen Brennstoffzellen | PA | E-Book |
| Sicherung | Wechselseitiges Vorstellen der Concept-Maps | Plenum | E-Books Beamer |
| | Raum für offene Fragen | | |

Tabelle F.19: Verlaufsplan der vierten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

| | Inhalte | Sozialform | Materialien |
|---|---|---|---|
| Einstieg | Begrüßung | Plenum | |
| | Vorstellung der Medizintechnik | Plenum | Beamer |
| Erarbeitung | Brennstoffzellen für den Einsatz im Körper | PA, GA | E-Book |
| | Brennstoffzellen zur Messung von Vitalwerten | PA, GA | E-Book |
| | Enzymatische Brennstoffzelle mit Lactase | PA | Versuch |
| Sicherung | Zusammenfassung der Einheit | Plenum | E-Book |
| | Raum für offene Fragen | | |

Tabelle F.20: Verlaufsplan der fünften Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

| | **Inhalte** | **Sozialform** | **Materialien** |
|---|---|---|---|
| **Einstieg** | Begrüßung<br><br>Zuweisung der Einheiten | Plenum | |
| **Erarbeitung** | Reflexion der Einheiten<br>Wiederholen des jeweiligen Versuchs | GA<br>GA | E-Book<br>E-Book |
| | Planen der Präsentation | GA | E-Book, Mindmap, Versuch |
| **Reflexion** | Wechselseitiges Vorstellen der Präsentationen<br><br><br>Raum für offene Fragen | Plenum | E-Books<br>Beamer |
| | Erhebung von Feedback und aktuellem Wissen | EA | Fragebogen |

Tabelle F.21: Verlaufsplan der sechsten Einheit *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

## F.2.2. Evaluation der Erprobung

Sofern nicht anders gekennzeichnet, erfolgen die Angaben in Prozent. Die absoluten Zahlen sind in Klammern ergänzt. k.A. steht für *keine Angabe*. Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung.

### F.2.2.1. Charakterisierung der Stichprobe

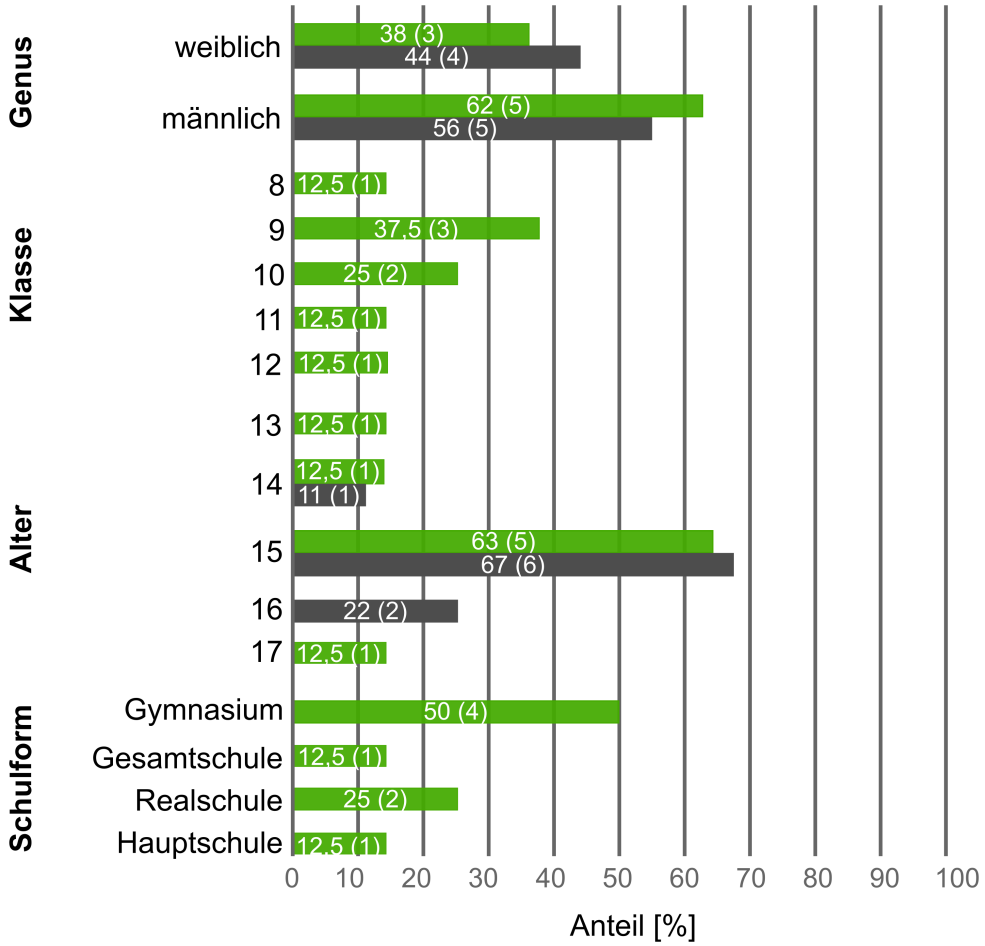



Abbildung F.4: Soziodemographie der Teilnehmenden am Lernarrangement *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. Grüne Balken entsprechen Vor-, graue der Nacherhebung.

Im Laufe des Kurses nahmen verschiedene Lernende teil, nicht alle Lernenden erschienen zu jedem Termin. Daher ist in Abb. F.4 sofern erfragt auch die Sozio-demografie derer aufgeführt, die an der Nacherhebung teilnahmen. Anhand der zugewiesenen Codes lies sich feststellen, dass fünf Personen sowohl an der Vor- als auch Nacherhebung teilgenommen haben. Sofern vergleichende Items an beiden

Zeitpunkten erhoben wurden, werden im Folgenden nur ihre Angaben berücksichtigt. Entsprechende Items sind in den Tabellen mit einem * gekennzeichnet.

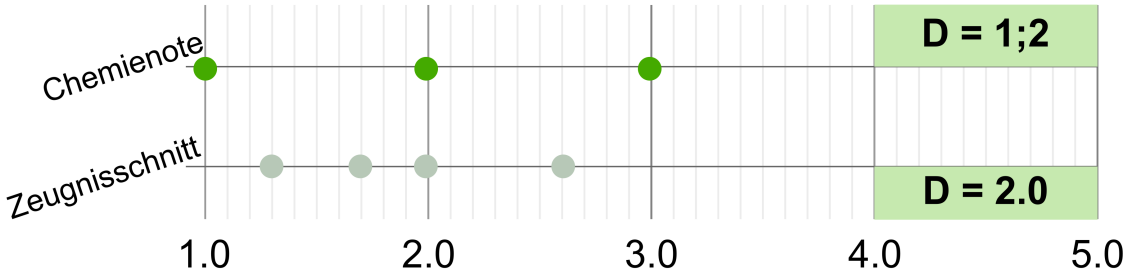



Abbildung F.5: Notenverteilung der Kursteilnehmer Lernarrangements *Alleskönner Brennstoffzellen?!*.

| Note | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| letzte Chemienote | 38 (3) | 38 (3) | 13 (1) | | | 13 (1) |
| Zeugnisschnitt | 13 (1) | 38 (3) | 13 (1) | | | 38 (3) |

Tabelle F.22: Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden von *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. Gerundete Noten. n = 8

### F.2.2.2. Motivation zur Projektkursteilnahme

Warum nimmst du am Projektkurs teil?

| aus allgemeiner Neugierde | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 62 (5) | 38 (3) | | | | | |
| **weil ich nichts anderes zu tun habe** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | | | | 25 (2) | 75 (6) | |
| **weil ich bereits öfter Junior Uni Kurse besucht habe** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 38 (3) | | | 25 (2) | 13 (1) | 13 (1) | 13 (1) |
| **wegen eines teilnehmenden Freundes** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 13 (1) | 13 (1) | | | 62 (5) | 13 (1) |
| **weil meine Eltern es möchten** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 13 (1) | | 13 (1) | 50 (4) | 25 (2) | |
| **weil ich nach einer Studienperspektive suche** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 13 (1) | 25 (2) | 25 (2) | 13 (1) | | 25 (2) | |

Tabelle F.23: Beweggründe zur Teilnahme an *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. n = 8

### F.2.2.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne

In Tabelle F.24 sind die Angaben aller Befragten zu ihrem persönlichen Interesse aufgeführt. Sofern eine Frage in der Vor- und Nacherhebung gestellt wurde, sind wieder beide Angaben zum Ablesen von Trends untereinander aufgeführt. Da die

| Ich finde meine Chemielehrkraft gut. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 50 (4) | | 13 (1) | 13 (1) | 13 (1) | | 13 (1) |
| *** Ich mag das Fach Chemie.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 60 (3) | 20 (1) | | 20 (1) | | | |
| n(nach) | 40 (2) | 20 (1) | | 40 (2) | | | |
| *** Ich mag Naturwissenschaften.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 60 (3) | 20 (1) | 20 (1) | | | | |
| n(nach) | 40 (2) | 40 (2) | | 20 (1) | | | |
| In der Schule strenge ich mich im Chemieunterricht an. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 25 (2) | 38 (3) | | 13 (1) | | | 25 (2) |
| Chemie gehört zu den „schweren“ Schulfächern. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | | | 13 (1) | 25 (2) | 25 (2) | 13 (1) | 25 (2) |
| In der Schule behandeln wir zukunftsrelevante Themen. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 13 (1) | 25 (2) | 13 (1) | 25 (2) | 13 (1) | | 13 (1) |
| Themen aus dem Chemieunterricht sind für meinen Alltag relevant. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 13 (1) | | 25 (2) | 25 (2) | | 13 (1) | 25 (1) |
| Ich informiere mich in meiner Freizeit über naturwissenschaftliche Themen. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 25 (2) | 38 (3) | 25 (2) | | 13 (1) | | |

Tabelle F.24: Persönliches Interesse der Teilnehmenden von *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. n = 8; *** n = 5**

Befragten der Vorerhebung nur zum Teil denen der Nacherhebung entsprechen, beziehen sich die mit * gekennzeichneten Items nur auf die fünf Teilnehmenden, die an beiden Zeitpunkten Angaben machten.

### F.2.2.4. Feedback zum Lernarrangement

In der Tabelle F.25 werden ausschließlich die Rückmeldungen derer aufgeführt, die sowohl bei Vor- als auch Nacherhebung anwesend waren, da sie den Kurs in Gänze besucht haben und somit bewerten können.

| Ich habe in dem Kurs viel dazugelernt. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 60 (3) | 20 (1) | 20 (1) | | | | |
| Die Experimente haben mir Spaß gemacht. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 80 (4) | 20 (1) | | | | | |
| Aus den Experimenten habe ich viel gelernt. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 40 (2) | 20 (1) | 20 (1) | | | | |
| Nach dem Kurs werde ich nochmal in das E-Book schauen. | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 60 (3) | 20 (1) | 20 (1) | | | | |
| Freie Anmerkungen: Ich fand es toll, dass die Frau das mit uns gemacht hat. | | | | | | | |

Tabelle F.25: Feedback der Teilnehmenden von *Alleskönner Brennstoffzellen?!*. n = 5

# F.3. Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I

## F.3.1. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung

Sofern nicht anders gekennzeichnet, erfolgen die Angaben in Prozent. Die absoluten Zahlen sind in Klammern ergänzt. k.A. steht für *keine Angabe*.
Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung.

### F.3.1.1. Charakterisierung der Stichprobe

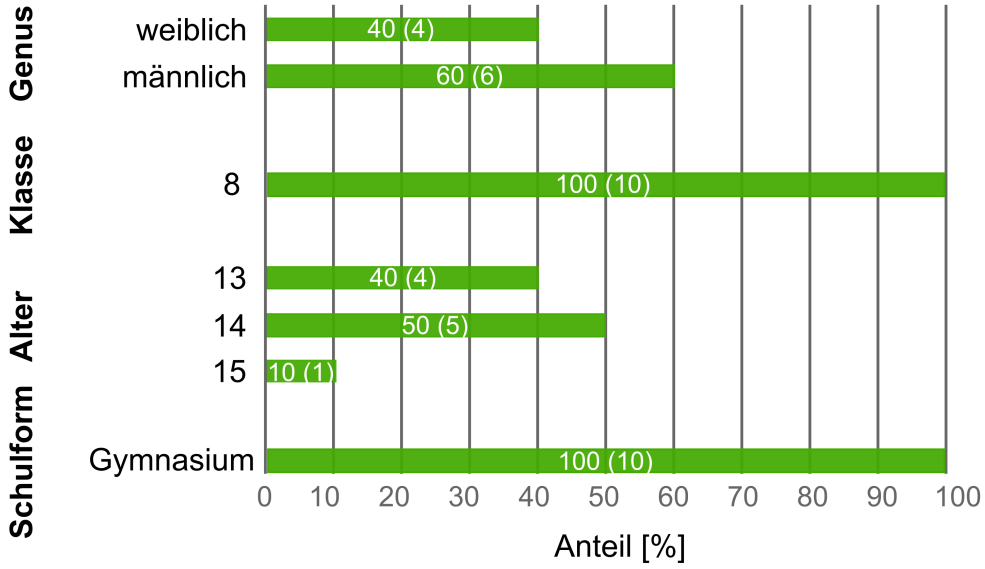



Abbildung F.6: Soziodemographie der Teilnehmenden am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I.

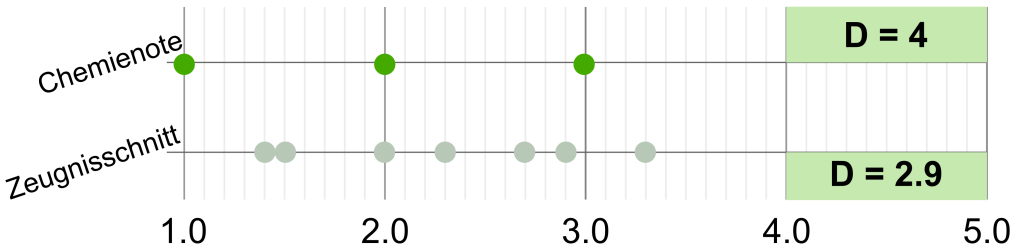



Abbildung F.7: Notenverteilung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I.

Die genaue Häufigkeit der Verteilung ist in Tabelle F.26 aufgeführt.

| Note | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| letzte Chemienote | 30 (3) | 40 (4) | 30 (3) | | | |
| Zeugnisschnitt | 10 (1) | 30 (3) | 60 (6) | | | |

Tabelle F.26: Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. Gerundete Noten. n = 10

### F.3.1.2. Motivation zur Teilnahme am Exkurs

| Warum nimmst du am Exkurs teil? | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| aus allgemeiner Neugierde | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 60 (6) | 10 (1) | 20 (2) | 10 (1) | | | |
| wegen eines teilnehmenden Freundes | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | | | 20 (2) | 20 (2) | 60 (6) | |
| weil meine Eltern es möchten | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | | | | 10 (1) | 90 (9) | |
| weil ich nach einer Studienperspektive suche | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 20 (2) | 30 (3) | 10 (1) | | 30 (3) | 10 (1) | |

Tabelle F.27: Beweggründe zur Teilnahme am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen. n = 10

### F.3.1.3. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne

| Ich finde meine Chemielehrkraft gut. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 50 (5) | 10 (1) | 30 (3) | | | | 10 (1) |

| Ich mag das Fach Chemie. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 30 (3) | 40 (4) | 10 (1) | 20 (1) | | | |
| n(nach) | 20 (2) | 30 (3) | 30 (3) | 20 (2) | | | |

| Ich mag Naturwissenschaften. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 30 (3) | 10 (1) | 40 (4) | 10 (1) | 10 (1) | | |
| n(nach) | 30 (3) | 10 (1) | 30 (3) | 20 (2) | 10 (1) | | |

| In der Schule strenge ich mich im Chemieunterricht an. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 30 (3) | 20 (2) | 30 (3) | 10 (1) | 10 (1) | | |

| Chemie gehört zu den „schweren“ Schulfächern. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 10 (1) | 20 (2) | | 10 (1) | 40 (4) | 10 (1) | 10 (1) |

| In der Schule behandeln wir zukunftsrelevante Themen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 30 (3) | 10 (1) | 10 (1) | 20 (2) | 20 (2) | 10 (1) | |

| Themen aus dem Chemieunterricht sind für meinen Alltag relevant. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 10 (1) | 10 (1) | 40 (4) | 10 (1) | 10 (1) | 20 (2) | |

| Ich informiere mich in meiner Freizeit über naturwissenschaftliche Themen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | | 20 (2) | 10 (1) | 10 (1) | 20 (2) | 40 (4) | |

Tabelle F.28: Persönliches Interesse der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. n = 10

| Mindestens einer meiner Eltern interessiert sich für Naturwissenschaften. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 40 (4) | 20 (2) | 10 (1) | | 10 (1) | 20 (2) | |

| Mindestens einer meiner Elternteile hat beruflich mit Naturwissenschaften zu tun. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 10 (1) | | | | 10 (1) | 70 (7) | 10 (1) |

| Bei mir zuhause werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 10 (1) | 20 (2) | 20 (2) | 10 (1) | 20 (2) | 20 (2) | |

| In meinem Freundeskreis werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 10 (1) | | 10 (1) | 10 (1) | 10 (1) | 60 (6) | |

Tabelle F.29: Interesse des Umfeldes der Teilnehmenden der Sekundarstufe I. n = 10

| Ich möchte später studieren. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 70 (7) | 10 (1) | 20 (1) | | | | |
| n(nach) | 60 (6) | 10 (1) | 10 (1) | | 20 (2) | | |

| Ich möchte ein naturwissenschaftliches Studium aufnehmen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 10 (1) | | 10 (1) | 40 (4) | 10 (1) | 30 (3) | |
| n(nach) | 10 (1) | | 40 (4) | 20 (2) | 10 (1) | 30 (3) | |

| Ich möchte später einen naturwissenschaftlichen Beruf ergreifen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 10 (1) | | 10 (1) | 50 (5) | 10 (1) | 30 (3) | |
| n(nach) | 10 (1) | | 30 (3) | 30 (3) | 10 (1) | 20 (2) | |

Tabelle F.30: Zukunftspläne der Teilnehmenden der Sekundarstufe I. n = 10

| **Angabe** | **n(vor)** | **n(nach)** |
|---|---|---|
| Architektur | 10 (1) | 10 (1) |
| Deutsch (Lehramt) | 10 (1) | 10 (1) |
| Medizin | 10 (1) | 10 (1) |
| Sport | 20 (2) | 20 (2) |
| keine | 50 (5) | 50 (5) |

Tabelle F.31: Geplante Studiengänge der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe I. n = 10

### F.3.1.4. Feedback zum Lernarrangement durch die Lernenden

| Ich habe in dem Kurs viel dazugelernt. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 40 (4) | 40 (4) | 20 (2) | | | | |
| **Die Experimente haben mir Spaß gemacht.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 50 (5) | 50 (5) | | | | | |
| **Aus den Experimenten habe ich viel gelernt.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 20 (2) | 70 (7) | | 10 (1) | | | |
| **Nach dem Kurs werde ich nochmal in das E-Book schauen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 20 (2) | 30 (3) | 40 (4) | 10 (1) | | | |
| Freie Anmerkungen: Es war sehr interessant, nur bisschen viele Infos auf einmal. | | | | | | | |

Tabelle F.32: Feedback der Teilnehmenden am Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe I. n = 10

### F.3.1.5. Feedback zum Lernarrangement durch die Lehrkraft

| Wie war Ihr Eindruck von dem Experiment zur Redox-Aktivität von Bäckerhefe? | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Das Experiment kann selbstständig durchgeführt werden.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 1 | | | | | | |
| **Das Experiment liefert eine klare Beobachtung.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 1 | | | | | | |
| **Aus dem Experiment kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 1 | | | | | |

Tabelle F.33: Eindruck einer Lehrkraft vom Experiment zur Redox-Aktivität von Bäckerhefe. n = 1

Wie war Ihr Eindruck von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle?

Das Experiment kann selbstständig durchgeführt werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | | 1 | | | | |

Das Experiment liefert eine klare Beobachtung.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | | 1 | | | | |

Aus dem Experiment kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | | 1 | | | | |

Freie Anmerkungen:
Die Erkenntnis im 1-Topf-Experiment ist zu wenig anders.

Tabelle F.34: Eindruck einer Lehrkraft von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle. n = 1

Wie war Ihr Eindruck von dem Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle?

Das Experiment kann selbstständig durchgeführt werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | | | 1 | | | |

Das Experiment liefert eine klare Beobachtung.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | | | 1 | | | |

Aus dem Experiment kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | | 1 | | | | |

Freie Anmerkungen:
Meine Schüler waren dafür zu unkonzentriert.

Tabelle F.35: Eindruck einer Lehrkraft von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle. n = 1

Wie war Ihr Eindruck von den Materialien des Kurstages?

| Die Materialien sind übersichtlich gestaltet. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 1 | | | | | |
| **Die Materialien sind verständlich aufgebaut.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 1 | | | | | |
| **Lernende können anhand der Materialien die Durchführung umsetzen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 1 | | | | | |
| **Lernende können die Beobachtungsaufträge der Materialien erfüllen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 1 | | | | | |
| **Lernende können die Auswertungsaufträge der Materialien erfüllen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | | 1 | | | | | |

Tabelle F.36: Eindruck einer Lehrkraft von den Materialien. n = 1

# F.4. Exkurs zu biologischen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II

## F.4.1. Eindrücke aus der didaktischen Begleitforschung

Sofern nicht anders gekennzeichnet, erfolgen die Angaben in Prozent. Die absoluten Zahlen sind in Klammern ergänzt. k.A. steht für *keine Angabe*.
Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung.

### F.4.1.1. Charakterisierung der Stichprobe

Zur ersten Doppelstunde des Lernarrangements erschienen 17 Lernende im Alter von 17 - 19 Jahren. Zur abschließenden Einzelstunde erschienen 16 Lernende. Bei Items, die in der Vor- und Nacherhebung erhoben wurden sowie dem Feedback, werden nur die Angaben der 15 Teilnehmenden berücksichtigt, die zu beiden Terminen anwesend waren.

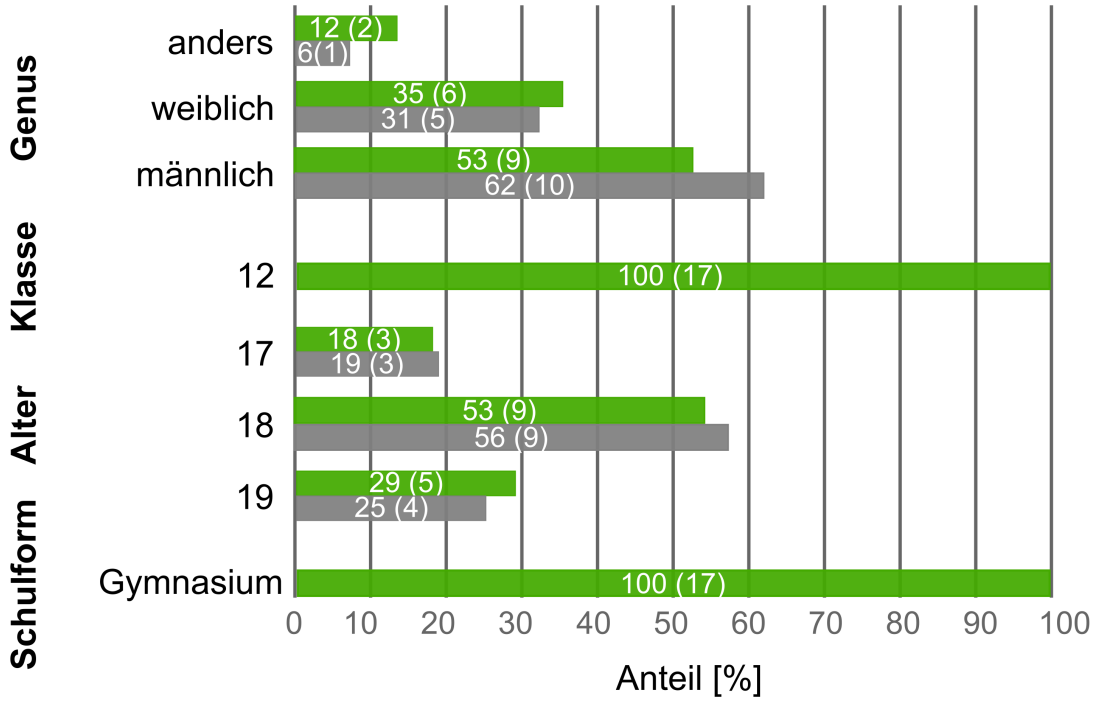



Abbildung F.8: Soziodemographie der Teilnehmenden am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II. Grüne Balken entsprechen Vor-, graue der Nacherhebung.

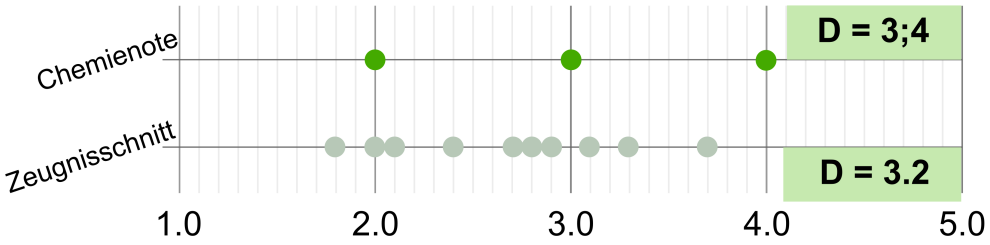



Abbildung F.9: Notenverteilung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II.

| Note | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| letzte Chemienote | | 18 (3) | 41 (7) | 41 (7) | | |
| Zeugnisschnitt | | 29 (5) | 59 (10) | 12 (2) | | |

Tabelle F.37: Vorhergehende Benotung der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. Gerundete Noten. n = 17

### F.4.1.2. Persönliches Interesse, Umfeld und Zukunftspläne

| Ich finde meine Chemielehrkraft gut. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 65 (11) | 24 (4) | 6 (1) | | | | 6 (1) |

| *** Ich mag das Fach Chemie.** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 7 (1) | 40 (6) | 13 (2) | 13 (2) | 7 (1) | 20 (3) | |
| n(nach) | 27 (4) | 31 (5) | 29 (3) | | 13 (2) | 7 (1) | |

| *** Ich mag Naturwissenschaften.** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 53 (8) | 27 (4) | 7 (1) | 13 (2) | | | |
| n(nach) | 47 (7) | 31 (5) | 7 (1) | 13 (2) | | | |

| In der Schule strenge ich mich im Chemieunterricht an. |
|---|

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n(vor) | 6 (1) | 35 (6) | 35 (6) | 6 (1) | 18 (3) | | |

Chemie gehört zu den „schweren“ Schulfächern.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n(vor) | 41 (7) | 29 (5) | | 6 (1) | 12 (2) | 12 (2) | |

In der Schule behandeln wir zukunftsrelevante Themen.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n(vor) | 24 (4) | 35 (6) | 24 (4) | 6 (1) | | 18 (3) | |

Themen aus dem Chemieunterricht sind für meinen Alltag relevant.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n(vor) | 12 (2) | 12 (2) | 41 (7) | 24 (4) | 12 (2) | | |

Ich informiere mich in meiner Freizeit über naturwissenschaftliche Themen.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n(vor) | 12 (2) | 18 (3) | 24 (4) | 35 (6) | 6 (1) | 6 (1) | |

Tabelle F.38: Persönliches Interesse der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. n = 17; *** n = 15**

Mindestens einer meiner Eltern interessiert sich für Naturwissenschaften.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 24 (4) | 6 (1) | 18 (3) | 6 (1) | 6 (1) | 41 (7) | |

Mindestens einer meiner Elternteile hat beruflich mit Naturwissenschaften zu tun.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 18 (3) | 12 (2) | 6 (1) | | | 65 (11) | |

Bei mir zuhause werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 12 (2) | 6 (1) | 35 (6) | 18 (3) | 6 (1) | 24 (4) | |

In meinem Freundeskreis werden naturwissenschaftliche Themen angesprochen.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 6 (1) | 12 (2) | 18 (3) | 29 (5) | 6 (1) | 18 (3) | 12 (2) |

Tabelle F.39: Interesse des Umfeldes der Teilnehmenden der Sekundarstufe II. n = 17

| *** Ich möchte später studieren.** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 47 (7) | 6 (1) | 12 (2) | 12 (2) | 18 (3) | | |
| n(nach) | 47 (7) | 6 (1) | 18 (3) | | 24 (4) | | |
| *** Ich möchte ein naturwissenschaftliches Studium aufnehmen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 18 (3) | | 6 (1) | 12 (2) | 18 (3) | 29 (5) | |
| n(nach) | 18 (3) | | | 18 (3) | 24 (4) | 29 (5) | |
| *** Ich möchte später einen naturwissenschaftlichen Beruf ergreifen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n(vor) | 24 (4) | 6 (1) | 6 (1) | 6 (1) | 6 (1) | 47 (7) | |
| n(nach) | 24 (4) | | 6 (1) | 12 (2) | 24 (4) | 24 (4) | |

Tabelle F.40: Zukunftspläne der Teilnehmenden der Sekundarstufe II. * n = 15

| **Angabe** | **n(vor)** | **n(nach)** |
|---|---|---|
| BWL | 7 (1) | 7 (1) |
| Chemie | | 7 (1) |
| Immobilienmanagement | 7 (1) | 7 (1) |
| Mathematik | 7 (1) | 7 (1) |
| Medizin | 7 (1) | 7 (1) |
| Physik | 7 (1) | 7 (1) |
| Soziologie | 7 (1) | |
| Sport | 7 (1) | 12 (2) |
| Tourismuswirtschaft | 7 (1) | 7 (1) |
| Wirtschaftsinformatik | 7 (1) | 7 (1) |
| keine | 40 (6) | 33 (5) |

Tabelle F.41: Geplante Studiengänge der Teilnehmenden aus der Sekundarstufe II. n = 15

### F.4.1.3. Feedback durch die Lernenden

| Ich habe in dem Kurs viel dazugelernt. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 40 (6) | 27 (4) | 27 (4) | | 7 (1) | | |
| **Die Experimente haben mir Spaß gemacht.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 73 (11) | 13 (2) | 7 (1) | 7 (1) | | | |
| **Aus den Experimenten habe ich viel gelernt.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 27 (4) | 40 (6) | 13 (2) | 13 (2) | 7 (1) | | |
| **Nach dem Kurs werde ich nochmal in das E-Book schauen.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 27 (4) | 27 (4) | 20 (3) | 7 (1) | 7 (1) | 7 (1) | |

Freie Anmerkungen:

Die 3 Unterrichtsstunden waren sehr erkenntnisreich und hat nochmal das allgemeine Thema zu der Brennstoffzelle gut wiederholt.

Die Experimente waren gut durchführbar und das Quiz war auch sehr angenehm.

sehr effektiv und verständlich

Gute, verständliche Struktur im E-Book / sehr übersichtlich

Die Fotodokumentation war sehr hilfreich.

Gute Abwechslung gegen Ende der Schulzeit

Tabelle F.42: Feedback der Teilnehmenden am Exkurs zu mikrobiellen Brennstoffzellen für die Sekundarstufe II. n = 15

## F.5. Ergänzungen zur Lehrkräftefortbildung

### F.5.1. Evaluation der Erprobungen

Sofern nicht anders gekennzeichnet, erfolgen die Angaben in Prozent. Die absoluten Zahlen sind in Klammern ergänzt. k.A. steht für *keine Angabe*.
Die tabellarisch aufgeführten Items sind Likert-skaliert. 6 entspricht der vollen Zustimmung und 1 der Ablehnung.

#### F.5.1.1. Charakterisierung der Stichprobe

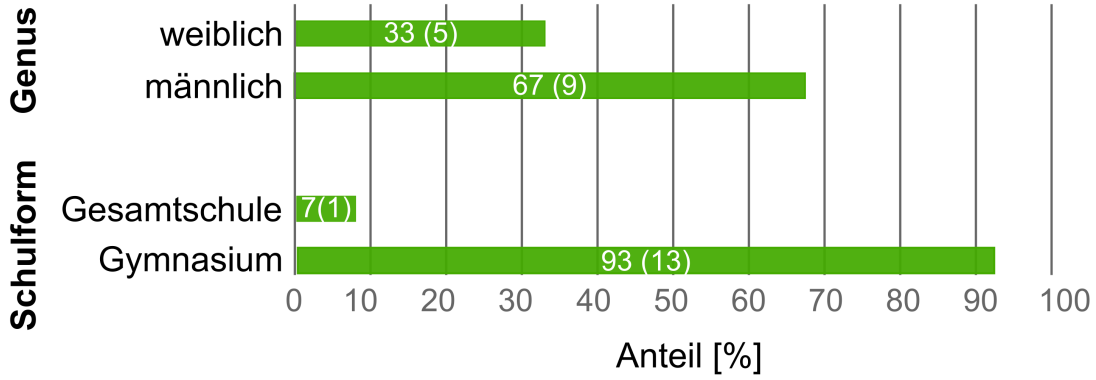



Abbildung F.10: Soziodemographie der teilnehmenden Lehrkräfte.

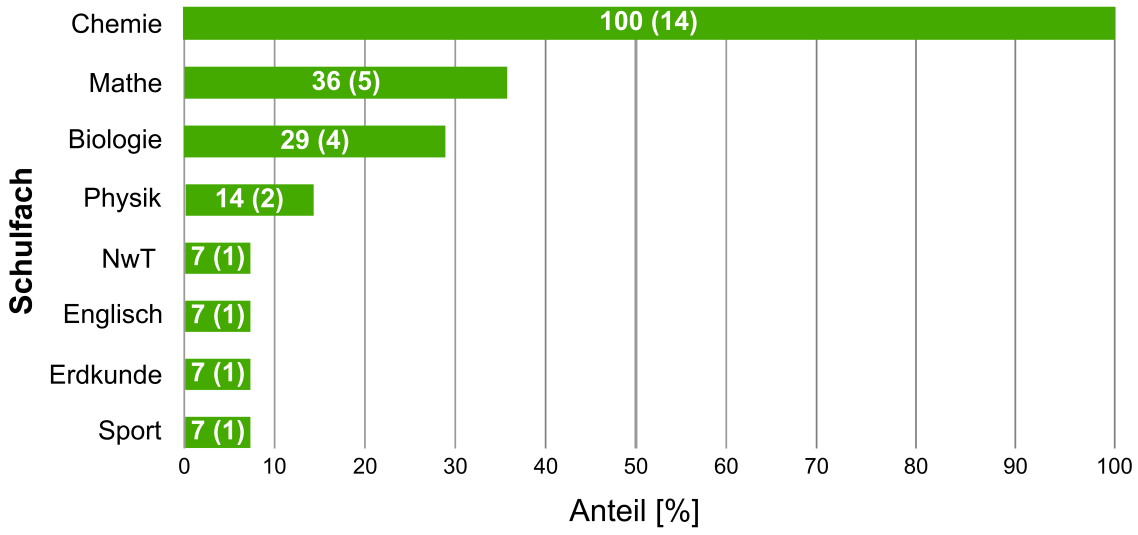



Abbildung F.11: Durch die Lehrkräfte unterrichtete Schulfächer.

### F.5.1.2. Eindrücke von den Experimenten

Wie war Ihr Eindruck von den Experimenten zur alkalischen Brennstoffzelle?

Die Experimente können selbstständig durchgeführt werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 50 (7) | 36 (5) | | 1 | | | 14 (2) |

Die Experimente liefern eine klare Beobachtung.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 57 (8) | 21 (3) | | 7 (1) | | | 14 (2) |

Aus den Experimenten kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 50 (7) | 29 (4) | | 7 (1) | | | 14 (2) |

Freie Anmerkungen:
Verbraucher schwer zu besorgen

Tabelle F.43: Eindruck der Lehrkräfte von den Experimenten zur alkalischen Brennstoffzelle. n = 14

Wie war Ihr Eindruck vom Experiment zur alkoholischen Brennstoffzelle?

Das Experiment kann selbstständig durchgeführt werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 36 (5) | 29 (4) | 14 (2) | 7 (1) | | | 14 (2) |

Das Experiment liefert eine klare Beobachtung.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 21 (3) | 7 (1) | | 29 (4) | 21 (3) | 7 (1) | 14 (2) |

Aus dem Experiment kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 14 (2) | 21 (3) | 29 (4) | 14 (2) | 7 (1) | | 14 (2) |

Freie Anmerkungen:
(1.) Der Versuch hat heute nicht funktioniert. Nicht so schlimm, denn es gab vertiefte Diskussionen über Aufbau, Funktion und Erwartbares. Schön!
(2.) Rasierfolien schwer zu besorgen

Tabelle F.44: Eindruck der Lehrkräfte vom Experiment zur alkoholischen Brennstoffzelle. n = 14

Wie war Ihr Eindruck von den Experimenten zur mikrobiellen Brennstoffzelle?

Die Experimente können selbstständig durchgeführt werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 64 (9) | 14 (2) | | | | | 21 (3) |

Die Experimente liefern eine klare Beobachtung.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 57 (8) | 14 (2) | 7 (1) | | | | 21 (3) |

Aus den Experimenten kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 57 (8) | 14 (2) | 7 (1) | | | | 21 (3) |

Freie Anmerkungen:

sehr schöner Versuch

Tabelle F.45: Eindruck der Lehrkräfte von den Experimenten zur Hefe-Brennstoffzelle. n = 14

Wie war Ihr Eindruck von dem Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle?

Das Experiment kann selbstständig durchgeführt werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 57 (8) | 14 (2) | 21 (3) | 7 (1) | | | |

Das Experiment liefert eine klare Beobachtung.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 36 (5) | 29 (4) | 29 (4) | | | | 7 (1) |

Aus dem Experiment kann eine klare Erkenntnis gewonnen werden.

| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | 50 (7) | 21 (3) | 14 (2) | | 7 (1) | | 7 (1) |

Freie Anmerkungen:
(1.) auch ein sehr schöner Versuch
(2.) Anleitung mit mehr Bildern wäre übersichtlicher
(3.) Die Versuchsanleitung sollte überarbeitet werden (für eine BZ)
(4.) um Messwerterfassungssystem zur Diagrammerstellung
im Unterricht ergänzbar

Tabelle F.46: Eindruck der Lehrkräfte vom Experiment zur enzymatischen Brennstoffzelle. n = 14

### F.5.1.3. Eindrücke vom Material

Wie war Ihr Eindruck von den Materialien des Kurstages?

| Die Materialien sind übersichtlich gestaltet. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 38 (5) | 38 (5) | 21 (3) | 7 (1) | | | |

| Die Materialien sind verständlich aufgebaut. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 29 (4) | 38 (5) | 29 (4) | 7 (1) | | | |

| Die Infotexte vorab liefern einen guten ersten Überblick über das jeweilige System. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 38 (5) | 29 (4) | 14 (2) | | 7 (1) | | 14 (2) |

| Lernende können anhand der Materialien die Durchführung umsetzen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 38 (5) | 21 (3) | 38 (5) | 7 (1) | | | |

| Lernende können die Beobachtungsaufträge der Materialien erfüllen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 29 (4) | 50 (7) | 14 (2) | | 7 (1) | | |

| Lernende können die Auswertungsaufträge der Materialien erfüllen. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 29 (4) | 21 (3) | 14 (2) | | 7 (1) | | 29 (4) |

Freie Anmerkungen:
(1.) manchmal etwas umständlich geschrieben
(2.) Heft ja, laminierte Informationen nicht immer
(3.) Versuchsanleitungen als interaktives Video mit H5P erstellen optional zur Fotodokumentation

Tabelle F.47: Eindruck der Lehrkräfte von den Materialien zur Fortbildung. n = 14

### F.5.1.4. Persönliches Resultat

Bitte nennen Sie Ihre persönliche Einschätzung.

| Wie bewerten Sie den Workshop im Allgemeinen? | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 57 (8) | 43 (6) | | | | | |
| **Die Inhalte sind für den Chemieunterricht relevant.** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 43 (6) | 43 (6) | 14 (2) | | | | |
| **Werden Sie die Experimente aus dem Workshop in Ihrem CU einzusetzen?** | | | | | | | |
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | k.A. |
| n | 57 (8) | 21 (3) | 14 (2) | | | | 7 (1) |

Freie Anmerkungen:

Dankeschön! Hat Spaß gemacht

Tabelle F.48: Persönliches Resultat der Lehrkräfte von den zur Fortbildung. n = 14