

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Chemie und Pharmazie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

**Didaktische Rekonstruktion aktueller Fachforschung zu
modernen Materialien sowie Durchführung und
Evaluation eines Lehrkräftefortbildungskonzepts zum
Thema Nachhaltigkeit**

DOMINIK MAXIMILIAN FELIX DIEKEMPER

aus

München, Deutschland

2021

Erklärung

Diese Dissertation wurde im Sinne von § 7 der Promotionsordnung vom 28. November 2011 von Herrn Prof. Dr. Stefan Schwarzer betreut.

Eidesstattliche Versicherung

Diese Dissertation wurde eigenständig und ohne unerlaubte Hilfe erarbeitet.

München, 02.10.2021

.....
Dominik Diekemper

Dissertation eingereicht am 04.08.2021

1. Gutachter: Prof. Dr. Stefan Schwarzer

2. Gutachter: Prof. Dr. Ekkehard Geidel

Mündliche Prüfung am 29.09.2021

„You can't stop a teacher
when they want to do something.

They just *do* it”

JEROME D. SALINGER

Danksagung

Auch wenn meine Lateinkarriere keine Sternstunde darstellt, traue ich mich festzuhalten, dass das Wort Promotion von *promovere* abstammt und damit etwas mit „befördern“ zu tun hat.

Mein größter und erster Dank gilt deshalb Professor Stefan Schwarzer zuallererst für die Idee aus der Labor-Hilfskraft einen Doktoranden zu machen und damit der Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Arbeitsgruppe anzufertigen. Vielen Dank Stefan, für die vielen Freiheiten meinen Ideen nachgehen zu können und die vielen Möglichkeiten in der Anfertigung dieser Dissertation!

Mein Dank gilt auch Professor Ekkehard Geidel, der die Anfertigung des Zweitgutachtens übernimmt und für meine Fortbildung in Würzburg, die dem Lockdown ausnahmsweise nicht zum Opfer fiel.

Für all meine Experimente, aber auch Gespräche und meinen Humor (...) war Gudrun Baltjans Labor immer offen. Dein unglaublicher Wissensschatz zu Experimenten, dem Umgang mit Chemikalien und dem richtigen Arbeiten im Labor lässt sich in Kürze kaum in Worte fassen. Danke Gudrun, für das alles. Das ist unbezahlbar.

Für viele unterhaltsame und immer wieder auch tiefgreifenden Gespräche, gemeinsame „Käff“-Pausen und andere „Unternehmungen“ vielen Dank an dich, Sezen „Seschen“ Hollweck.

Meinen Kollegen und Mitstreitern, Michael „Wunderkerze“ Scheid und Lisa „Siemens“ Knie meinen größten Dank für die Zusammenarbeit und, dass wir uns gegenseitig am Laufen hielten.

Nicht unerwähnt bleiben darf Dr. rer. nat. Benjamin Pölloth, postdoctoral researcher und einziger Wissenschaftlicher Mitarbeiter in Tübingen. Vielen Dank für deinen Input, die guten Gespräche und die gute Tü-Zeit!

Der gesamten Arbeitsgruppe an der LMU München und der Universität Tübingen: Danke für alles!

Vieles an so einer Arbeit macht sich schwer von allein, deshalb vielen Dank „meinen“ studentischen Hilfskräften Lena Baumgartner und Tessa Ott für ihre Hilfe bei meinen Arbeiten!

Ich danke auch meinen Zulassungskandidaten Andreas Steiger für die Arbeiten an Hydroxytyrosol, Jakob Mühlbauer für die Interviewstudie und Michaela Mair für die

Laborarbeit an Lignin aus Miscanthus. Ich bin sicher, ihr werdet Teile eurer Beschäftigung in dieser Arbeit erkennen können! Vielen Dank!

Oft wird behauptet, eine Promotion wäre „allumfassend“. Ich kann dies nur bestätigen. Was mir vermutlich – auch wenn ich es versucht habe – nicht gelingt, ist eine allumfassende Danksagung. Zu viele Menschen nehmen in dieser Phase „umfassend“ Teil an so einem Werk und einem Doktorandenleben. Auch allen nicht namentlich erwähnten an dieser Stelle also ein „Danke“ (bayerisch) oder „Danke“ (schwäbisch). Je nachdem, wo wir aufeinandergetroffen sind.

Auch außerhalb der Uni gibt es Menschen, die so eine Promotionszeit erst möglich machen. Danke an meine Mutter, meine Familie und an all meine Freunde für eure Unterstützung und für die schöne gemeinsame Zeit. Ich bin froh, Menschen wie euch alle um mich haben zu dürfen! Hier steckt auch viel von euch drin.

Kurzfassung

Die Naturwissenschaft Chemie und ihre Forschung leisten einen wesentlichen Beitrag zu Grundfragen unserer gemeinsamen Zukunft. Schülerinnen und Schüler erlernen im Chemieunterricht unter anderem Fachwissen und grundlegende Experimentierkompetenz. Der innovative Charakter der Chemie sowie ein authentisches Bild der gegenwärtigen chemischen Forschung stehen dabei bisweilen aber nicht im Vordergrund. Gleichzeitig sind in Wissenschaft, Politik und Gesellschaft Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung ein Schlüsselthema und im Schulunterricht durch Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) verankert. Erkenntnisse der chemischen Forschung nehmen dabei eine Schlüsselrolle für eine nachhaltige Entwicklung ein.

Forschungsziel der vorliegenden Arbeit ist die chemiedidaktische Rekonstruktion aktueller Fachforschung für die Lernorte Schule und Schülerlabor in Form von schulgeeigneten Experimenten. Das Anknüpfen an zeitgemäße Forschung ermöglicht dabei, den nachhaltigen und fortschrittlichen Charakter der Chemie im Schulunterricht zu implementieren und so Aktualität, Nachhaltigkeit und zukunftsweisende Forschung zu verknüpfen.

In Kooperation mit der Fachforschung und der Industrie erschließt diese Forschungsarbeit neue und alltagsnahe Themengebiete für den Chemieunterricht durch die Konzeption innovativer Experimente. Dabei stellt sich die Frage, wie es gelingen kann, aktuelle chemische Forschung in den Schulunterricht zu transferieren. Aus diesem Grund findet eine Evaluation der Entwicklungsarbeit in der dritten Phase der Lehrkräftebildung statt.

Die chemiedidaktischen Eckpfeiler dieser Arbeit bilden didaktische Rekonstruktion, BnE und Lehrkräftefortbildung.

Der Bildungswert der Nachhaltigkeit und einer nachhaltigen Entwicklung lassen sich bereits aus grundsätzlichen Bildungstheorien ableiten. Neben einem klaren Begriffsverständnis der Nachhaltigkeit als Grundlage für die vorliegenden Arbeit ist Ziel auch das Konzept Bildung für nachhaltige Entwicklung darzustellen und Möglichkeiten für das Unterrichtsfach Chemie im Zusammenhang mit epistemologischen Überzeugungen zu erörtern. Als Symbiose der vorangestellten Theorien können moderne Materialien als Thema im Chemieunterricht besprochen werden. Eine qualitative Interviewstudie ermöglicht einen Einblick in die Einschätzungen von aktiven Lehrkräften zum Thema Nachhaltigkeit im Chemieunterricht. Zur Evaluation der neu entwickelten Experimente dient die Lehrkräftefortbildung als dritte Phase der Lehrkräftebildung in Deutschland. Aufbauend auf der Grundlage der dargestellten Evidenzen und Konzepte der bildungswissenschaftlichen Forschung wurde eine Fortbildungsveranstaltung zu den entwickelten Experimenten für Lehrkräfte der Sekundarstufe II entwickelt. Zur Sicherung des Transfers der Fortbildungsinhalte in den Schulunterricht dienen Experimentiersets und die Kooperation mit dem Industriepartner WACKER.

Im Zentrum der vorliegenden Forschungsarbeit stehen die neu konzipierten Experimente für Schule und Schülerlabor. Die Experimente werden in einem größtenteils publikationsbasierten Kapitel vorgestellt.

So wurde ausgehend von Forschungsprojekten zu energieeffizienten Leuchtstoffen für LEDs eine schulgeeignete, mikrowellenbasierte Synthese des LED-Leuchtstoffes YAG:Ce³⁺ entwickelt.¹ Die Synthesemethode konnte auf weitere Leuchtstoffe und lumineszierende Materialien wie YAG:Eu³⁺, TAG:Ce³⁺ und BAM:Eu²⁺ erweitert werden.² Zusammen mit dem Industriepartner WACKER wurden neuartige Experimente zum modernen und alltagsnahen Antioxidans Hydroxytyrosol konzipiert. Mit einem Schulversuchskoffer für Lehrkräfte werden anhand der Modellsubstanz mit Bezug zur Nachhaltigkeit die chemischen Eigenschaften von Antioxidantien erläutert.³ Neben einem Experiment zur persistenten Anreicherung des Analgetikums Diclofenac in Oberflächengewässern und die mögliche Beseitigung im Rahmen einer vierten, aktivkohlebasierten Reinigungsstufe in Klärwerken wurde eine schulgeeignete Extraktionsmethode von Lignin und Cellulose aus der Pflanze *Miscanthus giganteus* als nachwachsender Rohstoff entwickelt.

Die Evaluation der Experimente im Rahmen von standortübergreifenden Lehrkräftefortbildungen zum Thema „Moderne Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“ zeigt die große Offenheit der Lehrkräfte zum Thema, die Notwendigkeit weiterer gezielter Fortbildungen und grundsätzliche Tauglichkeit der im Rahmen dieser Dissertation vorgestellten Experimente im Chemieunterricht.

¹ Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, and Stefan Schwarzer. *Journal of Chemical Education* 2019 96 (12), 3018-3024 DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00464.

² Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, Stefan Schwarzer. *CHEMKON* 2021 DOI: 10.1002/ckon.202000033.

³ Dominik Diekemper, Benjamin Pölloth and Stefan Schwarzer. *Journal of Chemical Education* 2021 98 (8), 2610-2617 DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c00157.

Summary

The science of chemistry and its research contribute significantly to the fundamental questions of our collective future. In chemistry lessons, students learn scientific knowledge and gain competences such as basic experimentation skills. However, the innovative character of chemistry and the authentic representation of current chemical research are often neglected. At the same time, sustainability and sustainable development are central topics in science, politics, and society and are anchored in the school curriculum through Education for Sustainable Development (ESD). Results obtained in chemical research: thus play a key role in sustainable development.

The research objective of the present dissertation was the didactic reconstruction of current chemical research for schools and student laboratories by means of school-appropriate experiments. The connection to contemporary research makes it possible to illustrate the sustainable and progressive character of chemistry in school lessons and, thus, to link topicality, sustainability, and future-oriented research.

In cooperation with scientific research and industry, this research explored new, everyday topics for chemistry instruction by conceptualizing innovative experiments. Thereby, the question arose of how to successfully transfer current chemical research into the school curriculum. Consequently, the development work was evaluated in the third phase of teacher training. The chemistry-didactic cornerstones of this work include didactic reconstruction, ESD, and teacher training.

The educational value of sustainability and sustainable development can already be derived from basic educational theories. In addition to providing a precise definition of the concept of sustainability, which formed the basis for the present work, the aim was also to present ESD and to discuss possibilities for the school subject chemistry in connection with epistemological convictions. As a symbiosis of the preceding theories, modern materials can be addressed as a subject in chemistry education. A qualitative interview study provided insights into the assessments of active teachers on the topic of sustainability in chemistry instruction. To evaluate the newly developed experiments, the third phase of teacher training in Germany, which encompasses advanced training, was used. Based on the evidence presented and concepts of educational research, an in-service training course was developed to present the new experiments to teachers of secondary level II. Experiment kits as well as the cooperation with the industrial partner WACKER served to ensure the transfer of the training content to the classroom.

The newly designed experiments for schools and student laboratories are the focus of the present dissertation. The experiments are presented in a largely publication-based chapter. Building upon research studies on energy-efficient luminescent materials for LEDs, a microwave-based synthesis of the LED luminescent material YAG:Ce³⁺ that is suitable for

school use was developed.¹ The synthesis method could be extended to other phosphors and luminescent materials² such as YAG:Eu³⁺, TAG:Ce³⁺, and BAM:Eu²⁺. Second, in collaboration with the industrial partner WACKER, novel experiments on the modern and everyday antioxidant hydroxytyrosol were designed.³ With a school experiment kit for teachers, the chemical properties of antioxidants are illustrated based on the model substance and in connection with sustainability. In addition to an experiment on the persistent accumulation of the analgesic diclofenac in surface waters and its possible elimination as part of a fourth, activated carbon-based purification stage in sewage treatment plants, a school-appropriate extraction method for lignin and cellulose was developed from the renewable raw material *Miscanthus giganteus*.

The evaluation of the experiments in the context of cross-locational advanced training for teachers on the topic of "Modern materials and sustainability in chemistry education" revealed the great openness of teachers towards the topic, the need for further targeted advanced training, and the general suitability of the experiments for chemical teaching.

¹ Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, and Stefan Schwarzer. *Journal of Chemical Education* 2019 96 (12), 3018-3024 DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00464.

² Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, Stefan Schwarzer. *CHEMKON* 2021 DOI: 10.1002/ckon.202000033.

³ Dominik Diekemper, Benjamin Pölloth and Stefan Schwarzer. *Journal of Chemical Education* 2021 98 (8), 2610-2617 DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c00157.

Publikationsverzeichnis

Teile dieser Dissertation wurden bereits in folgenden Fachartikeln und als Buchkapitel veröffentlicht bzw. zur Publikation angenommen:

Forschungsartikel (peer-review Verfahren)

Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, Stefan Schwarzer (2019): **Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting.** *Journal of Chemical Education*, 96 (12), 3018–3024.

Dominik Diekemper, Benjamin Pölloth, Stefan Schwarzer (2021): **From Agricultural Waste to a Powerful Antioxidant: Hydroxytyrosol as a Sustainable Model Substance for Understanding Antioxidant Capacity.** *Journal of Chemical Education*, 98 (8), 2610–2617.
DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c00157.

Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, Stefan Schwarzer (2021): **Aus blau wird weiß – Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Beleuchtung am Beispiel eines LED-Leuchtstoffs.** *CHEMKON* (online first). DOI: 10.1002/ckon.202000033.

Dominik Diekemper, Gudrun Baltjan, Stefan Schwarzer (2021): **Luminol-Bubble-Tea – Antioxidantien und das Leuchten der Bällchen.** *CHEMKON* (online first).
DOI: 10.1002/ckon.202100019.

Beiträge in unterrichtspraktischen Zeitschriften (Begutachtung durch Herausgeber)

Dominik Diekemper, Bianca Watzka, Stefan Schwarzer (2021): **Leuchtstoffe in LEDs. Fächerübergreifend, modern und nachhaltig: Herstellung eines LED-Leuchtstoffes in der Mikrowelle.** *MNU-Journal*, 74 (2), 110–117.

Dominik Diekemper, Lena J. Daumann, Stefan Schwarzer (2021): **Seltenerdmetalle im Alltag – Vom Glühstrumpf zum modernen Leuchtstoff.** *Plus Lucis* (in Vorbereitung).

Buchbeitrag (Begutachtung durch Herausgeber)

Dominik Diekemper, Stefan Schwarzer (2021): **Nachhaltigkeit als Thema im Chemieunterricht und Lehrkräftefortbildung – Ergebnisse einer länderübergreifenden Lehrkräftebefragung.** In: Menthe, J.; Waitz, T. (Hrsg.): *BnE im Rahmen von Schule und Lehrkräftefortbildung*. Münster: Waxmann Verlag (angenommen).

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Danksagung | IV |
| Kurzfassung/Summary | VI |
| Publikationsverzeichnis | X |
| Inhaltsverzeichnis | XI |
| | |
| 1. Einleitung und Motivation..... | 1 |
| 1.1 Problemstellung und Zielsetzung | 2 |
| 1.2 Strukturierung dieser Dissertation | 4 |
| | |
| 2. Didaktische Rekonstruktion aktueller Fachforschung | 6 |
| | |
| 3. Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht .. | 10 |
| 3.1 Definition Nachhaltigkeit | 11 |
| 3.2 Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) | 15 |
| 3.3 Nachhaltigkeit und epistemologische Überzeugungen im Unterrichtsfach Chemie..... | 17 |
| 3.4 Moderne Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit im Fach Chemie | 18 |
| 3.5 Interviewstudie zum Begriffsverständnis Nachhaltigkeit aktiver Lehrkräfte ... | 20 |
| | |
| 4. Lehrkräftefortbildung im Unterrichtsfach Chemie | 27 |
| 4.1 Status Quo der Chemie-Lehrkräftefortbildung in Deutschland..... | 29 |
| 4.2 Empirische Befunde zur Lehrkräftefortbildung..... | 30 |
| 4.3 Konzeption der Lehrkräftefortbildung zu „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“ | 36 |
| 4.4 Schnittfeld Wirtschaft, Fachdidaktik und Lehrkräftefortbildung: Kooperations- partner WACKER und der Schulversuchskoffer CHEM ₂ DO | 40 |
| | |
| 5. Konzeptionell-experimentelle Umsetzung moderner Fachforschung für den Chemieunterricht | 42 |
| 5.1 PUBLIKATION 1: Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry’s Contribution to Sustainable Lighting | 43 |
| 5.1.1 Introduction..... | 44 |
| 5.1.2 LED Technology and Rare Earth Elements..... | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1.3 Experimental procedure | 45 |
| 5.1.4 Hazards | 47 |
| 5.1.5 Luminophores for Integrating Systems Thinking into Modern School Chemistry?..... | 47 |
| 5.1.6 Discussion | 48 |
| 5.1.7 Conclusion and Outlook | 49 |
| 5.2 PUBLIKATION 2: Aus blau wird weiß – Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Beleuchtung am Beispiel eines LED-Leuchtstoffs..... | 51 |
| 5.2.1 “What’s with the lightbulb?” | 52 |
| 5.2.2 Wissenschaftlicher Hintergrund..... | 53 |
| 5.2.3 Experimenteller Teil: Schülerlaborstation zum Thema Leuchtstoffe in LED | 53 |
| 5.2.4 Didaktische Betrachtung und Unterrichtsbezug | 57 |
| 5.2.5 Zusammenfassung und Ausblick | 58 |
| 5.3 PUBLIKATION 3: Leuchtstoffe in LEDs: Fächerübergreifend, modern und nachhaltig: Herstellung eines LED-Leuchtstoffes in der Mikrowelle | 60 |
| 5.3.1 Faszination Licht..... | 61 |
| 5.3.2 Didaktisches Potential..... | 63 |
| 5.3.3 Vorversuch: Verschiedene Leuchtmittel im Vergleich..... | 64 |
| 5.3.4 Das Experiment..... | 64 |
| 5.3.5 Fächerübergreifende Potentiale und unterrichtliche Anbindung | 66 |
| 5.3.6 Zusammenfassung und Ausblick | 68 |
| 5.4 PUBLIKATION 5: From Agricultural Waste to a Powerful Antioxidant: Hydroxytyrosol as a Sustainable Model Substance for Understanding Antioxidant Capacity | 70 |
| 5.4.1 Introduction..... | 71 |
| 5.4.2 Hydroxytyrosol, Olive Oil Production and Sustainability | 71 |
| 5.4.3 Use of Hydroxytyrosol as an Antioxidants..... | 72 |
| 5.4.4 Chemistry of Antioxidants..... | 72 |
| 5.4.5 Hydroxytyrosol as a Model Substance | 74 |
| 5.4.6 Experiment 1: Investigation Principal Properties of Antioxidants | 74 |
| 5.4.7 Experiment 2: Luminous Bubble Tea | 75 |
| 5.4.8 Hazards | 76 |
| 5.4.9 Discussion | 76 |

| | |
|--|------------|
| 5.4.10 Conclusion and Outlook | 76 |
| 5.5 PUBLIKATION 6: Luminol-Bubble-Tea–Antioxidantien und das Leuchten der Bällchen | 79 |
| 5.5.1 Das Comeback des Bubble Teas | 80 |
| 5.5.2 Die Luminol-Reaktion: Ein Evergreen der Chemie(didaktik)..... | 80 |
| 5.5.3 Hydroxytyrosol: Vom Abwasser zum hochwirksamen Antioxidans . | 81 |
| 5.5.4 Experimenteller Teil: Luminol-Alginat-Bällchen | 81 |
| 5.5.5 Didaktische Betrachtung und Fazit | 83 |
| 5.6 Miscanthus giganteus als nachhaltiger Rohstofflieferant | 84 |
| 5.6.1 Fachwissenschaftlicher Hintergrund..... | 84 |
| 5.6.2 Didaktisches Potential..... | 87 |
| 5.6.3 Experimentelle Umsetzung..... | 88 |
| 5.7 Diclofenac: Vom Schmerzmittel zum Spurenstoff im Abwasser | 97 |
| 5.7.1 Fachwissenschaftlicher Hintergrund..... | 97 |
| 5.7.2 Didaktisches Potential..... | 100 |
| 5.7.3 Experimentelle Umsetzung..... | 102 |
| | |
| 6. Evaluation der Experimente in der Lehrkräftefortbildung | 105 |
| 6.1 Methode | 105 |
| 6.2 Fragebogen | 106 |
| 6.3 PUBLIKATION 7: Nachhaltigkeit als Thema in Chemieunterricht und Lehrkräftefortbildung – Ergebnisse einer standortübergreifenden Lehrkräftebefragung | 109 |
| 6.3.1 Nachhaltigkeit im Trend – auch für die Chemie..... | 110 |
| 6.3.2 Chemie und BnE – eine gute Kombi | 110 |
| 6.3.3 Fortbildung „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“..... | 111 |
| 6.3.4 Ergebnisse der Lehrkräftebefragung..... | 113 |
| 6.3.5 Diskussion, Ausblick und Fazit | 115 |
| 6.4 Motivation zur Teilnahme an Lehrkräftefortbildungen..... | 118 |
| 6.5 Ergebnisse der Evaluation der Experimente..... | 120 |
| | |
| 7. Zusammenfassung und Ausblick | 128 |

| | |
|---|-----|
| Literaturverzeichnis | 130 |
| Abbildungsverzeichnis | 139 |
| Tabellenverzeichnis | 141 |
| Anhang | 142 |
| Anhang 1: Interviewleitfaden | 142 |
| Anhang 2: Arbeits- und Informationsmaterialien der entwickelten Experimente | 145 |
| Anhang 3: Arbeitsmaterialien der Lehrerfortbildung | 154 |
| Anhang 4: Fragebögen..... | 162 |
| Anhang 5: Zusammenfassende Darstellung der Evaluation der Experimente | 174 |

1. Einleitung und Motivation

Die „Macke des Chemischen“ tragen nicht nur viele Produkte und Alltagsgegenstände, sondern vielfach auch der Chemieunterricht. Die Chemie und alles Chemische werden oft als Gegenpol zu allem Natürlichen gesehen, weshalb die Chemie in der Gesellschaft häufig auf pauschale Ablehnung stößt [1]. Mit Nachhaltigkeit wird die Chemie deshalb selten verbunden.

Das gesellschaftlich und politisch omnipräsente Thema der nachhaltigen Entwicklung und die Naturwissenschaft Chemie sind enger miteinander verbunden als gemeinhin vermutet. Nachhaltigkeit ist ein fächerübergreifendes Thema, das auch eine ethische Grundlage für die Forschenden in der Chemie darstellt. Vor dem Hintergrund eines zeitgemäßen und authentischen Abbilds der Chemie im dazugehörigen Schulunterricht, sollte auch dieses Thema früh Einzug in den Chemieunterricht finden. Neben dem Vorteil, den dies für das Image der Chemie haben könnte, wird die Chemie auch als die Wissenschaft dargestellt, die sie ist: Eine zukunftsweisende und verantwortungsvolle Naturwissenschaft, deren Erkenntnisse entscheidend bei der Bewältigung globaler Probleme sein können.

Die Realisierung neuer Katalysatoren, energieeffizienter, langlebiger und umweltfreundlicher Leuchtstoffe für warmweiße LEDs oder die Entwicklung der Lithium-Ionen-Batterie, für die 2019 der Chemie-Nobelpreis verliehen wurde, sind nur einige Errungenschaften der Chemie in der jüngsten Vergangenheit, die zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen können.

Chemisches Fachwissen, das auch im Schulunterricht vermittelt wird, besitzt also eine Alltags- und Zukunftsbedeutung und ist zentral für das Verständnis einer nachhaltigeren Entwicklung. Es ermöglicht die Teilnahme an kontroversen, sachorientierten und objektiv-rationalen Bewertungen aus einer naturwissenschaftlichen Sichtweise [1].

Gleichzeitig ist die Chemie eine experimentelle Naturwissenschaft. Die Vermittlung eines authentischen Abbilds ist auch im Schulunterricht gefordert [2] und erlangte auch durch PISA und TIMSS aus Forschungsperspektive Aufmerksamkeit. Experimente, die dafür notwendige Experimentierfähigkeiten und der daraus abzuleitende Erkenntnisgewinn für Chemikerinnen und Chemiker sind essenziell für einen zeitgemäßen Unterricht. Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist daher die didaktische Rekonstruktion aktueller Fachforschung und die Konzeption neuartiger Experimente im Schnittfeld moderne Materialien aus der Chemie und Nachhaltigkeit. Die Entwicklung orientiert sich dabei an den Gegebenheiten der Lernumgebungen Schule und Schülerlabor.

Unter dem Begriff des modernen Materials wird der fortschrittliche Charakter der Chemie an geeigneten aktuellen Beispielen aus der Fachforschung durch Experimente im Schulunterricht zugänglich gemacht. Oberstes Leitziel der entwickelten Versuche ist es, bei den Schülerinnen und Schülern die Chemie als eine verantwortungsvolle, attraktive und allem voran zukunftsweisende Wissenschaft zu präsentieren [3].

Der Faktor des Personals, also in Schulen die Lehrerinnen und Lehrer, spielt eine entscheidende Rolle und ist der Dreh- und Angelpunkt in der Einrichtung Schule. Aus diesem Grund kann die Schule auch als „people-processing bzw. people-changing-institution“ [4] bezeichnet werden.

Es ist demnach zielführend, nach der Entwicklung neuartiger Versuche die dritte Phase der Lehrkräftebildung, also die berufsbegleitende Fortbildung, für den Transfer in den Schulunterricht zu nutzen. Die Lehrkräftefortbildung bietet außerdem die Möglichkeit der gezielten Evaluation und – gegebenenfalls – Optimierung und Anpassung der Experimentiervorschriften.

Die konzipierten Experimente zu modernen Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit wurden aus diesem Grund aktiven Lehrkräften im Schuldienst in einer eigens dafür konzipierten Lehrkräftefortbildung in Bayern und Baden-Württemberg vorgestellt. Bestandteil der Fortbildung war eine Befragung zu den Themen Begriffsverständnis Nachhaltigkeit, Motivation zur Teilnahme an Lehrkräftefortbildung, Thema Nachhaltigkeit in Studium und Referendariat und eine Evaluation der vorgestellten und erprobten Experimente.

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit stellt die didaktische Rekonstruktion innovativer Experimente dar, die Schülerinnen und Schülern in Schule und Schülerlabor einen Einblick in die fachwissenschaftliche Forschung ermöglichen sollen. Zusätzliche Legitimation von Seiten der Bildungswissenschaft und -politik erfahren die Experimente durch die Verknüpfung mit nachhaltiger Entwicklung. Alle Experimente ermöglichen das Aufzeigen des Beitrags der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung.

Ziel aller Versuche ist es, dass eine Durchführbarkeit sowohl im Schülerlabor als auch innerhalb des Schulunterrichts der Sekundarstufe I und II gewährleistet ist. Eine Anbindung an aktuelle Forschung mit Bezug zur Nachhaltigkeit ist also ebenso zentraler Bestandteil wie eine möglichst breite curriculare Einbindung in den schulischen Unterricht.

Übergeordnetes Forschungsvorhaben ist also der Transfer aktueller Fachforschung in den Schulunterricht durch Entwicklung innovativer Experimente in Zusammenarbeit mit der Fachchemie und Nutzung der Lehrkräftefortbildung für den Übergang in den Schulunterricht.

Aus diesem Grund wurde für die Experimente sowohl mit Fachchemikern des Departments Chemie der Ludwig-Maximilians-Universität München kooperiert als auch mit der chemischen Industrie. In Zusammenarbeit mit der WACKER Chemie AG finden Teile der entwickelten Versuche Einzug in den Schulversuchskoffer CHEM₂DO.

Das durchgeführte Forschungsprojekt teilt sich folglich in eine theoretische Einbettung, die Konzeption von neuartigen Versuchen, deren Durchführung in Schule und Schülerlabor gewährleistet ist und die anschließende Evaluation in der Lehrkräftefortbildung.

Neben der konzeptionell-chemiedidaktischen Erarbeitung der neuartigen Experimente stellen sich also die folgenden Forschungsfragen an die begleitende Evaluation:

I. Inwiefern verfügen aktiv im Dienst befindliche Chemielehrerinnen und -lehrer über einen experimentellen Zugang zu Themen, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen?

Sowohl durch die Gestaltung der Lehrpläne, als auch die Struktur des Faches Geographie an sich, wird Geographie als eines der wenigen Hauptträgerfächer einer Bildung für nachhaltige Entwicklung gesehen [5]. Grundsätzlich wird besonders für den Sekundarbereich aber der Anspruch erhoben, sowohl fächerübergreifend als auch fächerverbindend den Themenkomplex der Nachhaltigkeit zu thematisieren und eine stärkere Verwirklichung in den einzelnen Fächern anzustreben [6].

Es gilt also anzunehmen, dass das Thema zu einem großen Teil in Geografie curricularen Einzug erfährt und im Fachunterricht Chemie nur die herkömmlichen Lehrplanthemen und Schulexperimente unterrichtet werden. Auch lässt sich vermuten, dass eine Manifestierung auf Standard-Experimente beobachtbar sein könnte.

II. Inwieweit beeinflusst die allgemeine Motivation zur Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen die Bereitschaft, neuartige Experimente im Schulunterricht durchzuführen?

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass Lehrkräfte offen für neue, schultaugliche Experimente für den Chemieunterricht sind. Oftmals stehen dem aber institutionelle Hemmnisse wie der Lehrplan oder die Ausstattung der Chemiesammlung gegenüber.

III. In welchem Ausmaß ist eine Implementierung der vorgestellten Experimente aus Sicht der Lehrkräfte zu erwarten?

Es liegt die Vermutung nahe, dass Lehrerinnen und Lehrer die Durchführbarkeit kritisch betrachten und externe Probleme bei der Durchführung identifizieren. Keine klare Bindung an den Lehrplan, keine klare Relevanz, fehlendes Material und Ausstattung oder Zeitnot könnten als mögliche Hinderungsgründe genannt werden.

1.2 Strukturierung dieser Dissertation

Nach dieser Einführung widmet sich das folgende Kapitel der Grundlage der hier durchgeführten chemiedidaktischen Forschung, der didaktischen Rekonstruktion.

Die anschließenden zwei Kapitel wiederum zeigen die bildungswissenschaftlichen Grundlagen und – mit Blick auf das Thema Nachhaltigkeit – auch die gesellschaftlichen Voraussetzungen auf, auf denen die chemiedidaktischen Arbeiten und auch Konzeptionen aufbauen beziehungsweise beruhen.

Kapitel 3 schafft ein grundlegendes Begriffsverständnis zum Terminus Nachhaltigkeit und der daraus resultierenden Bildung für nachhaltige Entwicklung. Auch ergeben sich aufgrund der im deutschen Bildungssystem durch die Kultusministerkonferenz länderübergreifend verankerten Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) Chancen für die Chemie und den Chemieunterricht, die in diesem Kapitel ausgeführt werden. Das anschließende vierte Kapitel beinhaltet die Evaluation der Experimente innerhalb der dritten Phase der Lehrkräftebildung in Deutschland, der Lehrkräftefortbildung. Der aktuelle Stand der Forschung zu Fortbildungen in Deutschland wird hier im Allgemeinen dargestellt und im Speziellen auf den Chemieunterricht bezogen. Kapitel 4 zeigt also strukturelle Grundlagen auf, die in der konzipierten Lehrkräftefortbildung umgesetzt werden.

Die didaktische Rekonstruktion von neuartigen Experimenten, die einen Einblick in die aktuelle fachwissenschaftliche Forschung zeigen, steht im Mittelpunkt der Arbeit. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten schultauglichen Experimente finden sich in Kapitel 5. Insgesamt sind aus dieser wissenschaftlichen Arbeit fünf Experimente entstanden. Experimente wie die Festkörpersynthese eines Leuchtstoffes in der Mikrowelle lassen sich

aber durch Variation der Edukte auf eine größere Anzahl verschiedener lumineszierender Produkte erweitern. Weite Teile der erarbeiteten Experimente sind in Fachartikeln veröffentlicht.

Kapitel 6 widmet sich der Evaluation der vorangegangenen Experimente im Rahmen der durchgeführten Lehrkräftefortbildung. Auf Basis der Daten und der daraus abgeleiteten Ergebnisse, die hier innerhalb der Befragung erhoben wurden, werden die Experimente seitens der im Schulunterricht durchführenden Lehrerinnen und Lehrer evaluiert und damit die Qualität der einzelnen didaktischen Rekonstruktionen überprüft. Die Ergebnisse liefern außerdem Anhaltspunkte für die Möglichkeit des Transfers in den Chemieunterricht und eine Abschätzung zur Implementierung (Abb. 1).

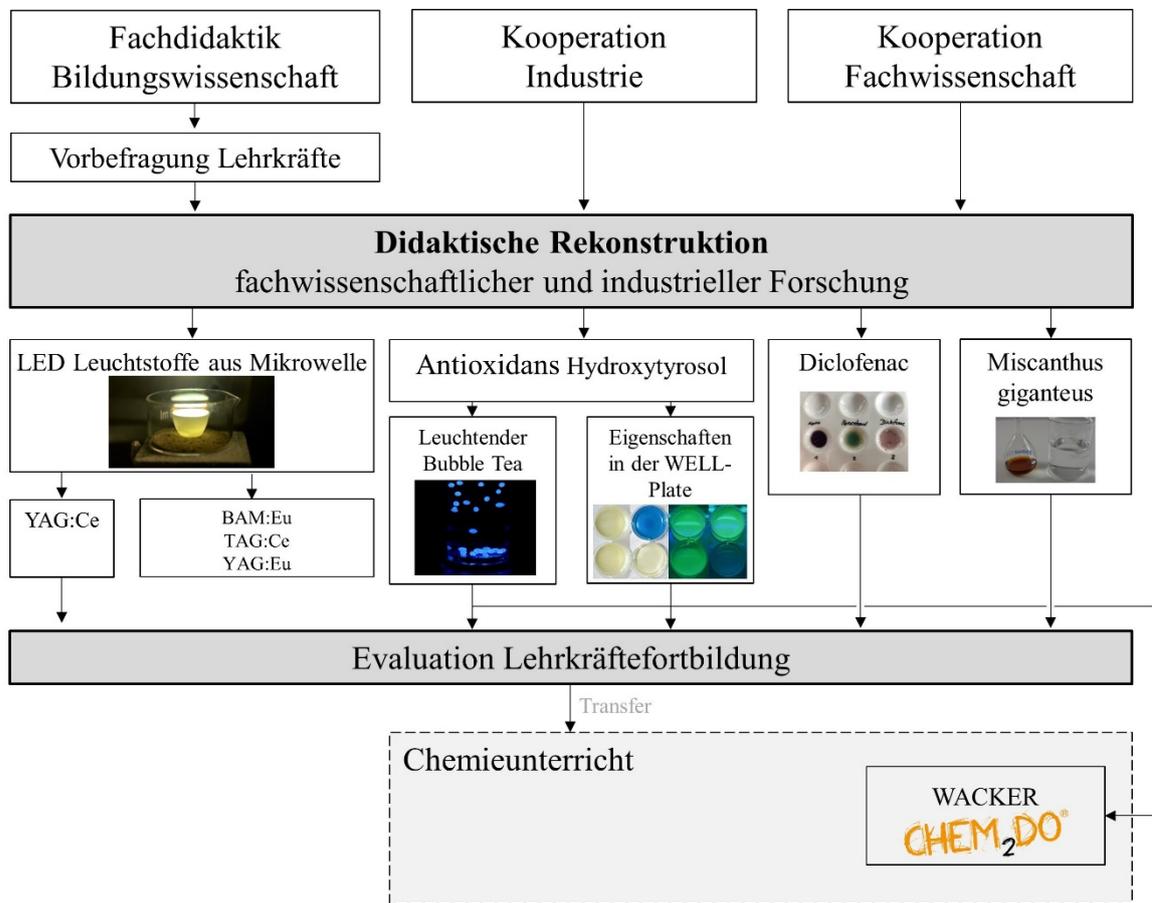


Abb. 1: Aufbau des kumulativen Promotionsprojektes (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

2. Didaktische Rekonstruktion aktueller Fachforschung

Ziel eines guten naturwissenschaftlichen Unterrichts ist es, den Schülerinnen und Schülern eine angemessene und zeitgemäße Vorstellung von Themenkomplexen der jeweiligen Fachdisziplin zu präsentieren. Neben einem authentischen Abbild der Fachwissenschaft spielen aber auch affektive Faktoren eine wichtige Rolle: Die Lernenden sollen für die jeweilige Fachdisziplin Motivation und Interesse ausbilden. Aktuelle Kontexte und Themen können dazu genutzt werden, um Novizinnen und Novizen kognitiv zu aktivieren und damit Qualitätsmerkmale guten Unterrichts Rechnung zu tragen, also fachliche und motivationale Unterrichtsziele zu erreichen [7]. So zeigten außerdem van Vorst et. al. (2018) [8], dass Lernende Kontexte, die Aktualität und Besonderheit besitzen, als authentisch und interessant empfinden.

Die seit dem Jahr 2020 gültigen Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife der Kultusministerkonferenz führen nunmehr „Aktuelle Technologien und chemische Produkte“ als Inhaltsbereich auf [9]. Nichtsdestotrotz sind die innerdeutschen Lehr- und Bildungspläne nicht vorrangig an aktuellen chemischen Forschungsergebnissen orientiert, und zeigen in weiten Teilen den fortschrittlichen Charakter der Chemie bislang kaum auf. An dieser Stelle nimmt die chemiedidaktische Forschung eine Schlüsselrolle ein:

Die Thematisierung und Implementierung aktueller Forschungsinhalte im Chemieunterricht gelingt nicht, ohne diese vorab einer didaktischen Erschließung, einer didaktischen Rekonstruktion zu unterziehen. Aus diesem Grund ist ein zentrales Element einer fachdidaktisch-konzeptionellen Forschung die Anwendung des Modells der didaktischen Rekonstruktion.

Fachwissenschaftlich-chemische Forschungsergebnisse können nicht ohne weitere Anpassung und Veränderungen in den Chemieunterricht übernommen werden. Die Arbeit der fachdidaktischen Forschung ist es daher, fachliche Ergebnisse und Quellen so in Beziehung zu setzen, dass daraus ein Themenkomplex für den Unterricht werden kann [10]. Vereinfacht formuliert, stellt die didaktische Rekonstruktion die Symbiose aus den Perspektiven der Expertinnen und Experten eines Fachgebietes und der Perspektive der Lernenden dar. Grundlegende Fragestellungen sind also, welche Methoden, Theorien und Forschungsinteressen Forschende ihrer Arbeit zugrunde legen, und welche Vorstellungen, welches Vorwissen und Interessen es auf der Seite der Novizinnen und Novizen im Schulunterricht gibt.

Die didaktische Rekonstruktion verbindet damit iterativ die fachwissenschaftliche-chemische Forschung mit der fachdidaktischen Entwicklungsforschung für neue Lehr- und Lernzugänge. In gegenseitiger Wechselwirkung stehen dabei drei Faktoren (Abb. 2):

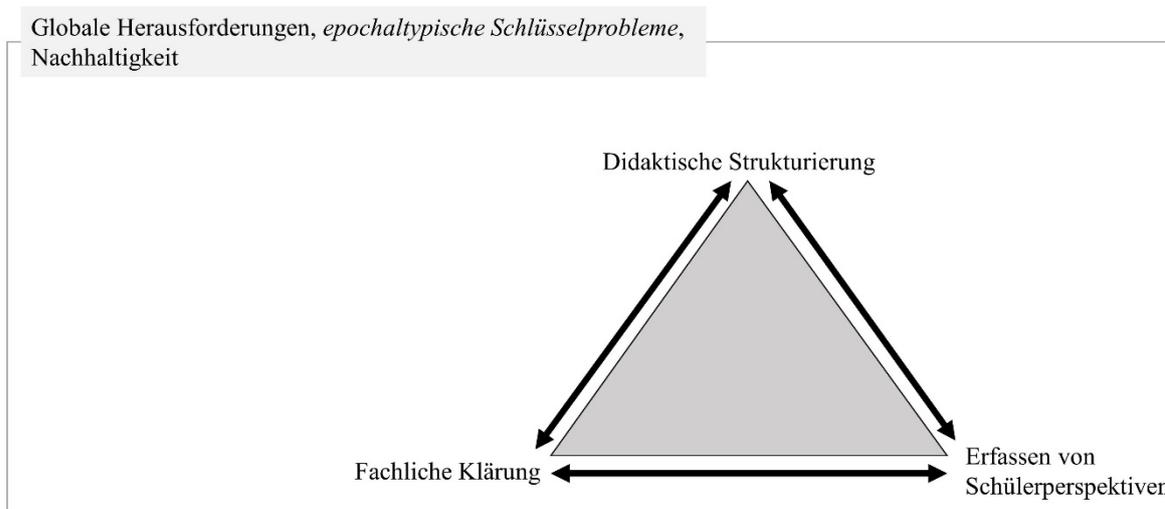


Abb. 2: Didaktische Strukturierung von Fachinhalten in der fachdidaktischen Forschung (Darstellung nach Kattmann et al. 1997; Sjöström et al. 2020)

Die fachliche Klärung des Sachverhaltes beschäftigt sich mit der fachwissenschaftlichen Komponente des aufzuarbeitenden Themenkomplexes. Hier können fachwissenschaftliche Publikationen oder Forschungsprojekte zurate gezogen werden. Auch stellen sich Fragen zum Vorliegen fachwissenschaftlicher Aussagen und deren aktuell vorherrschenden Grenzen.

Die Seite der Erfassung von Schülervorstellungen nimmt Bezug auf affektive Faktoren wie Interesse und Motivation, aber auch auf vorhandenes, anknüpfungsfähiges Vorwissen sowie Vorstellungen und Erklärungskonzepte. Auch stehen empirische Erhebungen von Lernvoraussetzungen der Schülerinnen und Schüler im Betrachtungshorizont: Präkonzepte und aktuelle fachliche Modelle und Theorien können so abgeglichen werden.

Die didaktische Strukturierung beschäftigt sich mit der didaktischen Aufarbeitung: Welche Medien, Aufgaben und Formate können lernförderlich wirken? Lernziele werden bestimmt, Inhalte selektiert ausgewählt und geeignete Methoden bestimmt [11–13].

In diesem wechselseitigen Dreieck sind somit alle Bestandteile von Unterricht in Balance gebracht und der didaktisch rekonstruierte Gegenstand wird bedingt durch die zu beachtenden Dimensionen vielschichtiger als der rein fachwissenschaftliche Inhalt [10].

Die didaktische Rekonstruktion hat in ihrer Aufgabe viele Gemeinsamkeiten zur sogenannten curricularen Innovationsforschung, welche besonders auf den innovativen Wandel von Inhalten und Konzepten des Chemieunterrichts abzielt. Gleichmaßen umfasst der Begriff das Verbinden von Fachwissenschaft und Unterrichtspraxis. Die neu

entwickelten Unterrichtsmaterialien und experimentellen Zugänge müssen wissenschaftlich konsistent sein, was nicht beinhaltet, dass sie auf wissenschaftlich höchstem Niveau angesiedelt sind [14]. Unterschiede zur didaktischen Rekonstruktion bestehen aber durch die weniger ausgeprägte empirische Fundierung und Elaboration, die sich aus dem Zusammenwirken und gegenseitigen Bedingen der Dimensionen im Modell der didaktischen Rekonstruktion ergeben.

Die Synergie der einzelnen Elemente dieses didaktischen Forschungsmodells zeigt sich konkret an den Resultaten der vorliegenden Forschungsarbeit.

Die fachliche Klärung findet mit den Expertinnen und Experten der jeweiligen Fachdisziplin statt. Hier wurden als Kooperationspartner Fachforschende aus der Festkörperchemie und der Industrie gewonnen, die sowohl ihr Fachwissen als auch ihre Methoden (z. B. die Möglichkeit der Festkörpersynthese mittels Mikrowellen) in Form von Forschungsergebnissen aber auch zukünftigen Forschungsvorhaben (z. B. die stete Weiterentwicklung von Leuchtstoffen für möglichst optimale Spektralverteilung des Lichts) in die didaktische Rekonstruktion mit einfließen ließen. Mit der didaktischen Strukturierung, der Überprüfung der experimentellen Möglichkeiten im Schulunterricht und der Erfassung von Interessen und Perspektiven der Schülerinnen und Schüler beschäftigte sich die Fachdidaktik.

Zusätzlich zu den drei Dimensionen, die im Modell der Didaktischen Rekonstruktion vorgesehen sind, wird im Zusammenhang dieser Forschungsarbeit das Modell in den größeren Kontext von globalen Herausforderungen und damit insbesondere dem Begriff der Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung gestellt. Dieser bildungstheoretische Rahmen bildet ein Grundgerüst für die allgemeindidaktische Implementierung der chemiedidaktischen Inhalte in den Chemieunterricht.

Gerade in der Zusammenarbeit der verschiedenen Fach- und Forschungsbereiche zeigt sich die „Verknüpfungsfunktion“ der Fachdidaktik und die Möglichkeit der konzeptionellen fachdidaktischen Forschung: Das Entwerfen und Konzipieren von innovativen Lehr- und Lernzugängen in der Fachdidaktik findet in diesem Forschungsprojekt im Schnittfeld zwischen Bildungswissenschaft und Fachwissenschaft statt. Ohne die gezielte Zusammenarbeit der beiden Bereiche ist die Innovation für den Unterricht, besonders in fortschreitenden Disziplinen wie den Naturwissenschaften im Allgemeinen, kaum umsetzbar.

Ob die intendierten Ziele der didaktischen Rekonstruktionen erreicht werden oder nicht, wird im Falle der hier entwickelten Experimente – wie im Modell der didaktischen Konstruktion vorgesehen – an der Seite der Novizinnen und Novizen erforscht. Hier sind

dies die Lehrkräfte, die die neu entwickelten Experimente in den Fortbildungsveranstaltungen erproben. Die begleitende Befragung ermöglicht in besagtem iterativem Prozesse die Überprüfung der Einschätzung der Lehrkräfte und gegebenenfalls die Anpassung der inhaltlichen Schwerpunkte, Versuchsanleitungen oder didaktischen Begleitmaterialien.

3. Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht

Der Terminus Nachhaltigkeit gilt in der Gesellschaft als „Positiv-Vokabel“ mit inflationärer Verwendung [15], der zusätzlich auch „in das mediale Feuerwerk der Reklamesprache“ [16] geraten zu sein scheint. Zeitgleich zum Prozess der Bedeutungssteigerung im gesellschaftlichen und politischen Diskurs, wurde Nachhaltigkeit auch bildungspolitisch fokussiert.

Die Verknüpfung der Begrifflichkeiten Nachhaltigkeit auf der einen Seite und Allgemeinbildung auf der anderen Seite lässt sich bereits im Bildungsbegriff nach Klafki (2006) erkennen: Bildung kann demnach definiert werden als

„[...] vermitteltes Bewusstsein von zentralen Problemen der Menschheit in der Gegenwart und Zukunft, auf Einsicht in die Mitverantwortung aller und die Bereitschaft an der Bewältigung teilzunehmen“ (zit. n. [17]).

In Klafkis Bildungsbegriff finden sich bereits wichtige Determinanten, die im Rahmen des Begriffs Nachhaltigkeit, der sich hier nicht auf nachhaltige, „auf längere Zeit auswirkende“ Lernprozesse bezieht, eine wichtige Rolle spielen. Die dazugehörigen Zielkategorien von Bildung, nämlich Mitbestimmungsfähigkeit, Solidaritätsfähigkeit und die zentralen epochaltypischen Schlüsselprobleme (z.B. Umweltfrage, Friedensfrage und Ungleichheiten) zeigen ebenso die Verbindung zu Kernfragen der Menschheit auf, die mit einer nachhaltigen Entwicklung verknüpft sind.

Besonders Letztere sind in diesem Sinne bedeutend, da sie als Kernproblem der gemeinsamen Gegenwart und Zukunft zu verstehen sind. Die „Zerstörung oder Erhaltung der natürlichen Grundlagen menschlicher Existenz“ im globalen Maßstab und die Verantwortbarkeit und Kontrollierbarkeit von wissenschaftlich-technologischer Entwicklung sind nach Klafki [18] als Schlüsselprobleme im Sinne einer Allgemeinbildung zu sehen. Es zeigt sich, dass nach Klafki Bildung an jenen epochaltypischen Schlüsselproblemen ausgerichtet sein soll und eine unauflösbare Beziehung zwischen Allgemeinbildung, schulischer Bildung und der Nachhaltigkeit bzw. nachhaltigen Entwicklung existiert. Die Begrifflichkeiten sind dabei aber nicht rein wissenschaftlich-neutral, sondern durchaus auch ethisch-normativ zu sehen [19] und als Bestandteil einer ausgereiften Allgemeinbildung auch unweigerlich Teil des Unterrichtsfaches Chemie.

Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung sind dabei nicht synonym zu verstehen, sondern als fortwährender Prozess einer gesamtgesellschaftlichen Veränderung hin zu einem angestrebten Ziel, einem Zustand [15].

Dieses Kapitel dient also der Schaffung eines klaren Begriffsverständnisses von Nachhaltigkeit und nachhaltiger Entwicklung bzw. BnE, die einen Rahmen für die neu entwickelten Experimenten für den Chemieunterricht bilden. Die bezeichnende Bedeutung des Unterrichtsfaches Chemie und der Beitrag der chemischen Forschung sind Bestandteil der folgenden Ausführungen, und: So wird auch der Frage nach „Cui bono?“ einer Implementierung aktueller und nachhaltiger Themen für die Chemie und den Chemieunterricht nachgegangen.

3.1 Definition Nachhaltigkeit

Den Vorwurf der „inflationären Verwendung“ trifft man im Zusammenhang mit dem Begriff Nachhaltigkeit häufig. Auch Zuschreibungen wie „Gummibegriff“ oder „leeres Signifikant“ sind – auch in wissenschaftlichen Abhandlungen – zu finden und entsprechen zusätzlich dem allgemeinen Sprachgebrauch. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, sich dem Nachhaltigkeitsbegriff durch seine Entstehungsgeschichte anzunähern.

Beginnt man mit dieser Annäherung chronologisch, wird als erster deutschsprachiger Ursprung die Forstwirtschaft gesehen. Im Jahre 1713 forderte Oberberghauptmann Hans Carl von Carlowitz in seinem Werk „Sylvicultura oeconomica“ eine kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung des Waldes. Dem Wald soll demnach nicht mehr Holz entnommen werden als nachwachsen kann. Erkennbar ist das Leitprinzip, nicht von der Substanz zu leben und zu wirtschaften, sondern möglichst von den Erträgen [16,20]. Die aus diesem forstwirtschaftlichen Zugang entstandenen zentralen Zugänge wie Langfristigkeit, Bestandssicherung, soziale Verantwortung und Schutz der Ressourcen sind bis heute in der Nachhaltigkeitsdebatte aktuell [21] und im allgemeinen Bewusstsein verankert.

Neben Instanzen wie Robert Malthus und John Stuart Mill, die die Debatte um Wachstumsgrenzen im frühen 19. Jahrhundert und folglich die der Nachhaltigkeit prägten, waren auch erste ökologische Diskussionen im Buch *Silent Spring* von Rachel Carson (1962) für die fortlaufende Entwicklung der Nachhaltigkeit von Bedeutung.

Als weiterer wichtiger Meilenstein gilt der 1972 veröffentlichte Bericht des „Club of Rome“, einem Zusammenschluss von Wissenschaft, Politik und Wirtschaft, mit dem Titel „The Limits of Growth“. Besagte Grenzen des Wachstums der Weltwirtschaft sollen, so wurde

vorausgesagt, innerhalb der kommenden 100 Jahre erreicht werden, wenn Umweltschutz, Ausbeutung natürlicher Ressourcen, Zunahme der Weltbevölkerung, Industrialisierung und Nahrungsmittelproduktion auf weiterhin unverändert gleichem Niveau stattfinden [22]. Kommt von einer forst- bzw. landwirtschaftlichen Sichtweise, dehnte sich der Begriff auf das gesamte Ökosystem der Erde aus und geriet vermehrt in die öffentliche und politische Debatte.

Diese verstärkte kontroverse Diskussion um Themen der Nachhaltigkeit führte durch die Vereinten Nationen (UN) 1980 zur Bildung der „World Commission on Environment and Development“ (WCED). Die von der WCED 1983 eingesetzte Brundtland-Kommission unter Vorsitz der norwegischen Ministerpräsidentin Gro Harlem Brundtland brachte 1987 gleichnamigen und als wegweisend zu bezeichnenden „Brundtland-Bericht“ („Our Common Future“) zutage [23].

Die hauptsächlich aus Politikerinnen und Politikern zusammengesetzte Kommission verfolgte das Ziel, konsensorientierte Handlungsempfehlungen zu erarbeiten, die einen allseits praktikablen Prozess der nachhaltigen Entwicklung einleiten sollten [24]. Der Bericht beschäftigt sich umfassend mit dem Begriff der nachhaltigen Entwicklung und definiert ihn in einer bis heute anerkannte Form:

„Sustainable Development is development that meets the needs of present without compromising the ability of future generations to meet their own needs (WCED 1987, zit. n. [23]).

Zusätzlich liegen dem Bericht drei Grundprinzipien nachhaltiger Entwicklung zugrunde: Die globale Perspektive bei der Analyse der Probleme und deren Lösungsstrategien, die untrennbare Verknüpfung von Umwelt- und Entwicklungsaspekten sowie die intergenerative und intragenerative Gerechtigkeit [25]. Besonders den Begrifflichkeiten intergenerative und intragenerative Gerechtigkeit kommt insofern eine entscheidende Bedeutung zu, als dass einerseits ein gerechter Ausgleich zwischen den Interessen der Menschen in Industrie- und Entwicklungsländern hergestellt werden soll und andererseits, dass zukünftige Generationen durch die Lebensweise der gegenwärtigen Generation nicht in ihrer Bedürfnisbefriedigung beeinträchtigt werden. International fand der Bericht große Zustimmung, die sich auch aus dem wenig stark ausgeprägten Konkretisierungsgrad mit weiten Spielräumen für Interpretationen begründen lässt. Gleichzeitig brachte er auch einer breiten, nicht wissenschaftlichen Öffentlichkeit das Leitbild einer nachhaltigen Entwicklung

näher und führte zum Vorschlag einer Weltkonferenz, die anschließend 1992 stattfand und den sogenannten „Rio-Prozess“ einleitete [23].

In jener UNCED-Konferenz in Rio 1992, die als größte multilaterale Konferenz in der Geschichte der Menschheit einging, wurden anschließend politisch verbindliche Normen für die globale Entwicklung festgelegt. Mit der Rio-Deklaration und der Agenda 21 wurden zentrale Dokumente für die nachhaltige Entwicklung als Ergebnisdokumente erstellt [25].

Im Folgenden wurden national wie international weitere Anstrengungen unternommen, um die festgelegten Ziele zu erreichen. All dies wird oftmals als „Rio-Folgeprozess“ bezeichnet, in welchem 1994 die Weltbevölkerungskonferenz, 1995 der Weltsozialgipfel und 1997 die Klimakonferenz (Kyoto-Protokoll) abgehalten wurden und im Jahr 2000 durch die Vereinten Nationen die Millenniums-Entwicklungsziele (MDGs) verabschiedet wurden. Bei dem zwei Jahre später stattfindenden Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung in Johannesburg wurde unter anderem empfohlen, eine UN-Weltdekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ auszurufen. Auf dem Weltgipfel in Rio 2012 wurden „nachhaltige Entwicklungsziele“ (Sustainable Development Goals, SDGs) vorgeschlagen, die 2015 mit den zuvor erstellten MDGs zusammengeführt und beschlossen worden sind (Abb. 3) [20,23].

Das Leitbild der Nachhaltigkeit ist komplex und nicht einfach zu greifen. Die SDGs zeigen die Vielfalt an möglichen Anknüpfungspunkten und Zielsetzungen, die unter dem Begriff einer nachhaltigen Entwicklung mit dem Ziel der Nachhaltigkeit subsumiert werden.



Abb. 3: Ziele für nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030 (Quelle: United Nations)

Ziel ist also eine Balance von Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft, ein gleichberechtigtes Nebeneinander der drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales (Abb. 4) unter Beteiligung und Berücksichtigung aller Anspruchsgruppen [21,23,26]. Das Konzept der Nachhaltigkeit sieht also die Interdependenz der drei Dimensionen als notwendige Voraussetzung an, um für heutige und zukünftige Generationen lebenswerte Verhältnisse zu schaffen [27].

Der Begriff der Nachhaltigkeit und sein Abstraktionsgrad verbunden mit wenig Eindeutigkeit kann als deutlicher Vorteil für die multilaterale Konsensbildung auf globaler Ebene gesehen werden, für konkrete gesellschaftspolitisch relevante Handlungen ist dies aber nicht unproblematisch.

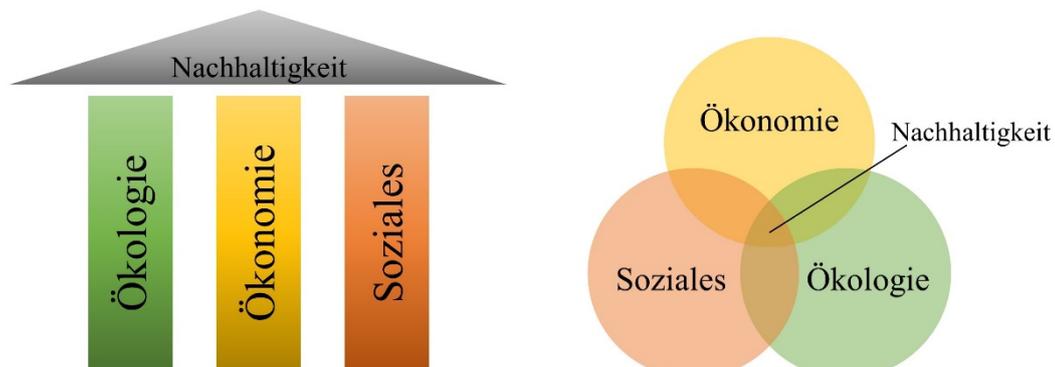


Abb. 4: Drei gleichberechtigte Dimensionen der Nachhaltigkeit. Drei-Säulen-Modelle. (Quelle: Eigene Darstellung 2021 nach Zimmermann 2016)

Auch die unvoreilhafteste, in verschiedenen Sinnzusammenhängen verwendbare, deutsche Übersetzung leistet ihren Beitrag. Unstrittig ist aber die Fusion ökologischer, ökonomischer und sozialer Ziele [21].

In der politischen und gesellschaftlichen Diskussion ist häufig eine Vernachlässigung der Multidimensionalität zugunsten der ökologischen Perspektive vorzufinden. Moderne Nachhaltigkeitskonzepte grenzen sich von dieser „reduzierten Ansicht“ ab. Dies zeigt sich auch im Bildungskontext: Der Fokus geht von der klassischen Umweltbildung hin zu einer ganzheitlichen BnE [28].

3.2 Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE)

Unter Bildung für nachhaltige Entwicklung versteht man ein Bildungskonzept, das die Fähigkeiten und Fertigkeiten vermitteln soll, die für die Gestaltung einer aktiven und eigenverantwortlichen Zukunft notwendig sind [19]. Die Grundlagen dafür finden sich bereits im Brundtland-Bericht 1987. Dort wurde die bildungspolitische Dimension als wichtiger Teilaspekt einer nachhaltigen Entwicklung erwähnt. Konkretisiert und manifestiert wurde der Bildungsaspekt aber insbesondere innerhalb der Rio Konferenz 1992 durch die Agenda 21. In Kapitel 36 des Dokuments wurde Bildung für nachhaltige Entwicklung als wesentlicher Bestandteil beschlossen und die Förderung der Bildung sowie die Bewusstseinsbildung der Öffentlichkeit in Aus- und Weiterbildung gefordert. Die zentrale Aussage, dass Bildung als unerlässliche Voraussetzung für die Förderung einer nachhaltigen Entwicklung gesehen wird und die Forderung nach der Verbesserung von Fähigkeiten der Lernenden, sich mit Fragen zu Umwelt und Entwicklung auseinanderzusetzen zeigt, dass nachhaltige Entwicklung auch an pädagogische Bemühungen gebunden ist. Bildung für nachhaltige Entwicklung kann also als pädagogische Antwort auf das gesellschaftliche Leitbild der Nachhaltigkeit gesehen werden [20] und der Wille zur Implementierung in den Schulunterricht als wichtigste Maßnahme auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Entwicklung [15].

Als Folge aus diesen Beschlusslagen wurde 2002 auf dem Weltgipfel in Johannesburg durch die Vereinten Nationen die „Weltdekade nachhaltige Entwicklung 2005-2014“ ausgerufen [29], um den formulierten Ansprüchen einer Neuausrichtung der Bildung auf BnE umzusetzen, die auch in Deutschland zu einer Vielzahl an Programminitiativen führte. Grundsätzlich verfolgte die Weltdekade das Ziel, den Gedanken der Bildung für nachhaltige Entwicklung in die formalen Bildungssysteme in alle relevanten Fächer und in die non-formale und informelle Bildung zu integrieren. Die allgemeine Möglichkeit, Wissen, Werte, Verhaltensweisen und Lebensstile zu erlernen, die für eine positive Veränderung der Gesellschaft und eine lebenswertere Zukunft notwendig sind, stand ebenso im Fokus [30,31]. Das Lernen innerhalb einer BnE kann also als die gezielte Vermittlung von Kompetenzen (im Verständnis von Kompetenzen nach Weinert 2001) verstanden werden, die das Ziel der Nachhaltigkeit forcieren. Schülerinnen und Schüler sollen dazu befähigt werden „Probleme nicht-nachhaltiger Entwicklung erkennen und bewerten zu können und Wissen über eine nachhaltige Entwicklung anzuwenden“ [31].

Das zentrale operationalisierte Kompetenzkonzept für BnE ist die Entwicklung von Gestaltungskompetenz. Als Gestaltungskompetenz wird dabei

„die Fähigkeit bezeichnet, Wissen über nachhaltige Entwicklung anwenden und Probleme nicht nachhaltiger Entwicklung erkennen zu können. Das heißt, aus Gegenwartsanalysen und Zukunftsstudien Schlussfolgerungen über ökologische, ökonomische und soziale Entwicklung in ihrer wechselseitigen Abhängigkeit ziehen und darauf basierende Entscheidungen treffen, verstehen und individuell, gemeinschaftlich und politisch umsetzen zu können, mit denen sich nachhaltige Entwicklungsprozesse verwirklichen lassen“ [27,32].

Prinzipiell ist BnE als transdisziplinäre, gemeinschaftliche Aufgabe des gesamten Schulsystems zu verstehen. Die Thematisierung soll nach dem Willen der Kultusministerkonferenz in möglichst vielen Fächern stattfinden. Schon die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zeigen die Notwendigkeit einer fach- und fächerübergreifenden bzw. fächerverbindenden, holistischen Herangehensweise an das Thema. Die zu thematisierenden Problemlagen und Themen sind nicht an ein einzelnes Fach gebunden und benötigen Kenntnisse aus unterschiedlichen Fachdomänen [30–32].

Für Deutschland wurde bereits in den 1990er Jahren die Programme „21“ – Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (1999-2004) und darauffolgend das Programm Transfer-21 (2004-2008) durchgeführt, das neben den Sekundarschulen auch die Primarstufe und Lehrerbildung berücksichtigte. Ein weiterer wichtiger Schritt zu einer Fixierung im deutschen Schulsystem wurde durch die Kultusministerkonferenz in Zusammenarbeit mit der deutschen UNESCO-Kommission gelegt: Die herausgegebene Empfehlung für BnE in der Schule gab neben konkreten Hinweisen auch eine erste, bundesdeutsche Zielsetzung vor. Integrationsmöglichkeiten wurden in der Primarstufe im Heimat- und Sachkunde-Unterricht gesehen, „im Sekundarbereich neben einer fächerverbindenden- oder -übergreifenden Thematisierung eine verstärkte Integration von BnE Themen in den jeweiligen Fächern“ [31,33]. BnE erreichte somit einen verbindlichen Status in der allgemeinbildenden Schule [28].

Grundsätzlich wurden also aus politischer Perspektive die nötigen Konzepte und Ideen erarbeitet, um eine BnE sinnvoll in den Schulunterricht zu integrieren. Der stark interdisziplinäre Anspruch, der auch die Multidimensionalität der mit Nachhaltigkeit verbundenen Diskussionen verbunden ist, zeigt sich auch in der Verortung des Themas in fächerverbindenden Unterricht, der im Gegenzug aber den Fachunterricht – trotz Forderung der Integration – vernachlässigte [33].

3.3 Nachhaltigkeit und epistemologische Überzeugungen im Unterrichtsfach Chemie

Das Image des Unterrichtsfaches Chemie, der Fachwissenschaft Chemie, sowie das von Chemikerinnen und Chemikern, ist seit Jahren tendenziell eher negativ konnotiert. Einschätzungen, die Chemie sei ökologisch bedenklich, gefährlich, starr und abstrakt halten sich persistent, nicht nur bei Schülerinnen und Schülern [34–36]. Chemie zählt vermutlich auch deshalb zu den weniger beliebten Unterrichtsfächern.

Gleichzeitig findet negative Berichterstattung Einzug in das allgemeine Bewusstsein und führt dazu, dass der fortschrittliche und an einer nachhaltigen und energieeffizienten Zukunft forschenden Aspekt der chemischen Forschung oft übersehen wird.

Dies bleibt nicht ohne Folgen auf die Berufswahl: Das Interesse sowie die Motivation von Jugendlichen, eine naturwissenschaftliche Karriere zu ergreifen, scheint häufig gering zu sein [37]. Auch nimmt die Ausprägung des individuellen Interesses und der Freude am Fach Chemie zwischen der Jahrgangsstufe 9 und 11 ab [38].

Das mehrdimensionale Konstrukt Interesse sollte aber in diesem Zusammenhang nicht nur als bloßes Verhältnis zwischen Person und Gegenstand (Person-Gegenstand-Theorie) gesehen werden, sondern vielmehr sollten auch epistemologische Faktoren als relevant mit einbezogen werden.

Ausschlaggebend für die Frage, ob Schülerinnen und Schüler Interesse am Gegenstand Chemie haben sind auch emotionale und wertbezogene Faktoren „sozial geteilte Bedeutungen“, die der Chemie, dem Chemieunterricht anhaften können.

Ebenso spielt es eine Rolle, ob die Lernenden selbst ihr Selbst über die sozial geteilte Bedeutung der Chemie definieren wollen [37,39]. Die affektiven Faktoren, die vielfach auch durch dieses epistemische Zuschreiben beeinflusst werden, die dem Fach Chemie anhaften, spielen also eine große Rolle bezüglich Interesses und Motivation.

Es bietet sich folglich die Chance, durch die gezielte Thematisierung von Nachhaltigkeit im Chemieunterricht und die Integration von Experimenten zu modernen Materialien, die den nachhaltigen Charakter der chemischen Forschung unterstreichen, das Image der Chemie und die damit einhergehenden Zuschreibungen zu verbessern. Die Chemie ist eine fortschrittliche und an einer nachhaltigen Zukunft arbeitende Naturwissenschaft. Dies auch im Unterricht zu verdeutlichen kann auch vor dem Hintergrund von gesellschaftlichen Trends wie *Fridays for Future*, *Zero-Waste* und Evidenzen sinnvoll sein. Nachdem das Thema „Nachhaltigkeit“ ein Thema ist, mit dem sich bereits im Jahre 2009 64 % der Jugendlichen auseinandergesetzt haben [40], kann dies nur begrüßt werden.

Die Fragen nach dem Nutzen von Nachhaltigkeit und BnE im Chemieunterricht begründet sich also nicht nur durch die Forderung einer allgemeinbildenden Komponente im Chemieunterricht, sondern auch aus Sicht der *Scientific Literacy* und einem authentischen Bild der Chemie. Nahezu alle deutschen Lehr- und Bildungspläne fordern einstweilen das Erreichen einer naturwissenschaftlichen Grundbildung im Chemieunterricht. Diese Festschreibung folgte unter anderem aus den Ergebnissen der PISA Studie 2006 (Schwerpunkt Naturwissenschaften), in welcher die Lernenden nicht ausreichend in der Lage waren, das im Fach Chemie erlernte Fachwissen und Konzepte mit ihrem Alltag in Beziehung zu setzen. Gleichzeitig wurde darauf hingewiesen, zur Nachwuchssicherung das Interesse der Jugendlichen für Naturwissenschaften zu fördern [41]. Anknüpfend an das Interesse, der Bedeutsamkeit und dem Trend um das Thema Nachhaltigkeit kann Nachhaltigkeit im Chemieunterricht auch hier viel leisten.

Seit der Erhebung der naturwissenschaftlichen Grundbildung im Rahmen der PISA Studie 2006 wurde von der OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*) ein Rahmenkonzept für *Scientific Literacy* entworfen, in dem die klare Orientierung auf Kontexte (authentische Situationen) gefordert wird und auch affektive Dimensionen zugewiesen werden. Gleichzeitig ist ein wichtiges Ziel, ein Bewusstsein zu schaffen, wie Wissenschaft unsere materielle, intellektuelle und kulturelle Umwelt gestaltet [42] und damit Alltagsnähe zwischen gelernten Konzepten und Alltag der Lernenden zu schaffen. Neben naturwissenschaftlichem Wissen und Wissen über Naturwissenschaften spielt also auch das Interesse an Naturwissenschaften und die Wertschätzung der naturwissenschaftlichen Forschung sowie die damit einhergehende Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung eine entscheidende Rolle einer Umsetzung von BnE im Chemieunterricht.

Die Frage nach dem „Cui bono?“ einer Implementierung von nachhaltigen Themen und Bildung für nachhaltige Entwicklung in den Chemieunterricht ist also auch durch die Imagefrage und den Beitrag einer BnE zur *Scientific Literacy* begründet. Dies zeigt die Notwendigkeit für die chemiedidaktische Forschung zur Entwicklung neuer Lehr- und Lernzugänge unter Beachtung der aktuellen Fachforschung auf.

3.4 Moderne Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit im Fach Chemie

Die Forderung, dass sich moderner Chemieunterricht an Alltag und authentischen Kontexten orientiert, ist nicht neu in der chemiedidaktischen Forschung und Praxis. Wie in den vorangegangenen Ausführungen dargelegt, kann das Fach Chemie und sein Selbstverständnis durch die gezielte Thematisierung von nachhaltigen Themen profitieren.

Um die Rolle der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung zu zeigen und damit BnE im Chemieunterricht umzusetzen, schlagen Burmeister et. al. (2012) [43] und Zowoda et al. (2019) [44] vier Möglichkeiten vor, Themen der Nachhaltigkeit mit dem Chemieunterricht zu verbinden:

1) **Implementierung von Green Chemistry in die Experimentierpraxis:**

Dies beinhaltet – in Bezug auf die 10 Punkte der Green Chemistry – beispielsweise den Austausch von gefährlichen oder umweltgefährdenden Substanzen, die Nutzung von alternativen Reaktionswegen oder die Anpassung des Versuchsaufbaus, hier von klassischem Makro- zu Microscale-Experiment. Ein großer Vorteil dieser Art der Einbindung in den Chemieunterricht ist der deutlich verringerte Chemikalienverbrauch und die Vermeidung bzw. Verringerung von chemischen Abfällen. Der Wandel wird dabei aber nicht zwingend explizit thematisiert. Gleichzeitig wird die gesellschaftlich-soziale Komponente tendenziell vernachlässigt oder erst gar nicht thematisiert. Viele der oben genannten Punkte werden allerdings aus Kostengründen und durch Vorgaben der Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (RiSU) [45] obligatorisch an deutschen Schulen durchgeführt, sodass hier eine geeignete Option für einen Rückbezug auf Green Chemistry gegeben wäre.

2) **Einbezug von Inhalten der nachhaltigen Chemie als Kontext:**

Eine weitere Möglichkeit bietet der Einbezug von Inhalten aus der nachhaltigen Chemie im Chemieunterricht. So bieten sich Kontexte wie der Klimawandel zum fachinhaltlichen Lernen über erneuerbare Energien. Wichtig erscheint hierbei, das Wechselspiel zwischen Chemie und Gesellschaft nicht aus dem Auge zu verlieren und gezielt zu implementieren.

3) **Nachhaltigkeit und BnE als Teil der Schulentwicklung**

Ein weiteres Modell sieht Bildung für nachhaltige Entwicklung als Teil der Schulentwicklung. Damit wird der Chemieunterricht geöffnet. Ein konsequent fächerübergreifender Ansatz garantiert die Thematisierung in der Schule. Alle Fächer und Gremien der Schule sind Teil der nachhaltigen Entwicklung und potenzieller Strategien. Dieser Ansatz ermöglicht zwar einen holistischen Ansatz, könnte allerdings dazu führen, dass die Besonderheiten des Faches Chemie nur noch schwer erkennbar sind.

4) **Aufgreifen kontroverser Fragestellungen aus der Nachhaltigkeitsdebatte**

Bei diesem Modell sollen Fragestellungen aus der Nachhaltigkeitsdebatte mit relevanten Themen aus der Chemie und chemisch-technischen Fragestellungen

verbunden werden. Dies ermöglicht das tiefere Ergründen der Rolle von fachwissenschaftlichen Informationen, Konzepten und die Entwicklungsleistung der Fachwissenschaften, die zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen. Auch dieser Ansatz eignet sich für fachaufweitenden bzw. fächerübergreifenden Unterricht.

Besonders eine erweiterte Version des Modells vier scheint im Rahmen der vorliegenden Arbeit sinnvoll. Es ergibt sich die Möglichkeit, anhand der modernen Materialien, kontroverse Debatten des Alltags aufzugreifen und zeitgleich chemische Fachforschung in den Unterricht zu integrieren. Es besteht die Möglichkeit, besonders dem Kompetenzbereich Bewertung zuzuarbeiten.

Vielfach wird in der fachchemischen Forschung an Universitäten, Forschungsverbänden aber auch in der Industrie an Materialien und Werkstoffen geforscht, die eine nachhaltige Entwicklung ermöglichen und endliche Ressourcen schonen oder gänzlich ersetzen können. Moderne Materialien und Werkstoffe aus der chemischen Forschung, beispielsweise zu den Themen Mobilität (Energiespeicherung in Elektroautos, Wasserstoffspeicherung), Bauen und Wohnen (Nano-Beschichtungen) oder die gezielte Substitution von toxischen oder umweltbedenklichen Stoffen in Alltagsprodukten, können den nachhaltigen und fortschrittlichen Charakter der Chemie aufzeigen. Oftmals ist den Schülerinnen und Schülern aber auch der Gesellschaft die Entwicklungsarbeit hinter scheinbar alltäglichen Materialien und Gegenständen nicht bewusst. Die Verbindung zwischen der Nachhaltigkeitsdebatte und der Chemie wird, zumindest im positiven Sinne, nicht hergestellt.

Mit der Neuerung der Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife der KMK (2020), finden sich unter dem Inhaltsbereich Lebenswelt und Gesellschaft, aktuelle Technologien und chemische Produkte der Begriff der „Modernen Werkstoffe“. Damit sind diese innovativen Produkte der Fachforschung, insbesondere dann, wenn sie im Schulunterricht erklärbar und bestenfalls experimentell umsetzbar sind, Teil des Chemieunterrichts und als solche auch verankert.

3.5 Interviewstudie zum Begriffsverständnis Nachhaltigkeit aktiver Lehrkräfte

Vor Burmeister und Eilks (2012) [46] und Burmeister et al. (2013) [47] war wenig darüber bekannt, welche grundsätzlichen Einstellungen und Kenntnisse Chemielehrkräfte über das Thema Nachhaltigkeit im Allgemeinen und deren Berücksichtigung im Chemieunterricht haben. In der Fragebogenstudie der Forschenden wurden dabei offene Fragen zum

Verständnis von Nachhaltigkeit, nachhaltiger Entwicklung und Bildung für nachhaltige Entwicklung gestellt. Auch die Bereitschaft von Studierenden und Referendaren BnE im Schulunterricht einzusetzen, wurde erfragt. Ziel der Studie war vor allem die Erhebung der Informationslage der aktiven Lehrerinnen und Lehrer über die theoretischen Konzepte hinter BnE und Nachhaltigkeit. Zentrale Erkenntnisse der Studie waren, dass vorwiegend ökologische Assoziationen bestehen, Studierende nur mangelnde Kenntnis besitzen und Referendare zu wenig mit diesem Themenkomplex in ihrer Ausbildung konfrontiert werden. BnE verwandte Bildungskonzepte sind bisher in nahezu keinen Studiengängen verankert. An bayerischen Universitäten findet sich einzig an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg in den Lehramtsstudienfächern Biologie und Wirtschaftswissenschaften eine Verankerung der BnE [48].

Von besonderer Relevanz für das hier vorliegende Forschungsvorhaben ist deshalb, ob aktiv im Dienst befindliche Lehrerinnen und Lehrer des Faches Chemie einen Zusammenhang zwischen dem Unterrichtsfach Chemie und dem Aspekt der Nachhaltigkeit sehen und insbesondere, ob sie über experimentelle Zugänge verfügen, die den Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung aufzeigen. Es gilt auch herauszufinden, wo aktive Lehrkräfte Anknüpfungspunkte hierfür sehen. Schließlich sind nach Hattie (2009) die Lehrer der entscheidende Faktor für Reformen in der Bildung.

Um eine Orientierungsgrundlage zu schaffen, wurden im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit in einer Interviewstudie 13 aktive, voll ausgebildete Lehrkräfte mittels Interviews befragt. Die durchgeführten Interviews dauerten im Mittel 30 min und waren als Leitfadenterview angelegt. Der dazugehörige Interviewleitfaden findet sich im Anhang (Anhang 1). Die Auswertung der Interviews erfolgte gemäß Qualitativer Inhaltsanalyse [49]. Dabei wurden die Lehrkräfte zu den Themenbereichen Begriffsverständnis Nachhaltigkeit, nachhaltige Entwicklung und Bildung für nachhaltige Entwicklung befragt. Ebenso waren die Rolle von nachhaltiger Entwicklung im Chemielehrplan sowie Anknüpfungspunkte an den Lehrplan Chemie Teil des Interviews.

Bezüglich des Begriffsverständnisses Nachhaltigkeit zeigt sich, dass intuitiv der Begriff als Ressourcenschonung oder in Hinblick auf Abfallmanagement definiert wurde. Zweimal wurde der Begriff mit nachhaltigem Lernen verknüpft. Grundsätzlich zeigte sich eine Präferenz die ökologische und soziale Dimension zu thematisieren (Abb. 5).

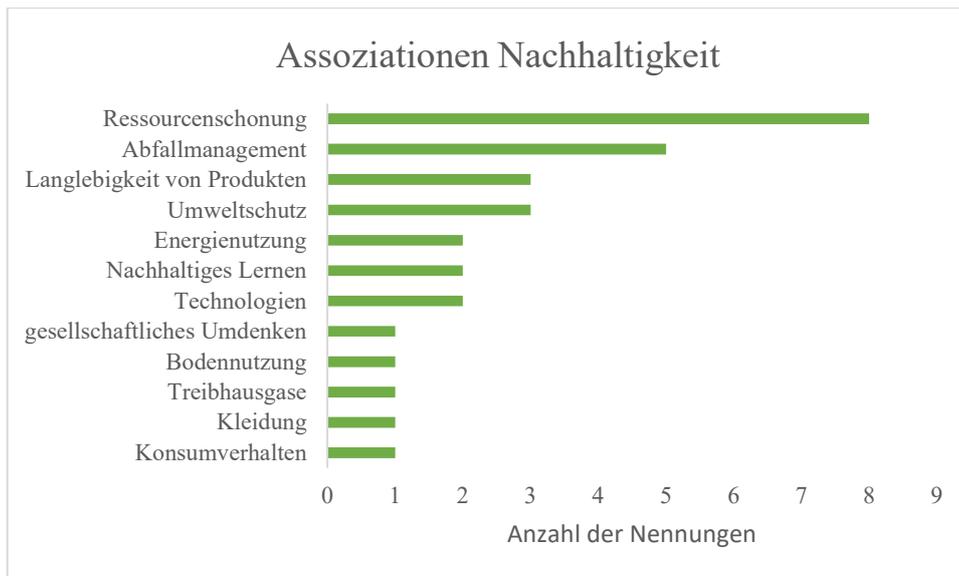


Abb. 5: Nennungen und Kategorien "Begriffsverständnis Nachhaltigkeit"

So antwortete eine Lehrkraft beispielsweise:

„[...]ich würde das jetzt immer nur so gerade im Moment so umschreiben, eben [...], dass man [...] Ressourcen, die man zur Verfügung hat [...] nicht verschwendet, weil wir haben ja nur eine Erde zur Verfügung [...] sozusagen, also in die Richtung würde ich das (aufziehen).“

Die Definition des Begriffs „nachhaltige Entwicklung“ war keiner Lehrkraft bekannt. Häufig wurde er mit politischen Entwicklungsaufgaben, Effizienz von Produktionen, Gesellschaftseinstellungen und Energieeinsparung in Verbindung gebracht.

Ähnlich verhielt es sich auch bei Fragen des Begriffsverständnisses zu „Bildung für nachhaltige Entwicklung“. Zwar war den Lehrkräften die Begrifflichkeit in der Regel geläufig, aber nicht definierbar. Zwei Lehrkräfte gaben an, das Konzept nur unter dem Begriff Umweltbildung zu kennen. Grundsätzlich wurde das BnE Konzept als Umsetzung von Nachhaltigkeit in der Bildung beschrieben, wobei der Fokus stark auf Umweltschutz, Demokratieerziehung und auch nachhaltigem Lernen liegt. Außerdem stellte sich eine starke Fokussierung auf den Wahlunterricht heraus, Themen der Nachhaltigkeit in einer außerunterrichtlichen Arbeitsgemeinschaft freiwillig für die gesamte Schule, losgelöst von Fachinhalten, zu thematisieren. In drei Fällen wurde erläutert, dass BnE vor allem fächerübergreifend in Projekten verortet ist, wie auch folgendes Zitat beispielhaft aufzeigt:

„[...] also wir haben ja eine Öko-AG[...]aber eben jetzt eher auf einer freiwilligen Basis durch AGs als jetzt durch irgendwelche konkrete Unterrichtskonzepte, wobei man es natürlich schon immer versucht im Unterricht auch zu thematisieren.“

Auf die Frage nach einer Einschätzung der Lehrkräfte zur Rolle von Nachhaltigkeit in der Bildung ist festzustellen, dass Nachhaltigkeit vor allem in Projekten umgesetzt werden kann. Die Bedeutung des Themas Nachhaltigkeit wurde aber mehrfach herausgestellt. (Abb. 6).

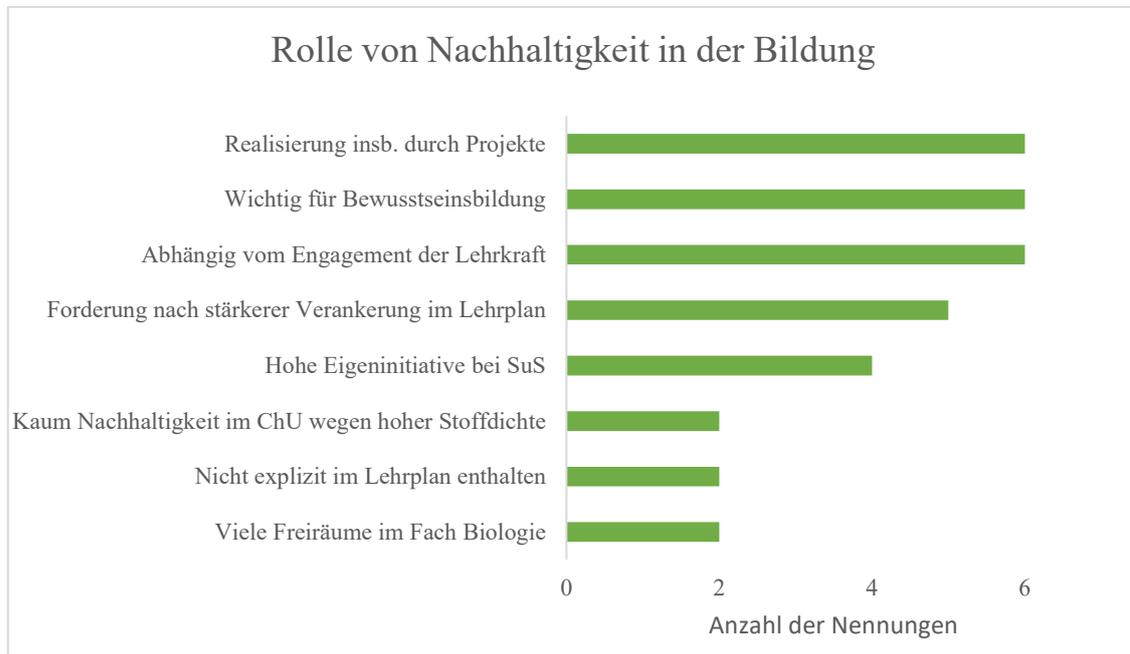


Abb. 6: Mehrfachnennungen von Aspekten, die die Rolle von Nachhaltigkeit in der Bildung aufzeigen

Mehrfach wurde Bezug genommen auf schulische Arbeitsgruppen und Wahlkurse, die sich mit Themen um Re- und Upcycling, Wiederverwertung oder Energiesparen beschäftigen.

„[...] wir haben so eine Arbeitsgruppe, die nennt sich Emma AG – und die beschäftigen sich ständig mit solchen Dingen [...] die Neueste ist jetzt dieses Rebeutel, dass man eben alte Stoffe, die man äh verwendet hat, wieder einsammelt und zu irgendwelchen neuen Stoffen, Taschen oder was auch immer für einen anderen Gebrauchsgegenstand umwandelt.“

Betont wurde auch, dass Nachhaltigkeit in der Bildung eine wichtige Rolle für die Bewusstseinsbildung der Schülerinnen und Schüler besitzt, die Umsetzung, aber abhängig ist vom Engagement der entsprechenden Lehrkraft, sodass Nachhaltigkeit nur teilweise umgesetzt wird:

„[...] BnE kommt immer mehr in letzter Zeit. [...] Aber so konkretisiert ist es [...] noch nicht so ganz meiner Meinung nach. Also jetzt kann jeder Lehrer noch selbst entscheiden, ob er so etwas thematisieren will oder ob er es nicht thematisiert [...].“

Die befragten Chemielehrkräfte sahen thematisch besonders die Fächer Biologie und Geografie als besonders geeignet an. Speziell im Unterrichtsfach Chemie sahen die Lehrkräfte Anknüpfungsmöglichkeiten besonders bei der Thematik der Kohlenwasserstoffe und Themen der Umweltchemie.

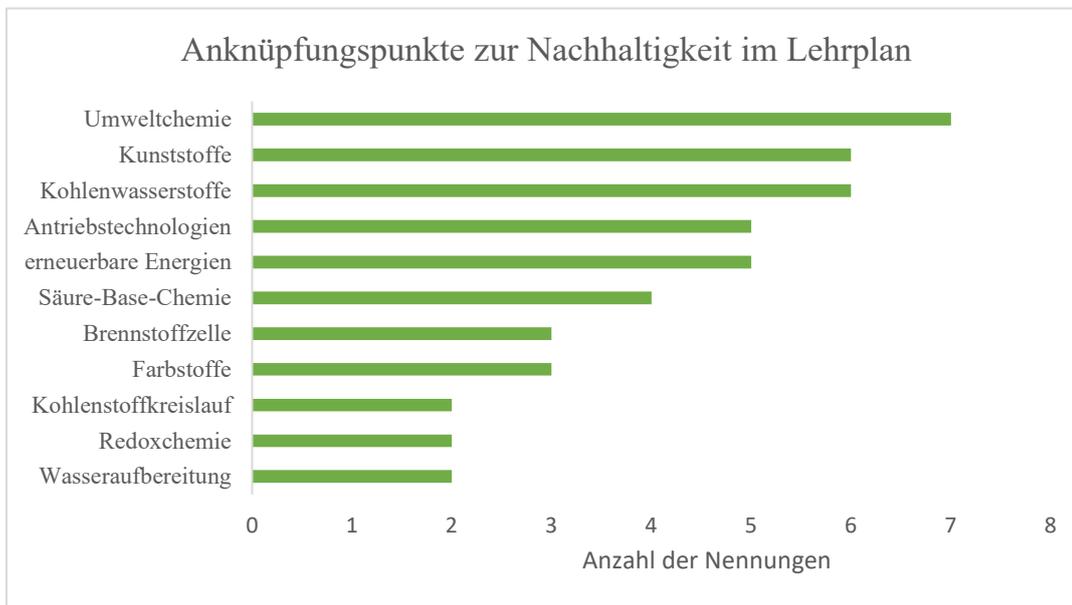


Abb. 7: Anknüpfungspunkte zur Nachhaltigkeit im Lehrplan Chemie

Eine Lehrkraft merkte aber an, dass die umweltchemischen Themen gerne als Themen für Referate bzw. Exkurse vergeben werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass diese tendenziell nicht prüfungsrelevanten Randthemen in Referaten abgehandelt werden und damit aus der gezielten Instruktion der Lehrkraft.

Aber auch Themenbereiche Antriebstechnologien, Kunststoffe und die Säure-Base-Chemie zeigen nach der Einschätzung der befragten Lehrkräfte Anknüpfungspunkte (Abb. 7)

Vielfach fiel es den Lehrkräften schwer, explizite Anknüpfungspunkte im gültigen Lehrplan benennen zu können:

„Ansonsten hätte ich jetzt bei den Fachlehrplänen gar keinen expliziten Punkt, sondern es quasi auf den höheren Ebenen ansiedeln würde, wo quasi die allgemeinen Bildungs- und Erziehungsziele – [...] Umwelterziehung ist ja wie gesagt einer der übergeordneten Ziele und das steht ja schon im Lehrplan seit Urzeiten drinnen.“

„Hat auf alle Fälle ihre Legitimation und einen festen Platz, der implementiert werden muss. Nur die Lehrpläne müssten dementsprechend überarbeitet werden, dass eben Raum dafür gegeben ist. Das heißt, an diversen Stellen streue ich das natürlich jederzeit in meinen Unterricht ein, aber so konkret längere Zeit mit der Thematik [befassen] – oder – kann man sich eigentlich nicht. Zumindest nicht in den Fächern Biologie und Chemie

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Gruppe der befragten Lehrkräfte der Großteil ein intuitiv richtiges Verständnis des Begriffes Nachhaltigkeit hat, aber kein theoriebasiertes Verständnis. Die Erkenntnisse aus dieser Interviewstudie deckt sich für bayerische Lehrkräfte mit den Erkenntnissen, die Burmeister und Eilks (2012) [46] und Burmeister et. al. (2013) [47] für Referendare und Lehramtsstudierende als auch für aktive Lehrkräfte erhoben haben:

Bestimmte Quellen oder Zitate werden nicht angeführt, intuitiv wird aber eine Definition im Sinne von nachhaltiger Ressourcennutzung getätigt. Das Modell der Drei-Dimensionen der Nachhaltigkeit ist den Lehrkräften nicht bekannt, trotzdem werden die drei Teilbereiche angesprochen und ausgeführt. Themen wie Abfallentsorgung und Umweltschutz kommen vermehrt zum Ausdruck.

Äußerungen, dass BnE vor allem in Projekten verortet ist und dabei das fächerübergreifende betont werden soll, weisen darauf hin, dass die Lehrkräfte ein Bewusstsein für die Bedeutung von interdisziplinärem Wissen als notwendige Voraussetzung für BnE haben.

Bei den Befragten herrscht außerdem Einigkeit, dass Nachhaltigkeit ein wichtiges Bildungsziel ist. Häufig wird betont, dass das Thema stärker im Lehrplan verankert werden sollte und bisher die Thematisierung stark vom Ermessen der einzelnen Lehrkraft abhängt. Auch lässt sich schließen, dass Lehrkräfte keine klaren Handlungsempfehlungen im Lehrplan sehen, wie BnE im Chemieunterricht sinnvoll umgesetzt werden kann:

„Wir müssen da irgendwie was entwickeln, aber so richtig -äh- also, ich glaube, weil halt keiner auch so sich klar ist darüber, was denn Nachhaltigkeit für ihn selber ist und was er dann dazu auch unterrichten soll eigentlich [...]“

Diskussionen zur Nachhaltigkeit im Chemieunterricht werden aber grundsätzlich als gewinnbringend betrachtet.

Einige Schilderungen in den Interviews weisen darauf hin, dass Lehrkräfte offenbar häufig den Aspekt der Nachhaltigkeit erkennen, wenn bei Experimenten entweder fehlende Nachhaltigkeit thematisiert wird (Umgang mit Chemikalien und deren Verbrauch), Gefahrstoffe thematisiert werden oder Bezug auf die Energieeffizienz chemisch-technischer Verfahren genommen wird. Hilfreich für eine Verbesserung des Images der Chemie können derartige Zugänge aber nicht sein und sollte auch aus theoretisch-methodischer Perspektive für BnE vermieden werden.

Die Frage, ob die Lehrkräfte über relevante, aktuelle Experimente in ihrem Repertoire verfügen, die den Gedanken der Nachhaltigkeit oder den Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung besonders aufzeigen, wird häufig negiert:

„Nein, [...] man sollte sich ja an dem Ordner orientieren – diesem „Chemie! Aber sicher!“//Hm - // Und wenn ich mich daran orientiere, würde ich sagen, sind da keine Versuche drin, die – äh – Nachhaltigkeit explizit thematisieren.“

Gerade letztgenannte Aussage begründet die Kooperation aus Fachdidaktik und Fachwissenschaft zur Entwicklung von neuen, schulgeeigneten Experimenten, die die Aktualität der Fachforschung aufzeigen und gleichzeitig den nachhaltigen Charakter der Chemie aufzeigen können. Die Entwicklung legitimiert sich auch vor dem Hintergrund, dass auf Seiten der Lehrkräfte ein großes Interesse für dieses Themengebiet herrscht, das aber mit unzureichendem Vorhandensein von geeigneten Experimenten und Materialien verbunden ist.

4. Lehrkräftefortbildung im Unterrichtsfach Chemie

Innerhalb der beruflichen Laufbahn von Lehrkräften kann die persönliche und fachliche Entwicklung hin zum Lehrberuf als lebenslanger Prozess aufgefasst werden [50]. Dieser lebenslange Lernprozess gliedert sich in der deutschsprachigen Literatur gemeinhin in drei Phasen (Abb. 8), die jeweils durch unterschiedliche, ausbildungsverantwortliche Akteure geprägt und formell und strukturell voneinander getrennt sind [51].

Die erste Phase, das Studium an einer deutschen Universität (bzw. in Baden-Württemberg auch an einer Pädagogischen Hochschule), dient dem Erwerb von Fachwissen aus den einzelnen Unterrichtsfächern und deren Fachdidaktiken. Berufspraxis und erste Einblicke in den Beruf werden hier durch obligatorisch abzuleistende Praktika gewährleistet. In der anschließenden zweiten Phase, dem Vorbereitungsdienst bzw. Referendariat, findet die weitere schulpraktische Ausbildung an Studienseminaren statt. Je nach Bundesland unterscheidet sich die Organisation und Zeitdauer (12–24 Monate) des Vorbereitungsdienstes. Mit Abschluss des Vorbereitungsdienstes und der einhergehenden zweiten Staatsprüfung gelten Lehrkräfte in Deutschland als formal voll ausgebildet [52] und erhalten damit die Lehrbefähigung für die jeweilige Schulart. Auch die Voraussetzungen für eine Einstellung oder Verbeamtung im Schuldienst sind damit geschaffen. Daraus aber, wie Nolle (2004) [53] anmerkt, ein „vollständig ausgebildetes berufliches Selbstverständnis“ und „umfassende unterrichtliche Kompetenz“ zu schlussfolgern, wäre voreilig. Auch Terhart (2013) [54] ist der Ansicht, dass sowohl die universitäre Ausbildung auf der einen Seite, als auch der Vorbereitungsdienst auf der anderen Seite, günstigstenfalls einen Kompetenzaufbau während der ersten Berufsjahre ermöglichen.



Abb. 8: Phasen der Lehrkräftebildung in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

Ähnliche evidenzbasierte Vermutungen lassen sich auch im Modell der „Abfolge von Themen der Berufslaufbahn von Lehrkräften“ nach Hubermann (1991) erkennen, das auch

zeigt, dass Lehrkräfte im Laufe ihrer Berufskarriere immer wieder unterschiedlichen und neuen Anforderungen gegenüberstehen.

Weniger eindeutig formal abgrenzen lässt sich die dritte Phase der Lehrerbildung. Diese Phase umfasst die gesamte berufliche Laufbahn einer Lehrkraft, beginnend mit dem Berufseintritt. Einen besonderen Stellenwert nimmt in dieser Phase die berufsbegleitende Fort- und Weiterbildung ein. Diese letzte und längste Phase aber wird häufig in ihrer Wichtigkeit als fester Bestandteil der Berufslaufbahn, als berufsbegleitendes System zur Unterstützung, vernachlässigt [52].

Im Mittelpunkt der Lehrerfortbildung steht deshalb nach Terhart 2001 die „Aufrechterhaltung bzw. Aktualisierung des Kompetenzniveaus der Erstausbildung (Qualifikationserhaltung)“. Hingegen dient die Lehrkräfte-Weiterbildung der Übernahme einer neuen Funktion im Schuldienst [4].

Im Vergleich zu anderen Ländern gehören deutsche Lehrkräfte zu jenen mit der geringsten Fortbildungsbeteiligung. Deutsche Lehrkräfte belegen in einer Rangfolge aller 29 studienbeteiligten OECD-Länder lediglich Platz 26 [55]. Im Vergleich zu den vorangestellten Phasen, wird der dritten Phase im Gesamten weniger Aufmerksamkeit geschenkt. Dies lässt sich auch seitens der Lehrkräfteschaft feststellen: Der berufsbegleitenden Fortbildung könnte, im Sinne intrinsischer Motivation, mehr Offenheit und Bereitschaft entgegengebracht werden. Gleichwohl kann dies auch der Tatsache geschuldet sein, dass der Lehrberuf durch eine Entkoppelung von Kompetenzentwicklung („Leistung“) und Laufbahnentwicklung („Karriere“/Beförderung) gekennzeichnet ist. Beförderungen erfolgen oftmals vielmehr struktur- oder zeitbedingt (Altersgründe) [56].

Zwar zeigt sich im innerdeutschen Bildungsföderalismus gleichermaßen in allen Bundesländern eine grundsätzliche Verpflichtung zur Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen, in der praktischen Umsetzung aber existiert dieser hohe Stellenwert häufig nicht: Nur in den drei Bundesländern, namentlich Bayern, Bremen und Hamburg, wird jene Verpflichtung seitens des Dienstherrn auch quantifiziert und kontrolliert. Unter anderem dieser Tatsache ist geschuldet, dass es kaum quantitative Daten über den Stand der Lehrkräftefortbildung in Deutschland gibt [57] und die deutsche Forschungslage als „weißer Fleck auf der Forschungslandkarte“ und „defizitär“ bezeichnet werden kann [58].

Die Bedeutung des lebenslangen Lernens im Beruf wird durch ein weiteres Argument gestützt, das insbesondere auch Chemielehrkräfte betrifft: Der Beruf des Lehrers unterliegt – wie viele andere Berufe auch – nicht nur in seiner pädagogisch-didaktischen Hinsicht „dem Wandel der Zeit“, auch Fachstrukturen und Trends innerhalb der einzelnen Fachdomänen

sind nicht statisch, sondern entwickeln sich insbesondere in den Naturwissenschaften und technisch geprägten Unterrichtsfächern stetig fort.

Nicht umsonst wird von Lehrerinnen und Lehrern in den Standards der Lehrerbildung der Deutschen Kultusministerkonferenz erwartet, dass sie ihre Kompetenzen ständig weiterentwickeln und wie andere Berufsgruppen Fort- und Weiterbildungsangebote nutzen, um wissenschaftliche Erkenntnisse innerhalb ihrer beruflichen Tätigkeit berücksichtigen zu können [59]. Im Hinblick auf das Unterrichtsfach Chemie manifestiert sich damit die Bedeutsamkeit von gezielten Fortbildungsveranstaltungen, um ein zeitgemäßes Abbild aktueller Fachforschung präsentieren zu können.

4.1 Status Quo der Chemie-Lehrkräftefortbildung in Deutschland

Für die Berufsgruppe der Chemielehrkräfte ergibt sich bundeslandübergreifend eine Besonderheit: Bereits seit dem Jahr 2002 finanziert die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) in Zusammenarbeit mit den Fonds der Chemischen Industrie (FCI) an sieben Standorten Lehrerfortbildungszentren (Abb. 9). Speziell für Lehrkräfte des Unterrichtsfachs Chemie finden hier vielfältige Fortbildungsveranstaltungen statt, wobei zu den aktuellen Schwerpunktthemen der GDCh-Kommission für Lehrkräftefortbildung folgende Themenbereiche gehören:

- Nachhaltigkeit im Chemieunterricht,
- Chemie und Life Science,
- Moderne Materialien und Werkstoffe,
- Lehr und Lernkonzepte im Chemieunterricht,
- Bildungsstandards/Curriculum,
- Chemische Konzepte,
- Naturwissenschaftliche Früherziehung,
- Sicherheit im Chemieunterricht und
- Digitalisierung in der Chemie - Industrie und Unterricht.

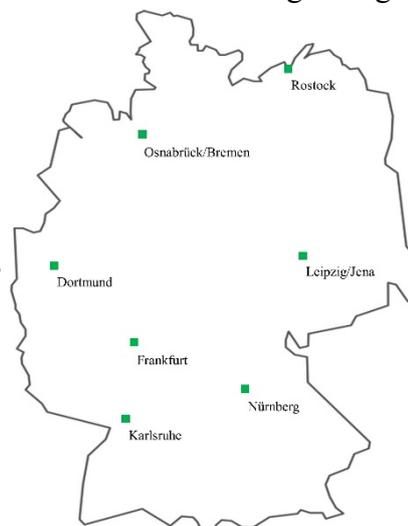


Abb. 9: Verteilung der GDCh-Fortbildungszentren in Deutschland (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

Ein großer Anteil der durchgeführten Fortbildungen sind

laborpraktisch und halb-, ganz- oder mehrtägig angelegt. Im Jahr 2019 wurden so insgesamt 393 Kurse durchgeführt, in welchen 5800 Lehrkräfte fortgebildet werden konnten [60]. Gleichzeitig ermöglichen die Fortbildungszentren auch Fortbildungen durch externe Referierende in Schulen für einzelne Fachschaften oder auch in Form einer regionalen Fortbildung. Diese Fortbildungszentren stellen eine chemiespezifische Besonderheit dar und

zeigen die Verknüpfung von Wissenschaft, der dazugehörigen Fachdidaktik, Industrie und Bildungswesen. Diese Form der Fortbildung durch einen freien Träger kann ergänzend zu den durch die Bundesländer organisierten, staatlichen Formen der Lehrerfortbildung gesehen werden. Zusätzlich zu den beiden bisher erwähnten Angeboten existieren auch Angebote großer Chemiekonzerne wie BASF SE, Bayer AG oder der WACKER Chemie AG. Diese sind häufig angegliedert an Schülerlabore oder als dezentrales Fortbildungsangebot in Verbindung mit Schulversuchskoffern für Lehrerinnen und Lehrer. Die Themen der Fortbildungen oder Versuchskoffer sind meist häufig forschungs- und unternehmensnah und greifen gezielt aktuelle Thematiken auf. Neben dem reinen Angebot der Fortbildungen ist ein zentraler Baustein aber auch die Evaluation und Weiterentwicklung von Angeboten für Fortbildungsmaßnahmen sowie die Wirksamkeit der Fortbildungen, besonders im Hinblick auf den „Output“ für den Chemieunterricht.

4.2 Empirische Befunde zur Lehrkräftefortbildung

Aus den zuvor angeführten Forderungen für eine verstärkte Lenkung der Aufmerksamkeit auf Phase drei der Lehrkräftebildung in Deutschland entsteht auch die Notwendigkeit eines evidenzbasierten Qualitätsmanagements für Lehrkräfte Fort- und Weiterbildungsangebote. Dies ergibt sich auch insbesondere vor dem Hintergrund, dass Fortbildungen oftmals nicht die intendierte Wirkung erzielen [61]. Die Frage nach professioneller, erfolgsversprechender und wirkungsvoller Lehrkräftefortbildungen mit einem hohen Transfer in den Schulunterricht gestaltet sich dabei multidimensional.

Neben deutschsprachiger Forschung zur Wirksamkeit der Lehrerfortbildung [58,62,63] sind international besonders US-amerikanische Studien literaturbekannt [64,65]. So stellt Desimone (2009) [64] fünf Leitlinien auf, die als Fundament für erfolgreiche und wirkungsvolle Lehrkräftefortbildung dienen können.

- Inhaltsspezifischer Fokus (*content focus*): Fachspezifische Inhalte und deren mögliche Implementierung in den Schulunterricht, stellen einen der einflussreichsten Punkte für erfolgreiche und wirkungsvolle Lehrkräftefortbildung dar. Auch der Blick auf den Lernprozess durch die Schülerinnen und Schüler ist zu berücksichtigen.
- Aktives Lernen (*active learning*): Vielversprechend für wirkungsvolle Lehrkräftefortbildungen sind aktive Lerngelegenheiten (im Gegensatz zu passiven wie dem bloßen Zuhören bei einem Expertenvortrag), in welchen die Lehrerinnen und Lehrer den Lerngegenstand eigenständig bearbeiten können. Interaktive Formen bieten sich

insbesondere in der Chemielehrkräftefortbildung durch die eigenständige Durchführung von Experimenten an. Hier wird den Lehrkräften die Möglichkeit gegeben, die Versuchsdurchführung zu erproben und zeitgleich interaktiv mit anderen Fortbildungsteilnehmern in Austausch zu geraten.

- Kohärenz (*coherence*): Fortbildungsinhalte sollten im Einklang mit den Kenntnissen und Überzeugungen der Lehrkräfte stehen und zugleich eine Passung zu staatlichen Vorgaben wie dem Lehrplan aufweisen.
- Zeitliche Dauer (*duration*): Hinsichtlich des zeitlichen Umfangs einer Fortbildungsveranstaltung zeigt sich, dass im Allgemeinen mehrtägige Fortbildungen eintägigen Veranstaltungen vorzuziehen sind, was sich aber häufig praktisch nicht mit dem entstehenden Unterrichtsausfall vereinbaren lässt und zu institutionellen Hemmnissen führen kann.
- Kollektive Zusammenarbeit (*collective participation*): Im Rahmen der Veranstaltungen sollte auf Zusammenarbeit der Fortbildungsteilnehmer Wert gelegt werden, um partizipative Lernformen zu ermöglichen.

Die grundlegende Annahme ist, dass ausgehend von einer Lehrkräftefortbildung, die sich an aufgeführten Rahmenbedingungen orientiert, eine Verbesserung bzw. Anpassung der Handlungskompetenz auf Seiten der Lehrkräfte stattfindet.

Diese Anpassung soll sich im Anschluss bestenfalls positiv auf den Kompetenzerwerb der Schülerinnen und Schüler auswirken. (Abb. 10).

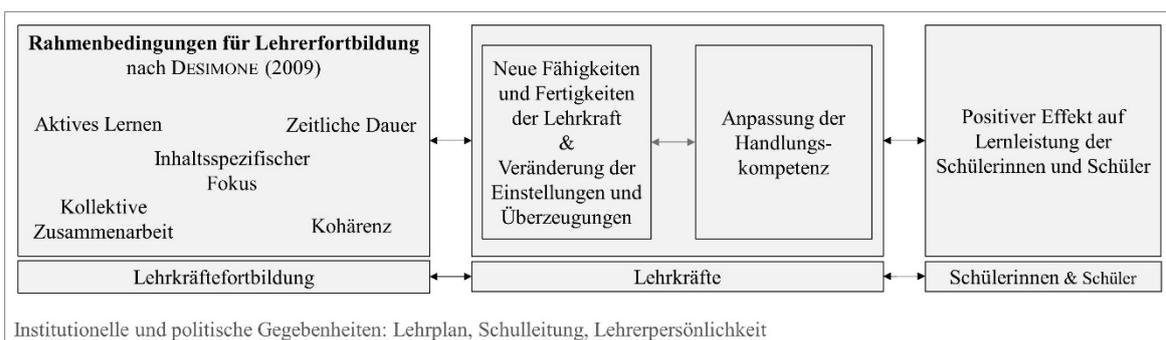


Abb. 10: Konzeptioneller Rahmen für Lehrkräftefortbildungen nach Desimone (2009) (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

Desimone (2009) [64] merkt dabei an, dass weitere Determinanten Einfluss haben können, deren Untersuchung und Identifikation noch ausstehen.

Eine große Überschneidung zeigen diese genannten fünf Punkte auch mit der deutschsprachigen Studienlage.

Den vorherrschenden Befunden in der deutschsprachigen Forschung und Literatur ist zu entnehmen, dass Lehrerfortbildungsmaßnahmen besonders dann eine hohe Akzeptanz erfahren, wenn sie „*close to the job*“ sind, also unmittelbar in unterrichtliches Handeln umsetzbar sind. Je höher Lehrkräfte die inhaltliche Relevanz einschätzen, umso wahrscheinlicher ist die Teilnahme daran und zugleich die Wahrscheinlichkeit eines erfolgversprechenden Transferprozesses [62]. Lehrerfortbildungen sollen bedarfsorientiert gestaltet sein und Kohärenz zu schulischen, länderspezifischen Vorgaben und Reformen aufzeigen [51,66]. Auch bezüglich der zeitlichen Dauer werden längerfristig angelegte, mehrteilige Fortbildungsveranstaltungen in Übereinstimmung mit Desimone (2009) als wirksamer erachtet [67], wobei die Dauer allein kein hinreichendes Kriterium für wirksame Fortbildungsveranstaltungen ist. In Bezug auf die Dauer zeigt sich, dass in Deutschland 77 % der Fortbildungen nicht länger als einen Tag dauerten [68].

In der deutschsprachigen Literatur findet vorrangig das deutlich vielschichtigere „Angebots-Nutzungs-Modell“ nach Lipowsky (2010) [62] Anwendung (Abb. 11).

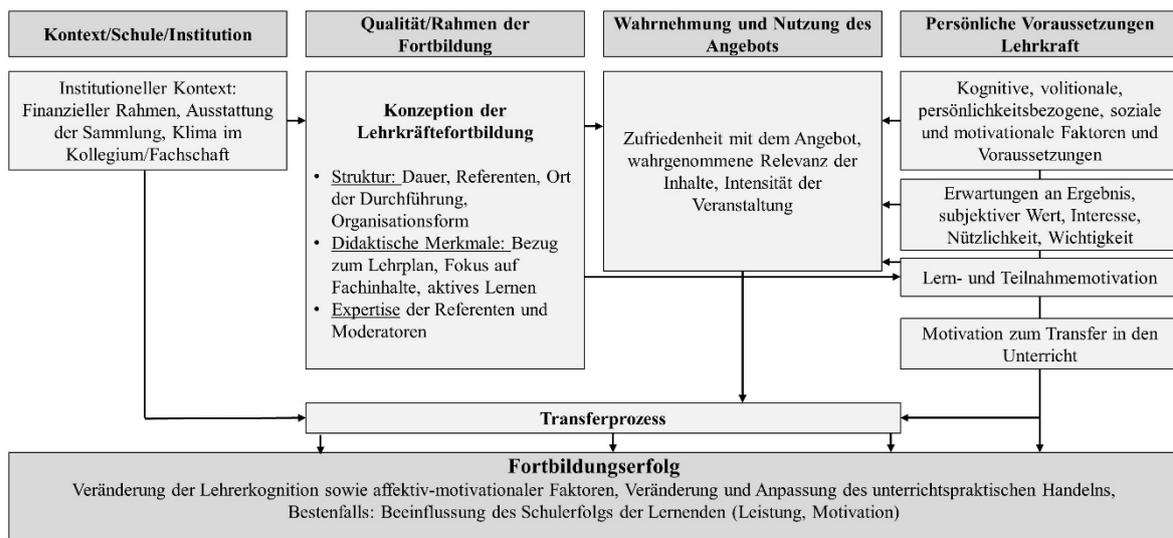


Abb. 11: Erweitertes Angebots-Nutzungsmodell nach Lipowsky im Rahmen von Fort- und Weiterbildung (Quelle: verändert nach Lipowsky 2014b; Lipowsky und Rzejak 2021)

Ähnlich wie bei Desimone (2009) [64] stellt das Angebots-Nutzen-Modell einen Rahmen relevanter Einflussfaktoren für professionelle und wirksame Lehrerfortbildungen dar und fasst so wesentliche Merkmale zusammen. Dem Modell liegt die Annahme zu Grunde, dass erfolgreiches Lernen durch Professionalisierungsmaßnahmen wie Lehrkräfte Fort- und Weiterbildungen in einer Veränderung von beruflichen Überzeugungen, subjektiven

Tabelle 1: Zehn Merkmale wirksamer Lehrkräftefortbildungen als Symbiose der bisherigen Forschungsergebnisse (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

| Merkmale wirksamer Fortbildungsveranstaltungen Lipowsky und Rzejak (2021) [69] | |
|--|---|
| Inhaltliche Ausrichtung von Fortbildungen | Orientierung am Stand der Unterrichtsforschung Gezielter Einbezug von Erkenntnissen über motivierenden und lernwirksamen Unterricht; Tiefenstruktur des Unterrichts; Fortbildungen in Zusammenarbeit mit Fachdidaktiken; Merkmale demonstrieren und verdeutlichen |
| | Selbstgesteuertes Lernen von Schülerinnen und Schülern Wissen über Lernstrategien aufbauen; kognitive, meta-kognitive und motivationale Strategien; wissenschaftlicher Hintergrund |
| | Fokus auf zentrale unterrichtliche Anforderungen Handlungspraktiken wie Feedback geben, Sachverhalte erklären, Unterrichtsgespräch führen, Diagnose von Lernständen, Aufgaben gestalten, Fragen stellen |
| | Inhaltlicher Fokus Tiefe inhaltliche Auseinandersetzung, Lern- und Bearbeitungswege der SchülerInnen; Lernschwierigkeiten |
| | Förderung des Wirksamkeitserlebens Lehrer-Schüler-Interaktion; Varianten des Lehrerhandelns |
| Methodisch-didaktische Gestaltung der Fortbildung | Stärkung der kollegialen Kooperation Kollegialer Austausch und Zusammenarbeit; intensive Kooperation mit von Lehrpersonen motivierend; Fortbildungen für Teams, Fachschaften, Kollegien |
| | Verknüpfung von Input-, Erprobungs-, Reflexionsphasen Erproben der Fortbildungsinhalte, Anwendung der Inhalte, Übungs- und Anwendungsmöglichkeiten schaffen |
| | Feedback und Coaching Unterstützung der Erfahrungen von Lehrkräften durch Rückmeldung, Anregungen unterstützen; Ziele formulieren |
| | Angemessene Fortbildungsdauer Fortbildungsdauer Abhängig von Inhalt, Unterstützung nach Ende der Fortbildung bereitstellen |
| | Bedeutsame Inhalte und Aktivitäten Herausstellen der unterrichtsbezogenen Relevanz; Nähe zur Praxis; Relevanz an Beispielen verdeutlichen; Partizipationsmöglichkeiten für Teilnehmende schaffen; Praxisbezüge |

Theorien und deklarativen Wissensanteilen zu erkennen ist und schließlich eine Erweiterung und Flexibilisierung von unterrichtlichem Handeln zur Folge hat [61]. Eine bedeutende Rolle spielen dabei auch affektive Faktoren auf Seiten der Lehrkraft, da auch kognitive, volitionale, persönlichkeitsbezogene, familiäre und motivationale Faktoren der Teilnehmenden eine wesentliche Rolle spielen können. Dabei ist aktuell nicht mit Sicherheit festzustellen, wie diese Faktoren das berufliche Weiterlernen der Lehrkraft beeinflussen und mit institutionellen Faktoren interagieren.

Letztlich können derartige Modelle Anhaltspunkte für eine möglichst wirksame Fortbildung geben, obgleich diese auch nicht auf gleiche Weise auf alle Teilnehmenden wirkt [61]. Ein zentrales und gut zu erhebendes Merkmal der teilnehmenden Lehrkräfte stellt aber die Motivation zur Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen dar. Dabei spielen sowohl intrinsische als auch extrinsische Faktoren eine Rolle, die einen Rückschluss auf den Erfolg der Fortbildung zulassen könnten [63]. Als Symbiose der vorangegangenen Ausführungen zur Wirksamkeit und Gestaltung von Lehrkräftefortbildungen in Deutschland und damit als

Kerngerüst für die Konzeption von wirksamen Fortbildungen, können 10 Merkmale angewandt werden, die in (Tabelle 1) zur Übersicht dargestellt sind.

Es sei erneut erwähnt, dass nach wie vor konkrete Forschungskonzepte, die evidenzbasierte Aussagen und Kausalschlüsse zur Lehrkräftefortbildung im Allgemeinen zulassen, fehlen. Das Gebiet der Lehrerfortbildung im Allgemeinen ist also bislang weitgehend unerforscht [70].

In Bezug auf das Fortbildungsverhalten, die Fortbildungswünsche und Erwartungen von Lehrkräften des Unterrichtsfachs Chemie existieren einige Befunde aus der chemiedidaktischen Forschung. So zeigten Daus et. al. (2004) [71], dass aus Sicht der Teilnehmer schulrelevante Experimente kennenlernen und neue Materialien für den eigenen Unterricht akquirieren zu können, höchste Priorität hat. Auch aktuelle fachliche Bezüge, die sich auch am Interesse der Schülerinnen und Schüler orientieren, sollen aufgezeigt werden. Unmittelbar einsetzbares Lehr-Lern-Material wird gewünscht. Auch neue Unterrichtsmethoden und neue fachliche Erkenntnisse haben einen hohen Stellenwert. Gründe für eine Nichtteilnahme stellen vor allem mangelnde Schulbezüge und eine zu große Entfernung zum Fortbildungsort dar. Letzteres zeigte sich bereits bei Neu und Melle (1998) [72].

Im Allgemeinen erwarten Fortbildungsteilnehmer sowohl Praktika mit neuartigen Experimenten als auch fachdidaktisch-theoretische Vorträge. Der Austausch mit Kollegen, ein Fokus auf Unterrichtskonzepte und die Erläuterung fachlicher Hintergründe wird ebenso als wichtig erachtet [71,72].

Eine aktuellere Untersuchung durch Ropohl et. al. (2016) [73] zeigt zudem auf, dass bei Lehrerinnen und Lehrern ein großer Wunsch nach etablierten, fächerübergreifenden Kontexten wie Umwelt und Energie besteht. Hierbei ist kein signifikanter Unterschied zwischen Berufsanfängern, Erfahrenen und Profis festzustellen. Ein großes Interesse besteht in der Behandlung und Verwertung von Forschungsergebnissen, wobei das Umsetzungsausmaß bei Profis deutlich geringer ist. Auch hier zeigte sich erneut der Wunsch nach einer Kombination aus fachlichen und fachdidaktischen Inhalten in der Strukturierung.

Die zuvor vorgestellten Ergebnisse zur Lehrkräftefortbildung im Fach Chemie wurden im Rahmen einer Sekundäranalyse durch Ansorge-Grein (2009, 2010) [74,75] mit Experteninterviews erweitert, um Qualitätsmerkmale für naturwissenschaftliche, universitäre Lehrerfortbildung aufstellen zu können. Da die zuvor vorgestellten Erkenntnisse und Merkmale sehr allgemein beziehungsweise fächerunspezifisch gehalten sind, sind auch die fachspezifischen Merkmale zu berücksichtigen:

- **Materialien zum Fortbildungsinhalt:** Strukturiertes Begleitmaterial zu Experiment und Theorie; Abstimmung auf Lerngruppe; Anschaulich und tauglich für den Einsatz als Unterrichtsmaterial für einzelne Schularten.
- **Referent:** Besitzt Kenntnis über Schule und Grenzen des Systems; motiviert; gut vorbereitet; Steuert aktiv den Ablauf der Veranstaltung; rhetorisch gut ausgebildet; Interaktion mit Teilnehmenden.
- **Zielgruppenorientierung:** Umsetzbarkeit im Berufsalltag wird beachtet; Schulrelevanz der Inhalte (Kosten, Komplexität, Zeit); motivierende Inhalte, fachlich interessant.
- **Kundenkommunikation:** Gute Erreichbarkeit der Ankündigung, Online-Anmeldung, Definition des Teilnehmerkreises; Verbindlichkeit
- **Gute Atmosphäre:** Begrüßung/Empfang; Angenehme Lern- und Arbeitsatmosphäre der Teilnehmenden und zwischen Referenten und Teilnehmenden; „Austauschatmosphäre“.
- **Gute Planung:** Inhaltlich und organisatorisch gut strukturiert; Experimente sind gut recherchiert und schulalltagserprobt; passender Teilnehmerkreis.
- **Infrastruktur:** Gute Laborräume; gute Zugänglichkeit; genügend Platz.
- **Beitrag der Teilnehmenden:** Freiwilligkeit, Offenheit und Aufgeschlossenheit der Teilnehmenden.
- **Teilnehmerzufriedenheit:** Positive Rückmeldung der Lehrkräfte.
- **Modulcharakter:** Bereitstellung einer Bescheinigung/Zertifikat; Kriterien zum Erreichen.
- **Fortbildungsgestaltung:** Methodische Wechsel, Aktivitäten der Teilnehmenden ermöglichen & „offene Zeiten“ für freie Kommunikation und Austausch; Dauer der Fortbildung; Verzahnung Theorie & Praxisphasen.
- **Zielgruppenorientierung:** Multiplikatoren tragen Inhalte der Fortbildung an weitere Lehrkräfte an.
- **Veranstaltungsübergreifende Aspekte:** Fortbildung entwickelt sich weiter.
- **Rückwirkung auf die Hochschule:** Profit für Studierende.

Betrachtet man die Gemeinsamkeiten der allgemeindidaktischen bzw. schulpädagogischen und den speziell auf den Chemieunterricht ausgerichteten Merkmalen, so zeigt sich erneut, dass Fortbildungen „*close to the job*“ sein und eine direkte Anwendung im Unterricht

ermöglichen sollten. Gleichzeitig existieren Unterschiede: Während die Thesen zur wirksamen Lehrerfortbildung, die aus der schulpädagogischen Forschung stammen, die Wirksamkeit einer Lehrkräftefortbildung anhand der Kompetenzentwicklung der Lehrperson und der Weiterentwicklung des Unterrichts sowie auf das Lernen der Schülerinnen und Schüler wertet, neigen die Befunde aus der Fachdidaktik stark zu strukturellen Faktoren. Letztlich aber bietet die Symbiose der Forschungsbefunde und Hypothesen die Möglichkeit, zukünftige Konzepte zu Fortbildungsveranstaltungen an diesen zu orientieren. Zusätzlich zu diesem Orientierungsrahmen ist auch die ständige Evaluation von Fortbildungen ein entscheidender Punkt auf dem Weg zur Optimierung und Qualitätssicherung der dritten Phase der Lehrkräftebildung in Deutschland. Ausgangspunkt hierfür könnte, wie Krainer und Posch (2010) [76] vorschlagen, eine Bedarfsanalyse bei Lehrkräften sein, die Anregung einer Feedback- und Evaluationskultur auf systemischer Ebene und als entscheidender Faktor: Die Anerkennung der Teilnahme an Fortbildungsveranstaltungen als Teil des beruflichen Ethos.

Diesbezüglich lässt sich feststellen, dass in Bayern alle fortbildungsbeteiligten Einrichtungen verpflichtet sind, ihr Angebot zu evaluieren [77]. Die Fortbildungsangebote der GDCh-Lehrerfortbildungszentren werden grundsätzlich ebenso nach Abschluss der Veranstaltung evaluiert. Inhalte der Evaluation ist dabei häufig die Kompetenzeinschätzung des jeweiligen Dozenten, die Anwendbarkeit in der Schule, der Wissenszuwachs und Erfüllung von Erwartungen an die Veranstaltung [78].

4.3 Konzeption der Lehrkräftefortbildung zu „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“

Die zuvor ausgewählten Ergebnisse zur Lehrerfortbildung im Allgemeinen aber auch im Speziellen im naturwissenschaftlich-chemischen Bereich fanden Einzug in die Konzeption der Fortbildung, die im Rahmen dieses Promotionsprojekts durchgeführt wurde.

Grundsätzlich ist die konzipierte Fortbildung als ganztägige Veranstaltung mit hohem Experimentieranteil vorgesehen. Der konzipierte Regelablauf einer Fortbildungsveranstaltung ist in Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 2: Programm der konzipierten Fortbildungsveranstaltung

| | | |
|---------------|---|-----------------------------|
| 9:00 – 9:30 | Begrüßung, Organisation und Fragebogenerhebung | |
| 9:30 – 10:45 | Impulsvortrag zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht | Input |
| 10:45 – 11:00 | Kaffeepause | |
| 11:00 – 12:30 | Experimentierpraktikum I | Erprobung & Experimentieren |
| 12:30 – 13:30 | Mittagspause | |
| 13:30 – 15:15 | Experimentierpraktikum II | |
| 15:15 – 15:30 | Kaffeepause | |
| 15:30 – 16:00 | Schlussgespräch, Evaluation, Fragebogenerhebung, Aushändigung der Experimentiersets | Reflexion |

Wie der vorangestellten Studienlage zu entnehmen ist, wünschen sich Lehrkräfte eine Kombination aus theoretischem-fachdidaktischem Input und einem Experimentierpraktikum.

Grundsätzlich verfolgt die Fortbildung das Ziel, die in der universitären Fachdidaktik neu entwickelten Experimente in den Schulunterricht zu implementieren und das experimentelle Handlungsrepertoire zu erweitern. Um ausreichend Verständnis für die Versuchsdurchführung und den theoretischen Hintergrund zu schaffen und um die Reflektion mit anderen Fortbildungsteilnehmern und dem Referenten zu ermöglichen, ist eine Verschränkung von Input-, Erprobungs-/Experimentier- und Reflexionsphase [69] anzustreben.

Der vorangestellte Impulsvortrag hat das Ziel sowohl zum Begriff Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung ein fundiertes wissenschaftliches Verständnis zu generieren, als auch für die Experimente den nötigen fachchemischen Hintergrund zu präsentieren. Um den Lehrkräften den direkten Bezug sowohl zum Unterrichtsfach Chemie als auch zum Interesse der Schülerinnen und Schüler darzulegen, standen neben den fachlichen und didaktischen Inhalten auch konkrete Bezüge zu den Lehr- und Bildungsplänen und Evidenzen zu aktuellen, gesellschaftlichen Trends (Fridays for Future, Umwelt-Arbeitsgruppen in Schulen, Nachhaltigkeit im Allgemeinen) im Vordergrund. Die einzelnen Experimente werden fachwissenschaftlich eingeordnet und erläutert, sowie der direkte Bezug zur aktuellen Fachforschung aufgezeigt. Viele der beteiligten Experimente sind in direkter Kooperation mit Arbeitsgruppen der Chemie an der LMU München oder der

chemischen Industrie entstanden und ermöglichen damit den Einbezug aktueller Forschung in den Schulunterricht. Alle Experimente wurden anhand von didaktisch erarbeiteten Abbildungen und Grafiken in einen schultauglichen Kontext gestellt und Möglichkeiten zur curricularen Einordnung in der Praxis aufgezeigt.

Charakteristisch für den anschließenden laborpraktischen Teil der Fortbildung ist die eigenständige und selbstgesteuerte Durchführung der Experimente durch die teilnehmenden Lehrkräfte. Zumeist in Dyaden erproben die Lehrkräfte dabei flexibel die in Form von Stationen aufgebauten Experimente anhand der ausgelegten Anleitungen und des Lehr-Lernmaterial (Grafiken, Alltagsgegenstände) Materials. Die zeitliche Reihenfolge der Durchführung und die Zeitdauer je Experiment war den Teilnehmenden dabei freigestellt und soll so die selbstgesteuerte Erprobung und Erfahrung am Realobjekt ermöglichen.

Im Rahmen der Fortbildung wurden folgende Experimente vorgestellt:

- Mikrowellensynthese des Leuchtstoffes YAG:Ce in einer Haushaltsmikrowelle und Herstellung einer weiß leuchtenden, selbstbeschichteten LED durch Beschichten einer blauen LED mit dem selbst synthetisierten Leuchtstoff [79,80]
- Vom Abwasser zum „Functional Food“: Ein Antioxidans aus der Olive
 - Antioxidative Wirkung in WELL-Plate: Zentrale Eigenschaften von Antioxidantien im Experiment [81]
 - Nachweis der antioxidativen Eigenschaften mit Knicklichtern [82]
 - Luminol-Bubble-Tea: Leuchtende Alginatbällchen zur Wirkungsweise von Antioxidantien [83]
- Spurenstoffe im Abwasser und 4. Reinigungsstufe im Klärwerk: Das Schmerzmittel Diclofenac (Kapitel 5.8)
- Herstellung einer „grünen“ Wunderkerze: Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen [84]
- Lotos-Effekt auf einer Kupferoberfläche: Generierung einer mikro- und nanostrukturierten Kupferoberfläche mit Lotos-Effekt [85]

Um die Durchführbarkeit dieser innovativen Experimente und damit den Transfer der Fortbildungsinhalte in den Chemieunterricht sicherzustellen wurde allen Lehrkräften nach erfolgreicher Teilnahme ein Experimentierset (Abb. 12) kostenfrei zur Verfügung gestellt. Das Experimentierset umfasst sowohl wesentliche Chemikalien für die Durchführung als



Abb. 12: Experimentiersets zur Lehrkräftefortbildung (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

auch andere Hilfsmittel wie eine UV-Taschenlampe oder Knicklichter. Zusätzlich ist ein USB-Stick Teil des Experimentiersets, der Arbeitsmaterialien für den direkten Einsatz im Schulunterricht enthält. Neben Experimentieranleitungen, publizierten, didaktischen Artikeln zu den Experimenten und Fachartikeln für ein vertieftes Verständnis der chemischen Hintergründe sind zu jedem Experiment Arbeitsblätter, Tischvorlagen, Grafiken und Abbildungen enthalten, die in ihrer Form eine direkte Umsetzung im Unterricht ermöglichen sollen. Auch das Material des Impulsvortrages steht den Lehrkräften zur Verfügung. Damit soll der erhobenen Evidenz bezüglich unmittelbar einsetzbaren Lehr- und Lernmaterials entsprochen werden.

Die Sets ermöglichen den Lehrkräften auch die weitergehende Erprobung der Experimente innerhalb ihrer Chemiesammlung und die Tätigkeit als Multiplikator in Fachschaftssitzungen. In Verbindung mit dem bereitgestellten Unterrichtsmaterial ermöglicht dies die tiefere Auseinandersetzung mit den Fortbildungsinhalten auch nach Ende des eigentlichen Fortbildungstermins. Als Bestätigung für die erfolgreiche Teilnahme und als Nachweis vor dem Dienstherrn erhalten die Teilnehmenden ein förmliches Zertifikat.

Die im Rahmen dieses Promotionsprojektes durchgeführten Fortbildungen fanden alle in den Jahren 2020 und 2021 statt, welche durch die Corona-Pandemie geprägt waren. Die jeweils geltenden Hygienevorschriften wirkten sich auch unmittelbar auf die maximale Teilnehmerzahl und die informellen Bestandteile der Fortbildung aus. Grundsätzlich konnten die Veranstaltungen aber in der geschilderten Art und Weise durchgeführt werden.

4.4 Schnittfeld Wirtschaft, Fachdidaktik und Lehrkräftefortbildung: Kooperationspartner WACKER und der Schulversuchskoffer CHEM₂DO

Eine vielversprechende und erfolgreiche Symbiose, die den Transfer von Fortbildungsmaßnahmen in den Schulunterricht für Lehrkräfte einfacher gestalten kann, ist der Schulversuchskoffer der WACKER Chemie in Kooperation mit Chemiedidaktiken der Ludwig-Maximilians-Universität München, der Bergischen Universität Wuppertal, der Eberhard Karls Universität Tübingen und der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster. Das Konzept sieht vor, dass Lehrkräfte im Rahmen einer halbtägigen Fortbildung mit Laborpraktika an Standorten in Deutschland und Österreich geschult werden und nach der Teilnahme Schulversuchskoffer kostenfrei abgegeben werden. Bei Benutzung im Unterricht, können die enthaltenen Chemikalien bei WACKER kostenfrei nachbestellt werden. Die Zusammenstellung aus getesteten Experimentieranleitungen, kostenfrei bereitgestellten Chemikalien und dem Fortbildungsangebot soll eine Implementation in den Schulunterricht vereinfachen und ermöglichen [86].

Die bisherige Version des CHEM₂DO Schulversuchskoffers beinhaltet Experimente zum Thema Silikone und Cyclodextrine, die in vielen deutschen Lehr- und Bildungsplänen aufgenommen wurden.

Ein Ziel des Schulversuchskoffers war es, den „state of the art“ der Chemie zum Fokusthema Silikone als Wissenschaft auf für Lehrer praktikable Art und Weise für den Unterricht zugänglich zu machen, da Schulbücher und andere Lehr- und Lernmittel dies häufig nicht gewährleisten [87]. Die aktuelle Form des WACKER Schulversuchskoffers stammt aus dem Jahre 2012. Die Fortentwicklung des Schulversuchskoffers trägt der Weiterentwicklung auf Seiten der Akteure WACKER und der Chemiedidaktik Rechnung. Dazu gehörte auch die Integration digitaler Medien in die Konzeptionen. Der stete Entwicklungsprozess hat außerdem gezeigt, dass aktuelle Substanzen, die in der Gesellschaft diskutiert werden, Teil des Versuchskoffers werden können. Das Themenfeld Lebensmittelzusatzstoffe und Antioxidantien vereint diese Alltagsrelevanz mit der Möglichkeit aktiv durch chemisches Fachwissen Bewertungskompetenz zu schulen.

Aus diesem Grund fiel die Wahl, neben neuartigen Silikonen der WACKER Produktlinien, auf ein hochwirksames Antioxidans, den Stoff Hydroxytyrosol, der natürlicherweise in der Olive vorkommt. Das von WACKER entwickelte Produkt HTEssence[®] ist naturidentisch und hochrein und findet Anwendung in Nahrungsmitteln und Kosmetika [88].

Die in der konzipierten Fortbildung vorgestellten Experimente Luminol-Bubble-Tea, Nachweis der Eigenschaften in der WELL-Plate und die Erweiterung des Experiments zum

Nachweis der antioxidativen Eigenschaften mittels Knicklicht zum modernen Werkstoff Hydroxytyrosol sollen den Versuchskoffer in Zukunft erweitern.

Neben den genannten Experimentiersets für Lehrkräfte, die an der Fortbildung zu Nachhaltigen Experimenten teilgenommen haben, stellt auch der Schulversuchskoffer eine „Transferhilfe“ für die Lehrkräfte dar, die Experimente auch im eigenen Unterricht durchführen zu können und soll damit zur Wirksamkeit der Fortbildung beitragen.

5. Konzeptionell-experimentelle Umsetzung moderner Fachforschung für den Chemieunterricht

Im Allgemeinen nimmt das Experiment als Basis der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht eine zentrale Rolle ein.

Die vorangegangenen Ausführungen stellten das Modell der Didaktischen Rekonstruktion vor sowie die Relevanz von BnE und Nachhaltigkeit für den Chemieunterricht. Die entwickelten Experimente stellen eine Symbiose aus der didaktischen Rekonstruktion aktueller Fachforschung und modernen Materialien aus der Chemie dar. Die Themen weisen zudem einen Bezug zur Nachhaltigkeit auf und können genutzt werden, um BnE im Chemieunterricht experimentell zu realisieren. Gleichzeitig besteht mit diesen Experimenten die Möglichkeit, moderne Fachforschung in den Schulunterricht zu integrieren.

Bei der chemiedidaktischen Erarbeitung der Experimente ist zu beachten, dass im Vergleich zu Experimenten in der Fachforschung die Ergebnisse von Schulexperimenten grundsätzlich bekannt sind. Dies spielt eine wichtige Rolle für den problemfreien unterrichtspraktischen Einsatz: Experimente für den Schulunterricht müssen reproduzierbar sein. Auf Grundlage dieser Gegebenheit ist der Bezug zu modernen Entwicklungen und auch zu einem realen Abbild des Experimentierens aber häufig Gegenstand von Kritik und fachdidaktischer Forschung. Der Bezug zu modernen Entwicklungen findet nicht statt und Lehrkräfte sind dazu angehalten, sich ständig mit neuen Möglichkeiten des Experimentierens auseinander zu setzen. Denn nur aus der subjektiven Sicht der Lernenden sind Experimente – die im Schulunterricht noch präsentiert werden, aber in der Fachforschung seit Jahrzehnten keine Rolle mehr spielen – noch neues, innovatives Wissen [89].

Neben verschiedenen, althergebrachten Auswahlkriterien für geeignete Schulexperimente [90] spielen in der fachdidaktischen Erschließung neuer Themengebiete für Experimente weitere Determinanten eine wichtige Rolle, die bei der hier vorliegenden Konzeption Beachtung gefunden haben. So werden nur Chemikalien verwendet, die in deutschen Schulen gemäß der Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht [45] zugelassen sind. Einige Experimente, so beispielsweise das in Kapitel 5.1 vorgestellte Experiment zur Synthese eines Leuchtstoffes in der Mikrowelle ist zudem innerhalb des Gefahrstoffinformationssystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung (DEGINTU) überprüft und als Experiment aufgenommen.

Das folgende Kapitel stellt nun die konzipierten Experimente in Form von Publikationen (Kapitel 5.1–5.5) vor. Die im Anschluss befindlichen Kapitel beinhalten entwickelte Experimente, die bislang nicht veröffentlicht wurden.

5.1 Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting

Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, and Stefan Schwarzer

J. Chem. Educ. 2019, 96, 12, 3018-3024 – Published by American Chemical Society and Division of Chemical Education Inc.

DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00464

Author contributions:

The project was conceived by Dominik Diekemper and Stefan Schwarzer. Experimental studies were performed by Dominik Diekemper. The manuscript was jointly written by Dominik Diekemper and Stefan Schwarzer. Wolfgang Schnick provided scientific advice.

Copyright:

Reprinted with permission from *The Journal of Chemical Education*, 2019, 96, 12, 3018-3024. Copyright 2019 American Chemical Society.

Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting

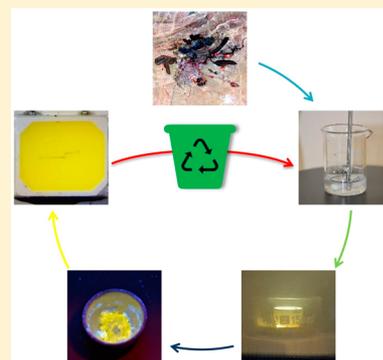
Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick,¹ and Stefan Schwarzer^{*,2}

Department Chemie, Ludwig-Maximilians-Universität München, Butenandtstraße 5-13, 81377 München, Germany

Supporting Information

ABSTRACT: Scarcer raw materials and climate change are scientific facts that make it necessary to enhance energy efficiency and to recycle raw material. Fundamental researchers at universities as well as in industry agree that light-emitting diodes (LEDs) are the most efficient and sustainable light sources of the future. Chemistry plays a significant role in the development of white, energy-efficient LEDs; however, students and society do not seem aware of this role. This paper presents a school-student-friendly synthesis of cerium-doped yttrium aluminum garnet (YAG:Ce) in a laboratory microwave oven. YAG:Ce is the most widely applied luminescent material (“phosphor”) used in white LEDs. The initial blue light of a gallium nitride-based primary LED is partly down-converted by the YAG:Ce phosphor on top of the LED chip, resulting in yellow-green emission. Additive color mixing (blue + yellow-green) results in cold-white light generation. This experiment aims to demonstrate chemistry's contribution to sustainable development in a comprehensible way. On the basis of such phosphor-converted LEDs, the interdependence of and cooperation between different scientific disciplines are outlined. The critical question of the related raw materials, in this case especially rare earth elements (REEs), their lifetime, and their possible recycling, represents another important issue for sustainable development and systems thinking and is shown in this example from everyday life.

KEYWORDS: High School/Introductory Chemistry, Curriculum, Materials Science, Green Chemistry, Systems Thinking, Sustainability



INTRODUCTION

Energy efficiency and a sustainable use of resources have become increasingly important in society and politics in order to ensure environmental sustainability (UN Millennium Development Goal 7). Accordingly, climate change and the resulting global warming have noticeable impacts on the quality of life.¹ Especially, everyday products such as light sources have been affected due to the gradual phase-out of incandescent and halogen light bulbs in the European Union since 2009. These light sources were replaced by light-emitting diode (LED) technology because of its higher power efficiency and longer life cycles.² Most school students are unaware of the impact that inorganic chemistry research has on white and warm-white LED technology. Inorganic chemistry not only develops new luminescent color-converting materials (phosphors); it also works in multidisciplinary cooperation with physics and technology in the development of sustainable new materials for white-emitting LEDs.³

One of these important new materials is cerium-doped yttrium aluminum garnet (YAG:Ce), the most widely used phosphor in white LEDs.⁴ On the basis of the synthesis of this substance for school students, topics such as green chemistry and state-of-the-art research on energy efficiency can be addressed in the context of global warming, the Anthropocene, and reducing the human impact on earth's ecosystem. The student experiment on the microwave oven synthesis of an

LED's phosphor described below may contribute to a change in chemistry's image problem by demonstrating chemistry's role in finding solutions for recent challenges in society and showing the interdependence between the sciences.

LED TECHNOLOGY AND RARE EARTH ELEMENTS

The development of blue gallium nitride-based LEDs by Akasaki, Amano, and Nakamura revolutionized the world's lighting market and was honored by being awarded the Nobel Prize in Physics in 2014.⁵ Commercial realization of white LEDs for domestic purposes began by employing blue-emitting LED chips on the basis of the semiconductor gallium nitride (GaN). Starting from the initial blue of the GaN-LED chip, all other colors of the visible spectrum can be obtained by down-conversion (luminescence) by placing color-converting materials on top of this chip (Supporting Information 1 “General Setup of an LED”), mostly embedded in silicone. By producing a mixture of this blue and yellow light, the result is cold-white light delivered by LED technology.^{4,6}

Special Issue: Reimagining Chemistry Education: Systems Thinking, and Green and Sustainable Chemistry

Received: May 16, 2019

Revised: October 5, 2019

Published: October 18, 2019

LED lighting has developed rapidly in the past several years, and today most households use LED lighting, not least because of the market ban on light bulbs. This success story is particularly due to the many advantages of LEDs: In addition to the longer life cycles of LED illuminants, LEDs combine high energy efficiency with increasing lighting quality, and compared to fluorescent bulbs, they are mercury-free. Consequently, they have reached a very high level of user acceptance worldwide.⁷

The parameters that are important for the assessment of illuminants and their classification into “cold-white” and “warm-white” are the color rendering index (CRI) and the color temperature (CCT). The CRI value indicates the color rendering of artificial light sources in comparison to sunlight with a maximum of 100. The correlated color temperature (CCT) indicates the color impression of a light source (warm white <3300 K, neutral white 3300–5300 K, cold white >5300 K).

YAG:Ce is one of the first prominent phosphors to deliver white light with a CCT of 4000–8000 K and a CRI below 80. However, for indoor lighting, a CRI of over 80 and significantly warmer color temperatures are recommended and desired by consumers. The reason for this is the lack of red spectral components in the combination of a blue LED and yellow phosphor YAG:Ce³⁺. Today, the two-phosphor approach is used to produce cozy warm-white light by combining a yellow and a red phosphor and using the REE europium as an activator ion.⁸

Despite the many benefits, the fact that every phosphor-converted light-emitting diode (pc-LED) needs raw materials is often ignored. In this context of phosphors, especially rare earth elements such as yttrium, cerium, europium, and lutetium are used. This should be noted due to their ecological, social, and political impact. Making up 3.5% of total use, phosphors are one of the main applications of rare earth elements.⁹

From a geological perspective, it would be incorrect to claim rare earth elements as rare; indeed, they are raw materials with the potential for political conflicts. Due to a variety of applications in modern electronics, their consumption has risen sharply in recent years.¹⁰ Although China has only 36% of the global natural resources, it is responsible for around 95% of global production. The reasons for this imbalance lie in price dumping because of illegal mining, which is associated with serious environmental problems.^{11,12} The environmental consequences of this monopoly are contaminated water and soil as well as increased cancer rates in regions like the Bayan Obo mine in Inner Mongolia, China.¹³

The presence of rare earth elements in phosphors and semiconductors in LED technology leads to several challenges, for example, developing a sustainable disposal process,¹³ so that recycling systems have to be created at national levels. Environmental damage and the ecological and social impacts on local villagers should be part of a holistic view taken on the topic of sustainable lighting with LEDs, especially when LED lighting is expected to be the technology with the brightest future perspectives and to have the potential to grow even further.¹⁴ All of these aspects are part of the [Experimental Procedure](#) section in this paper. Because of the links between different systems and sciences, and the advantages and benefits of LED lighting, this experiment addresses systems thinking and makes it possible to integrate systems thinking into school

chemistry and out-of-school learning opportunities such as science laboratories for school students.

EXPERIMENTAL PROCEDURE

This section outlines the setup of a learning station on the investigation of illuminants and the synthesis of YAG:Ce, which is the most widely applied luminescent material (“phosphor”) used in white LEDs. The described station was developed for high-school students aged between 15 and 19. The whole experimental portion lasts about 65 min (Figure 1), while the synthesis of the luminescent material only takes about 15 min and can be performed as an outreach activity or in a chemistry class at school.

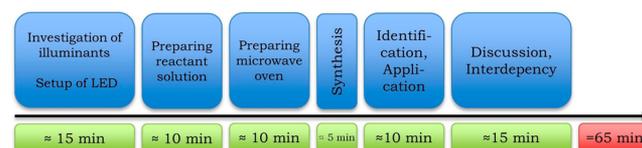


Figure 1. Time track for the experimental learning station.

Throughout the whole learning station, groups of 3–4 school students are supervised by university teacher students. The school students participate in all of the experimental activities in our science lab for school students for one whole day (Figure 2), while the teachers remain in the background.

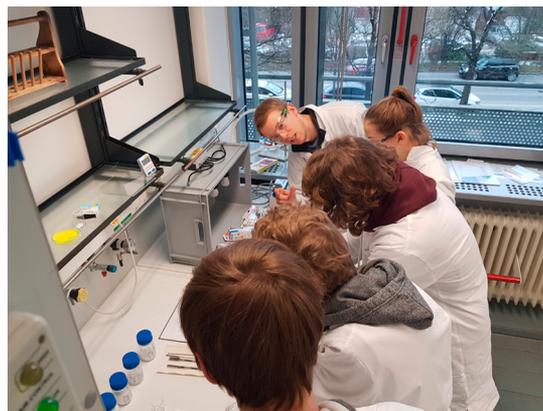


Figure 2. LED learning station in our science lab.

This science lab activity, which benefits from the authentic surrounding of the university setting, can be understood as an extracurricular offer for schools. A lot of effort was made during the experiment development process to meet the requirements for use in schools. This included safety aspects, the use of easily available chemicals, and considerations regarding the necessary materials and amount of time to be spent on the experiment. In addition, the setup of the learning station is disseminated in teacher training workshops, and the experiment is already carried out at schools.

Investigation of Illuminants and General Setup of LEDs

The introductory work starts by using an infrared camera (or, e.g., FLIR ONE for a smartphone as a cheaper alternative). Students are asked to justify the phasing out of light bulbs in the European Union by discussing power, temperature, color rendition (personal impression), and energy efficiency class. Power in watts is determined with a conventional electricity

monitor for plug sockets (available for about \$20 USD) and temperature with an infrared camera. The energy efficiency class can be easily read on the packaging of the lamps. Several different illuminants (Figure 3) with a performance rating

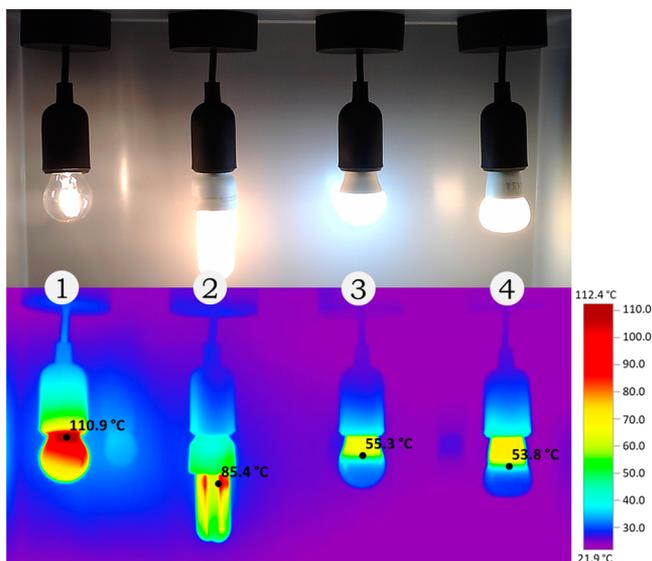


Figure 3. Evaluation of power, physical temperature, personal impression of color, and energy efficiency class of illuminants: light bulb (1), fluorescent lamp (2), cold-white LED (3), warm-white LED (4).

equal to that of a light bulb (1), a fluorescent lamp (2), a cold-white LED (3), and a warm-white LED (4) are used. The results are presented as part of an open discussion about illuminants in general, and problems are solved by newer generations of them. The target is to show the low degree of efficiency of light bulbs. Subsequently, the general setup of an LED (Supporting Information 1 “General Setup of an LED”) is shown to convey the importance of luminophores for pc-LEDs.

Materials

Aluminum nitrate nonahydrate, cerium(III) nitrate hexahydrate, and urea were purchased from Sigma-Aldrich and yttrium(III) nitrate hexahydrate from abcr. For the synthesis, a laboratory microwave oven was used, e.g., an HLL MW 4000 laboratory microwave, which is available for about \$2000 USD. For a successful reaction, a power output of 500 W is enough. Safety issues must always be considered when carrying out chemistry experiments, which motivates the use of a microwave designed for laboratory use. Common glassware such as a 25 mL beaker, a crystallizing dish, and a porcelain crucible are necessary as well as a magnetic hot plate stirrer, crucible tongs, a spatula, pipettes, a thermometer, gas concrete block (or similar), and thermographic paper (e.g., for a fax machine).

Preparing Reactant Solution

For the synthesis of the YAG:Ce phosphor in a 25 mL beaker, 0.81 g of $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, 3.46 g of $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$, and 0.02 g of $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ as doping reagent are dissolved in 1 mL of water. While the reaction mixture is mixed with a magnetic stirrer, 2.20 g of urea is added to the solution.¹⁵ The solution must agitate at 60 °C until it clarifies. This process takes about 10 min. The atomic ratio of Y:Al is set to a value of 1:4.4, thus a nonstoichiometric amount, because of the significantly better yield in a microwave oven.

Preparing the Microwave Oven

For the microwave synthesis of YAG:Ce, high temperatures are necessary. For this reason, the microwave oven is prepared during the stirring process. In order to find the hot spots in the inhomogeneous microwave field, the rotary plate is removed. To identify the hot areas inside the cooking chamber, thermal paper, a plate (e.g., polystyrene) in the right size of the cooking chamber, and paper towels are used.¹⁶

Wet paper towels are placed on the plate, and the thermal paper is placed on top of it. This arrangement is heated for about 5 s until noticeable black spots occur (Figure 4). Thus,



Figure 4. Identification of hot spots by thermal paper (changes color from white to black when exposed to heat) in a microwave oven and placement of the reaction mixture.

very hot areas in the microwave are identified. A sand-filled crystallizing dish on gas concrete is placed on one hot spot, and the porcelain crucible with the reactant solution is put in the dish.

Synthesis

For the combustion process, 0.75 mL of the previously prepared solution is pipetted into a porcelain crucible and placed in the center of the sand-filled crystallizing dish with a crucible tongs. The fume cupboard is closed, and the microwave oven can then be switched on. After all the water has boiled off and large amounts of gases (N_2 , CO_2 , H_2O) have developed, the combustion reaction of nitrates and urea starts. During synthesis, high temperatures are reached, and the vaporization of all solutions under green-yellow light emission occurs (Figure 5). When the reaction is finished, the microwave oven is turned off. In the case of the use of a conventional microwave-oven, one should be able to turn the microwave off by a main switch outside the fume cupboard.



Figure 5. Combustion process in microwave oven.

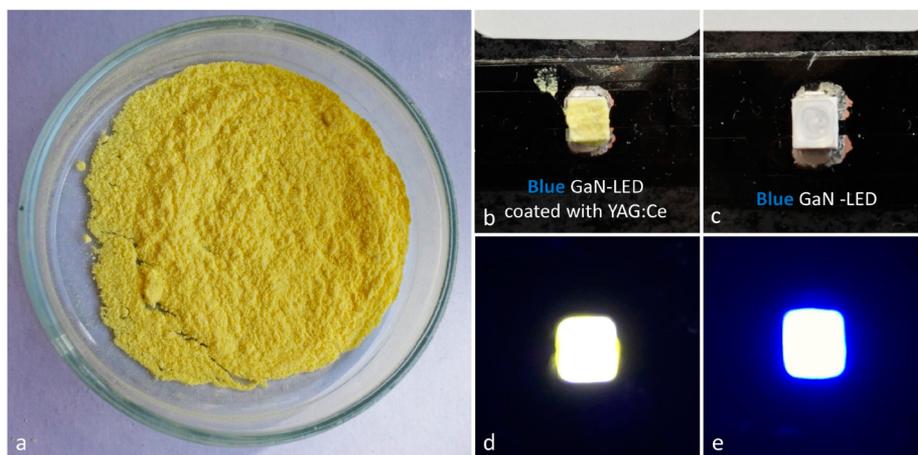
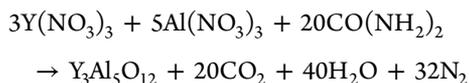


Figure 6. Powdered YAG:Ce synthesized by microwave, blue GaN-based LED coated and uncoated, off (b, c) and on (d, e). Clearly visible difference in color (yellow-white and blue).

Results and Application of Blue LEDs

The result of this controlled combustion process at 500 W is YAG:Ce, which is verified by powder X-ray diffraction (XRD) and UV–vis spectroscopy (Supporting Information 4 and 5, “UV/Vis Spectrometry & X-ray Powder Diffraction of Microwave Produced YAG:Ce”). For students, YAG:Ce can be identified by yellow luminescence under UV excitation (e.g., with a UV torch) (Supporting Information 2 “YAG:Ce under UV Excitation”). The equation of this combustion is¹⁵



Because of strong absorption in the blue spectral range, which gives the characteristic yellow color, luminescence can also be detected with a conventional blue LED torch. The application with glue of the powdered product (Figure 6a,b) to a blue ($\lambda = 420\text{--}480\text{ nm}$) CoB-LED (e.g., conventional LED strip and 6 V battery, Figure 6c) shows the function of light-converting materials (Figure 6d,e) to school students in an impressive way. Some additional information, potential limitations and hints for how to carry out the experiment are listed in the Supporting Information 3 “Advices on Preparing the Experiment and Potential Limitations”.

HAZARDS

For security reasons, safety goggles should be worn all the time during the experimental procedure. While handling REE-nitrates, protective gloves should be worn. Because of the development of large amounts of gases such as N_2 , CO_2 , and H_2O , the laboratory microwave oven must be placed in a fume cupboard during synthesis, even though the gases are exhausted separately. In addition, it is advisable to control the microwave by a main switch in order to enable an emergency shutdown. The microwave oven used for this experiment cannot be used for further food preparation. Because of the high temperature of the porcelain crucible, high-temperature protective gloves and crucible tongs should be used. Leftover product remained in the crucible, is dissolved in water, and should be transferred into a container designated for metal salts. UV light excitation is harmful to the retina, so anti-UV coated goggles should be worn for safety reasons.

LUMINOPHORES FOR INTEGRATING SYSTEMS THINKING INTO MODERN SCHOOL CHEMISTRY?

Chemistry as a natural science and school subject is often connoted with many unfavorable attributions. This narrow view can lead to a loss in popularity and less interest among learners because chemistry teachers may fail to communicate the creative character and the real-life orientation of this school subject.¹⁷ Furthermore, little attention has been given to teaching school students in chemistry courses that chemistry content is connected to several challenges for modern society such as the omnipresent sustainability challenge and the challenge of saving energy in connection with climate change and social topics.¹⁸

Especially since the Programme for International Student Assessment (PISA) surveys, more attention has been paid to helping students to acquire knowledge about the characteristics of science and the significance of science in a modern world as well as in daily life. All this has been summarized as scientific literacy. This broad term with its several definitions comprising societal and interdisciplinary aspects leads to the concept of systems thinking and the fact that chemistry, technology, science, and society are interrelated and are not fragmented areas.¹⁹

Because of its relevance for everyday life, the several different systems involved, and its connection to sustainable development, this experiment allows systems thinking to be integrated into school chemistry and science laboratories for school students.

Furthermore, this experiment demonstrates a systems thinking approach not only by focusing on various aspects of chemical expertise, involving doping, different phosphors, the function of light-converting materials, a redox reaction, and microwave synthesis. Systems thinking is also demonstrated by the fact that the whole context needs to be investigated, including environmental, social, and economic factors, and recycling problems with REEs.²⁰ Therefore, a spatial (local and global systems) and temporal view needs to be taken.

When aiming to introduce systems thinking, an important requirement for a successful learning experience is school students' interest and the relevance of the topic to their everyday life. Luminophores could be a good opportunity to show the relevance of chemistry to everyday life, as already shown in educational activities related to phosphors and

lighting.^{21–23} An example would be to have students analyze a smartphone because every current device has an LED flash for photography, which often contains YAG:Ce. This can be easily demonstrated under UV excitation by observing the fluorescence of this material. Most students are unaware of the fact that phosphors are necessary for white LED light generation and that they carry phosphors in their pockets every day. While explaining the general setup of pc-LEDs, the students identify the phosphor $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ as light-converting material and make a hypothesis about how phosphors work. In most cases, the students immediately recognize the presence of rare earth elements (REEs), here yttrium and cerium (Figure 7a). Because of media attention or earlier topics in geography

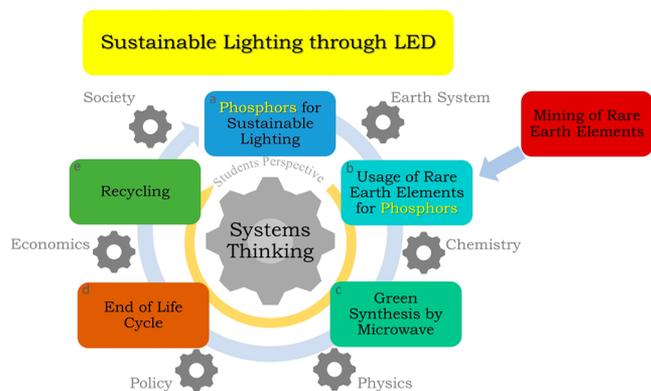


Figure 7. Interconnectedness of sciences, students' perspectives, and related systems in sustainable lighting (steps a–e).

or economics lessons, students may have previous knowledge on this topic to which links can be made; for example, they have already heard about problems in the mining of REEs (Figure 7), about China's role as a world market leader, and about the importance of REEs in modern technology (Figure 7b).

For the synthesis, the usage of a microwave oven has a clear connection to the everyday life of school students. The benefits for a school experiment^{24,25} arise in particular from the reduced reaction times and the lower energy demand, which is why microwave synthesis (Figure 7c) is frequently linked to green and sustainable chemistry in the literature.^{26–28} On the basis of the easily visible combustion process, the ongoing redox reaction must be discussed in a chemical manner (Supporting Information 6 “Student Worksheet Systems in Sustainable Lighting through LED”) and should involve typical chemical concepts and knowledge. The urea used functions as a reducing agent and is part of many car combustion engines, for example, diesel exhaust fluid (DEF, known as AdBlue in Germany).

After the synthesis, the direct application of YAG:Ce to the blue LED shows its importance in an impressive way and, on the basis of the phenomenological observation, makes it possible to explain the functioning of a phosphor and the need for the activator Ce^{3+} in the context of garnet doping.

Right at the start of the learning station, the longer lifetime of the LED is discussed (Figure 7d). Nevertheless, the question of disposal is raised, and the students note that there are no suitable recycling processes and, thus, that REEs are lost. Furthermore, the question of functioning recycling systems and the need for separate disposal, like for batteries (Figure 7e), is raised. In order to broaden students' critical

thinking on the subject of sustainable lighting, the pros and cons of illumination by LEDs are discussed. To this end, various newspaper articles are presented to the students, which address problems such as the rebound effect,²⁹ light pollution, recycling, REEs in LEDs and modern electronics in general, as well as the question of whether LED light is harmful to the eyes. An open discussion follows and shows the great interest of students in this topic and the significant contribution that it makes to students' critical reflection on sustainable topics. It is precisely this critical and holistic approach that is necessary to realize the goals of sustainable development, as set out in Rio de Janeiro in 1992. Sustainability always has the three dimensions: environmental, economic, and social. In order to realize sustainability, a critical consideration of all parts and interactions is necessary in the decision-making processes; that is, the capacity for systems thinking is necessary.³⁰

In summary, this experiment makes it possible to integrate systems thinking into school practice. A chemist's ability to design new sustainable materials is highlighted, and the potential negative aspects of chemistry in LED lighting (in this case, phosphors) are shown to the students. This holistic point of view, with the aim of maximizing the positive impacts, makes it possible to introduce systems thinking to the students. In addition, due to the interaction among different systems, it shows the role that chemistry plays in addressing challenges today and in the future.^{31,32} It also shows the interdependency of science and several other systems. Furthermore, it allows the students to identify the presence of numerous interactions, both retrospectively and predictively, among components of the different systems, and to work out hidden dimensions to obtain a view of the whole.³³ These are the learning goals:

1. Students outline the general setup of phosphor-converted LEDs.
2. Students explain the interaction between and interdependency among different disciplines and systems with the development of white LEDs.
3. Students discuss the use of rare earth elements (especially cerium and europium) in phosphors as part of sustainable development, as well as the pros and cons of LED lighting.
4. Students practice critical thinking, which is fostered with reflective questioning concerning LED techniques and rare earth mining/recycling.

The technical basis, semiconductor electronics, was researched by physicists; the phosphor for white light and its wide applicability was worked out by inorganic chemists. Moreover, this interplay was embedded in a political and social context. While policy accomplished the phasing out of the conventional light bulb within the European Union, the economy had to produce, and society had to be ready to buy, the products. This cross-system collaboration provided a forward-looking product for sustainable development. This included the work of chemical research, which is most often not tangible for the wider public, but which contributes toward sustainable development.

DISCUSSION

In this experiment, the application of systems thinking is particularly evident in the change in students' perspective on the topic of sustainable lighting, LEDs, and luminophores. This change in the students' perspective is highlighted in Figure 7.

The aim of this experiment is to teach the students to take a critical and holistic perspective with a view to a changed, more comprehensive, and more critical assessment of the advantages and disadvantages, and the opportunities and possible risks of LED technology.

These new critical thinking skills can be recognized in the reflected, holistic questions posed by the students in the discussion after the experiment and in the variety of the students' comments and suggestions.

Exemplary statements of school students aged 15–19 follow:

"Are there any methods at all for recovering raw materials from LED technique?"

"Maybe recycling costs a lot of energy or other raw materials?"

"Could it be profitable?"

"Should it be organized by the state?"

"What about collecting boxes for old bulbs?"

"Society should be told that important raw materials are being used included!"

All of these comments, objections, and suggestions show a changed view on the limitations of raw materials and their presence in every LED. Combined with expertise in chemistry, problem-solving skills can be developed. The generated multidimensional perspective leads to questions and answers that also underline the multidimensionality of sustainability.

Finally, the impressive solid-state synthesis in the microwave has a motivating and interesting effect on the students.

CONCLUSION AND OUTLOOK

This experiment illustrates the remarkable scientific achievement that has made modern and environmentally friendly lighting possible. Moreover, it also stimulates critical questioning about raw materials, their production, their life cycle, and potential recycling processes.

Furthermore, this experiment provides the opportunity to tell students that, in the context of climate change and sustainability, cause and effect are frequently separated geographically (so-called spatial lag). While, on one hand, sustainable and energy-saving lighting is being provided in one part of the world, on the other hand, the raw materials that damage the environment are being produced somewhere else. This debate should be the starting point for the development of effective recycling cycles, for example, in the case of REEs and LED illuminants. Also, inorganic chemistry should continue its research on phosphors. Because of limited spectral power distribution in the red range, new phosphors for warm-white LEDs with increased efficacy are current research topics.³⁴

ASSOCIATED CONTENT

Supporting Information

The Supporting Information is available on the ACS Publications website at DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00464.

Scheme of general setup of LEDs, microwave synthesized YAG:Ce under UV excitation, SEM pictures of industrial and microwave synthesized YAG:Ce, UV-vis spectrum, X-ray powder diffractogram, and student worksheet (PDF, DOCX)

AUTHOR INFORMATION

Corresponding Author

*E-mail: stefan.schwarzer@lmu.de.

ORCID

Wolfgang Schnick: 0000-0003-4571-8035

Stefan Schwarzer: 0000-0002-4134-5684

Notes

The authors declare no competing financial interest.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank all the participating students who carried out the experiment during the developmental process for their precious feedback.

REFERENCES

- (1) Matlin, S. A.; Abegaz, B. M. Chemistry for Development. In *The Chemical Element*; Garcia-Martinez, J., Serrano-Torregrosa, E., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2011; pp 1–70.
- (2) Frondel, M.; Lohmann, S. The European Commission's light bulb decree: Another costly regulation? *Energy Policy* **2011**, *39*, 3177–3181.
- (3) Centi, G.; Perathoner, S. Facing the Energy Challenge through Chemistry in a Changing World. In *The Chemical Element*; Garcia-Martinez, J., Serrano-Torregrosa, E., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2011; pp 269–309.
- (4) Xia, Z.; Meijerink, A. Ce³⁺-Doped garnet phosphors: composition modification, luminescence properties and applications. *Chem. Soc. Rev.* **2017**, *46*, 275–299.
- (5) Von Dollen, P.; Pimputkar, S.; Speck, J. S. Let there be light-with gallium nitride: the 2014 Nobel Prize in Physics. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2014**, *53*, 13978–13980.
- (6) Mueller-Mach, R.; Mueller, G.; Krames, M. R.; Hoppe, H. A.; Stadler, F.; Schnick, W.; Juestel, T.; Schmidt, P. Highly efficient all-nitride phosphor-converted white light emitting diode. *Phys. Status Solidi A* **2005**, *202*, 1727–1732.
- (7) *LED Lighting: Technology and Perception*; Winkler, H., Bodrogi, P., Trinh, Q., Khanh, T. Q., Eds.; Wiley-VCH: Weinheim, 2015.
- (8) Krames, M. R.; Shchekin, O. B.; Mueller-Mach, R.; Mueller, G. O.; Zhou, L.; Harbers, G.; Craford, M. G. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. *J. Disp. Technol.* **2007**, *3*, 160–175.
- (9) *Handbook of Rare Earth Elements. Analytics*; Golloch, A., Ed.; De Gruyter: Berlin, 2017.
- (10) Goonan, T. G. *Rare Earth Elements: End Use and Recyclability*; US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, 2011.
- (11) Long, K. R.; van Gosen, B. S.; Foley, N. K.; Cordier, D. The Principal Rare Earth Elements Deposits of the United States: A Summary of Domestic Deposits and a Global Perspective. In *Non-Renewable Resource Issues*; Sinding-Larsen, R., Wellmer, F.-W., Eds.; Springer Netherlands: Dordrecht, 2012; pp 131–155.
- (12) Jacoby, M.; Jiang, J. Securing The Supply Of Rare Earths. *Chem. Eng. News* **2010**, *88*, 9–12.
- (13) Lohmann, D. Kampf um Seltene Erden—Hightech-Rohstoffe als Mangelware [Fight for Rare Earths—High-Tech Raw Materials as a Lackware]. In *Im Fokus: Bodenschätze*; Lohmann, D., Podbregar, N., Eds.; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, 2012; pp 7–15.
- (14) Baumgartner, T.; Wunderlich, F.; Jaunich, A.; Sato, T.; Bundy, G.; Griebmann, N.; Kowalski, J.; Burghardt, S.; Hanebrink, J. *Lighting the Way: Perspectives on the Global Lighting Market*. https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/lighting_the_way_perspectives_on_global_lighting_market_2012.aspx (accessed October 4, 2019).
- (15) Fu, Y.-P. Preparation of Y₃Al₅O₁₂:Ce powders by microwave-induced combustion process and their luminescent properties. *J. Alloys Compd.* **2006**, *414*, 181–185.

(16) Lühken, A.; Bader, H. J. *Energy Input from Microwaves and Ultrasound—Examples of New Approaches to Green Chemistry*. <http://www.scheikundeinbedrijf.nl/content/Modules/Modulenaam/Files/microwaves.pdf> (accessed October 4, 2019).

(17) Matlin, S. A.; Mehta, G.; Hopf, H.; Krief, A. One-world chemistry and systems thinking. *Nat. Chem.* **2016**, *8*, 393–398.

(18) Mahaffy, P. G.; Martin, B. E.; Kirchoff, M.; McKenzie, L.; Holme, T.; Versprille, A.; Towns, M. Infusing Sustainability Science Literacy through Chemistry Education: Climate Science as a Rich Context for Learning Chemistry. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2014**, *2*, 2488–2494.

(19) Hrin, T. N.; Milenković, D. D.; Segedinac, M. D.; Horvat, S. Systems thinking in chemistry classroom: The influence of systemic synthesis questions on its development and assessment. *Think. Skills and Creativity* **2017**, *23*, 175–187.

(20) Jegstad, K. M.; Sinnes, A. T. Chemistry Teaching for the Future: A model for secondary chemistry education for sustainable development. *International Journal of Science Education* **2015**, *37*, 655–683.

(21) Zitoun, D.; Bernaud, L.; Manteghetti, A.; Filhol, J.-S. Microwave Synthesis of a Long-Lasting Phosphor. *J. Chem. Educ.* **2009**, *86*, 72.

(22) Stanish, P. C.; Siu, H.; Radovanovic, P. V. Inorganic Phosphors for Teaching a Holistic Approach to Functional Materials Investigation: From Synthesis and Characterization to Applications of Thermo- and Mechanoluminescence. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96*, 1008–1014.

(23) Ma, Y.-Z.; Jia, L.; Ma, K.-G.; Wang, H.-H.; Jing, X.-P. Preparing, Characterizing, and Investigating Luminescent Properties of a Series of Long-Lasting Phosphors in a SrO-Al₂O₃ System: An Integrated and Inquiry-Based Experiment in Solid State Chemistry for the Undergraduate Laboratory. *J. Chem. Educ.* **2017**, *94*, 1157–1162.

(24) Nguyen, V. d.; Birdwhistell, K. R. Microwave Mapping Demonstration Using the Thermochromic Cobalt Chloride Equilibrium. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91*, 880–882.

(25) Montes, I.; Sanabria, D.; Garcia, M.; Castro, J.; Fajardo, J. A Greener Approach to Aspirin Synthesis Using Microwave Irradiation. *J. Chem. Educ.* **2006**, *83*, 628.

(26) Crouse, B. J.; Vernon, E. L.; Hubbard, B. A.; Kim, S.; Box, M. C.; Gallardo-Williams, M. T. Microwave Extraction of Eugenol from Cloves: A Greener Undergraduate Experiment for the Organic Chemistry Lab. *WJCE* **2019**, *7*, 21–25.

(27) Al Neyadi, S. S.; Alzamly, A.; Al-Hemyari, A.; Tahir, I. M.; Al-Meqbali, S.; Ali Ahmad, M. A.; Bufaroosha, M. An Undergraduate Experiment Using Microwave-Assisted Synthesis of Metalloporphyrins: Characterization and Spectroscopic Investigations. *WJCE* **2019**, *7*, 26–32.

(28) Cresswell, S. L.; Haswell, S. J. Microwave Ovens-Out of the Kitchen. *J. Chem. Educ.* **2001**, *78*, 900.

(29) Schleich, J.; Mills, B.; Dütschke, E. A brighter future? Quantifying the rebound effect in energy efficient lighting. *Energy Policy* **2014**, *72*, 35–42.

(30) Riess, W.; Mischo, C. Promoting Systems Thinking through Biology Lessons. *Int. J. Sci. Educ.* **2010**, *32*, 705–725.

(31) Holme, T. A.; Hutchison, J. E. A Central Learning Outcome for the Central Science. *J. Chem. Educ.* **2018**, *95*, 499–501.

(32) *Green Chemistry Education. Recent Developments*; Benvenuto, M. A., Kolopajlo, L., Eds.; Green Chemical Processing; De Gruyter: Berlin, 2019; Vol. 4.

(33) Assaraf, O. B.-Z.; Orion, N. Development of system thinking skills in the context of earth system education. *J. Res. Sci. Teach.* **2005**, *42*, 518–560.

(34) Pust, P.; Weiler, V.; Hecht, C.; Tücks, A.; Wochnik, A. S.; Henß, A.-K.; Wiechert, D.; Scheu, C.; Schmidt, P. J.; Schnick, W. Narrow-band red-emitting SrLiAl₃N₄:Eu²⁺ as a next-generation LED-phosphor material. *Nat. Mater.* **2014**, *13*, 891–896.

5.2 Aus blau wird weiß – Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Beleuchtung am Beispiel eines LED-Leuchtstoffs

Blue turns white – Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting Using the Example of a LED-Phosphor

Dominik Diekemper, Wolfgang Schnick, and Stefan Schwarzer

Diekemper, D., Schnick, W. and Schwarzer, S. (2021), Aus blau wird weiß – Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Beleuchtung am Beispiel eines LED-Leuchtstoffs. CHEMKON. DOI: 10.1002/ckon.202000033

Author contributions:

The project was conceived by Dominik Diekemper and Stefan Schwarzer. Experimental studies were performed by Dominik Diekemper. The manuscript was jointly written by Dominik Diekemper and Stefan Schwarzer. Wolfgang Schnick provided scientific advice.

Copyright:

Reprinted with permission from *CHEMKON*, 2021. Copyright 2021 John Wiley and Sons.



DOI: 10.1002/ckon.202000033

Aus blau wird weiß – Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Beleuchtung am Beispiel eines LED-Leuchtstoffs

Dominik Diekemper,* Wolfgang Schnick* und Stefan Schwarzer*^[a]

Zusammenfassung: Die Chemie leistet einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen, energiesparenden Beleuchtung durch die Entwicklung energieeffizienter und anwenderfreundlicher Leuchtstoffe in LEDs (Light Emitting Diodes). So wären ohne die Entwicklung moderner Leuchtstoffe weißes und warmweißes Licht durch LED-Leuchtmittel in unserem Alltag nicht möglich. Im Rahmen des hier vorgestellten Experiments wird der wichtige LED-Leuchtstoff Yttrium-Aluminium-Granat dotiert mit Cer ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, YAG: Ce^{3+}) hergestellt. Die schülergerechte und schule geeignete Synthese erfolgt in unter einer Minute in einer Haushaltsmikrowelle. Anschließend können die farbkonvertierenden Eigenschaften durch Auftragen des selbst hergestellten Leuchtstoffes auf eine blaue LED direkt nachvollzogen werden.

Stichworte: Leuchtstoffe · Mikrowellensynthese · Nachhaltigkeit

Blue turns white – Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting Using the Example of a LED-Phosphor

Abstract: Chemistry significantly contributes to sustainable, energy-saving lighting through the development of more efficient phosphors. Without the development of modern and energy-efficient phosphors, white and warm white light from LED lamps would not be possible in our everyday life. As part of the experiment presented here, the important LED fluorescent yttrium aluminum garnet doped with cerium ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, YAG: Ce^{3+}) is produced in a household microwave in a way that is suitable for school students. The experiment impressively demonstrates the color-converting properties through the application of the self made phosphor to a blue LED.

Keywords: Phosphors · Microwave Synthesis · Sustainability

1. "What's with the lightbulb?"

Spätestens seit dem stufenweisen Produktions- und Vertriebsverbot der herkömmlichen Glühlampe in der Europäischen Union im Jahr 2009 [1] haben viele Haushalte auf LED-Beleuchtung umgestellt. Im Laufe der Zeit erreichte die *light emitting diode* (LED) so nicht nur gesellschaftlich eine hohe Akzeptanz, sondern stellt auch aus wirtschaftlicher Sicht einen Markt mit weiterem Wachstumspotential dar [2,3]. Die in der Absatzüberschrift formulierte Frage des US-amerikanischen Präsidenten Donald Trump, verbunden mit dem Vorwurf, dass die schlechte Lichtqualität warmweißer, energieeffizienter LED-Lampen ihn orange erscheinen lassen („*energy efficient light bulbs make me look orange*“) [4], stehen aber nicht in Einklang mit dem großen Erfolg und der Akzeptanz der neuen Leuchtmittel.

Der Grundstein für diese erfolgreiche Entwicklung wurde durch die Erfindung der blauen Galliumnitrid-Leuchtdioden (GaN-Dioden) durch Akasaki, Amano und Nakamura gelegt, für die sie 2014 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurden [5].

In der Verwendung von heutigen, handelsüblichen LEDs in Leuchtmitteln, als Blitzlampen in Smartphones, LED-basierenden TV-Geräten und vielen anderen alltäglichen Gegenständen,

wird der Beitrag der Chemie dabei oft übersehen: Durch die gezielte Entwicklung von farbkonvertierenden, möglichst energieeffizienten Leuchtstoffen ist die Verwendung eben jener LEDs in Haushalten erst möglich geworden. Damit leistet die chemische Forschung einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigeren, energieeffizienteren Beleuchtung durch die LED-Technologie.

Im Folgenden wird eine Experimentierstation des Schülerlabors LMUchemlab vorgestellt, die sich diesem Beitrag der Chemie im Rahmen der Herstellung des LED-Leuchtstoffes Yttrium-Aluminium-Granat dotiert mit Cer ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$, kurz YAG: Ce^{3+}) in einer herkömmlichen Haushaltsmikrowelle widmet [6]. Bislang wurde das alltagsrelevante Thema der LED-Leuchtstoffe in der deutschsprachigen chemiedidaktischen Forschung nur wenig behandelt, die Leuchtstoffe für Leuchtstoffröhren und Energiesparlampen hingegen sind experimentell und theoretisch erschlossen [7,8]. Für LED-Leuchtstoffe existieren kaum experimentelle Ansätze, die in der Schulpraxis bedenkenlos durchführbar sind. Vorarbeiten im Rahmen einer mikrowelleneigneten Synthese sind für den roten Leuchtstoff $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ [9] literaturbekannt, der in LEDs aber nicht eingesetzt werden kann. Weitere Synthesen anderer Luminophore finden sich in der internationalen, chemiedidaktischen Literatur [10–12]. Neuere organische Leuchtdioden (OLEDs) wurden aber bereits intensiv thematisiert [13,14]. Auch die alltagsnahe Mikrowelle findet bereits Anwendung im Chemieunterricht [15,16]. Durch die Wahl einfacher, kostengünstiger und in Schulen zugelassener Geräte und Chemikalien ist eine Durchführung der Synthese eines Leuchtstoffes im Chemieunterricht der Sekundarstufe I und II möglich.

[a] D. Diekemper, W. Schnick, S. Schwarzer
Ludwig-Maximilians-Universität München
Fakultät für Chemie und Pharmazie, Department Chemie
Butenandtstr. 5–13
81377 München

* E-Mail: Dominik.Diekemper@cup.uni-muenchen.de
Wolfgang.Schnick@cup.uni-muenchen.de
Stefan.Schwarzer@cup.uni-muenchen.de



2. Wissenschaftlicher Hintergrund

Die Bezeichnung „Licht emittierende Diode“ lässt bereits auf die Halbleitermaterialien schließen, die in LEDs verbaut werden. In Lichtquellen mit Halbleitermaterialien werden Lichtquanten durch Rekombination von Elektronen und positiven Ladungsträgern (Löchern) erzeugt. Das Anlegen einer Gleichspannung an diese kombinierten n- und p-dotierten Halbleiter ermöglicht es den Elektronen, durch elektrische Anregung aus dem Valenzband in das Leitungsband zu gelangen. Dabei wird eine Bandlücke übersprungen und der Energiebetrag der bei der anschließenden Rekombination emittierten Lichtquanten entspricht der Energiedifferenz der Bandlücke des Halbleiterüberganges [5,17]. Auf diese Weise kann durch LEDs monochromatisches Licht z. B. der Farben Blau, Grün und Rot erzeugt werden. Besonders wichtig für weißes Licht im Alltag ist die blaue Leuchtdiode.

Leuchtdioden, wie sie in vielen Leuchtmitteln im Haushalt Anwendung finden, beinhalten neben der klassischen Diode einen weiteren wichtigen Bestandteil: Den Leuchtstoff (englisch: *phosphor*). Leuchtstoffe sind moderne Festkörpermateriale, die dazu in der Lage sind, nach der Absorption von Licht einer bestimmten Wellenlänge Licht zu emittieren, d. h. zu lumineszieren. Ein Leuchtstoff wird stets von Licht höherer Energie angeregt und emittiert spontan Licht geringerer Energie.

Um dies zu ermöglichen, werden Wirtsgitter mit Metallionen, hauptsächlich mit Seltenerdmetall-Ionen, dotiert (Abb. 1). Die daraus resultierenden Substitutionsdefekte der inkorporierten Metallionen im Gitter führen zur Fähigkeit, durch photochemische Anregung Licht zu emittieren [18]. Für diese Dotierung eignen sich insbesondere Seltenerd-Ionen. Im Falle der Dotierung von YAG mit Ce^{3+} -Ionen verfügt Cer im Vergleich zu Yttrium über ein zusätzliches Valenzelektron (in der Grafik grün dargestellt) und einen größeren Ionenradius. Hauptsächlich relevant sind die Ionen Ce^{3+} , Eu^{2+} und Lu^{3+} . Mit diesen Ionen dotierte chemische Stoffe fluoreszieren sehr effizient durch paritätserlaubte $4f \rightarrow 5d$ -Übergänge (paritäts- bzw. symmetrienerlaubt, da f- und d-Orbitale nicht symmetrisch sind) [19], weshalb sie auch als Aktivator-Ionen bezeichnet werden.

Zwar handelt es sich bei diesen Aktivator-Ionen um Seltenerdmetalle, bei genauerer Betrachtung zeigt sich aber das Problem hinter diesem Begriff: So liegt der Massenanteil des hier verwandten Cers mit 68 ppm in der Erdkruste zwischen dem von Kupfer (50 ppm) und Zink (75 ppm). Der Massenanteil von Yttrium mit 30 ppm liegt immer noch weit vor beispielsweise dem des Bleis mit 18 ppm [20,21].

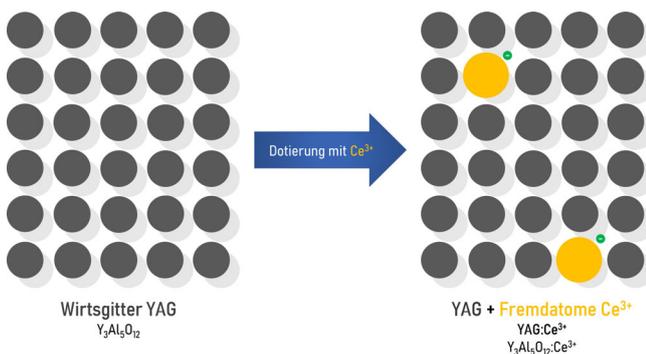


Abb. 1: Vereinfachte modellhafte Darstellung des Prinzips der Dotierung im Leuchtstoff YAG : Ce^{3+} (mit zusätzlichen Valenzelektronen in grün).

Die in alltäglichen Leuchtmitteln verbauten *phosphor-converted LEDs* (pc-LED) bestehen aus einem GaN-Halbleiterchip, der blaues Licht von hoher Intensität aussendet. Eingebettet in einen Reflektor wird die LED von einem Leuchtstoff in einer Polymermatrix (z. B. Silikon) bedeckt (Abb. 2) [18]. Das blaue Licht der LED wird durch den Leuchtstoff in Licht längerer Wellenlänge konvertiert. Der Leuchtstoff luminesziert gelb. Zusammen mit dem verbliebenen blauen Licht der LED entsteht durch additive Farbmischung kaltweißes Licht [22,23].

3. Experimenteller Teil: Schülerlaborstation zum Thema Leuchtstoffe in LED

Chemikalien und Geräte: Aluminiumnitrat-Nonahydrat (98%, Sigma-Aldrich; GHS 03, GHS 07), Cer(III)nitrat-Hexahydrat (99%, Sigma-Aldrich, GHS 03, GHS 05), Yttrium(III)nitrat-Hexahydrat (99,8%, Sigma-Aldrich, GHS 03, GHS 07), Harnstoff (99%, Sigma-Aldrich), 25 mL Becherglas, Kristallisierschale, Porzellantiegel, Magnetrührer mit Thermometer, Rührfisch, Mikrowelle, 1 cm dicke Scheibe Gasbetonstein (oder Ähnliches als hitzefeste Unterlage), Thermopapier, UV-Taschenlampe, LED-Stripe (blau, $\lambda = 420\text{--}480\text{ nm}$), Mörser, Klebstoff (z. B. UHU-Alleskleber), Sand.



Dominik Diekemper studierte Chemie und Geographie für das Lehramt an Gymnasien an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 2018 promoviert er in der Abteilung für Chemiedidaktik der LMU bei Stefan Schwarzer. Dabei widmet er sich besonders der Konzeption von Experimenten zu modernen Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit für Schule und Schülerlabor. Die Erschließung der Inhalte erfolgt in direktem Kontakt zur Fachwissenschaft oder Industrie.



Wolfgang Schnick studierte Chemie in Hannover und promovierte dort im Jahr 1986 bei Martin Jansen. Seit 1998 ist er Professor und Lehrstuhlinhaber für Anorganische Festkörperchemie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Ein sehr erfolgreiches Forschungsgebiet seiner Arbeitsgruppe ist die Entwicklung neuartiger Leuchtstoffe für LED-Anwendungen.



Stefan Schwarzer war seit 2017 Professor für Chemiedidaktik an der Ludwig-Maximilians-Universität München und wechselte im Jahre 2020 auf einen Lehrstuhl für Chemiedidaktik an die Eberhard Karls Universität Tübingen. Sein besonderes Interesse gilt der Entwicklung von Experimenten aus dem Themenbereich moderne Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit für Schule sowie Schülerlabor. Die Erschließung der gesellschaftsrelevanten Inhalte findet häufig in direkter Kooperation mit den Fachwissenschaften statt. Ebenfalls stehen Lernwirk-

samkeitsuntersuchungen der entwickelten Materialien im Vordergrund seiner Arbeit.

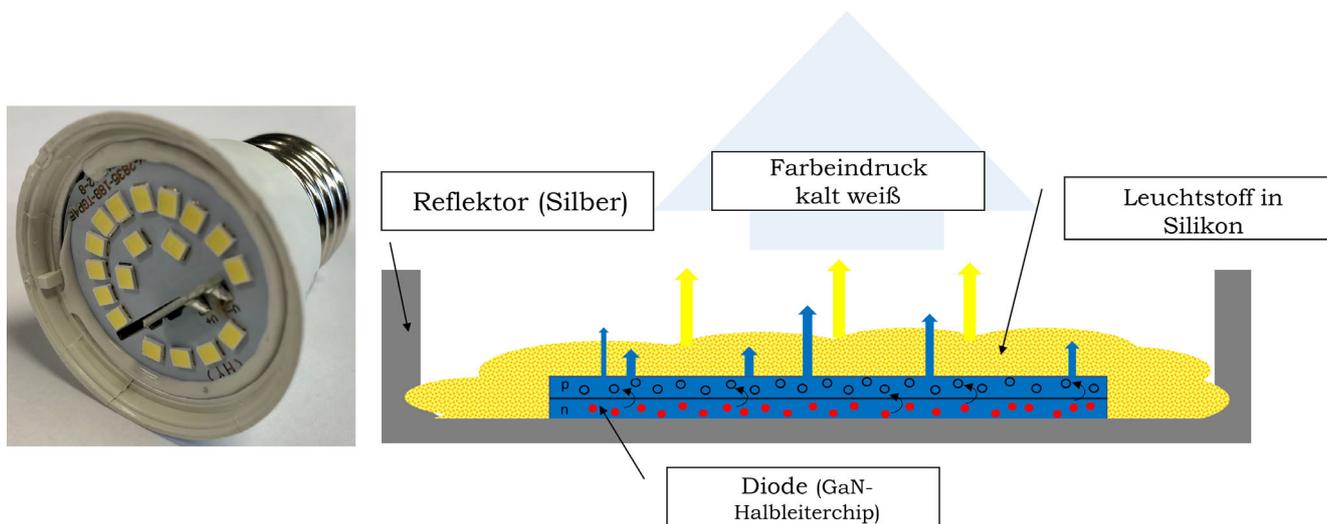


Abb. 2: LED-Leuchtmittel mit entferntem Streukörper und allgemeiner Aufbau einer pc-LED.

3.1 Untersuchung verschiedener Leuchtmittel und Aufbau einer LED

Auf dem Markt für Leuchtmittel zeigte sich in den letzten Jahren eine starke Diversifizierung der Produkte. Seit dem Produktionsstopp der Glühlampe im Jahr 2009 hat sich eine Vielzahl unterschiedlicher Produkte etabliert, die die Schülerinnen und Schüler in einem ersten Schritt im Rahmen der Experimentierstation genauer untersuchen: Angefangen mit der klassischen Glühlampe (1), der Kompaktleuchtstofflampe (2), einer kaltweißen LED (3) und einer warmweißen LED (4) (Abb. 3) werden die unterschiedlichen Leuchtmittel mithilfe einer Wärmebildkamera, einem Spannungsmessgerät für die Steckdose, des durch die beobachtende Person geschilderten Eindruck des Lichts und dem Feststellen der Energieeffizienzklasse genauer eruiert. Als kostengünstigere Variante für die Wärmebildkamera kann eine FLIR-Kamera für Smartphones und Tablets genutzt werden.

Ziel ist es, den technischen Fortschritt von der Glühlampe bis hin zur warmweißen LED zu erarbeiten und damit die deutli-

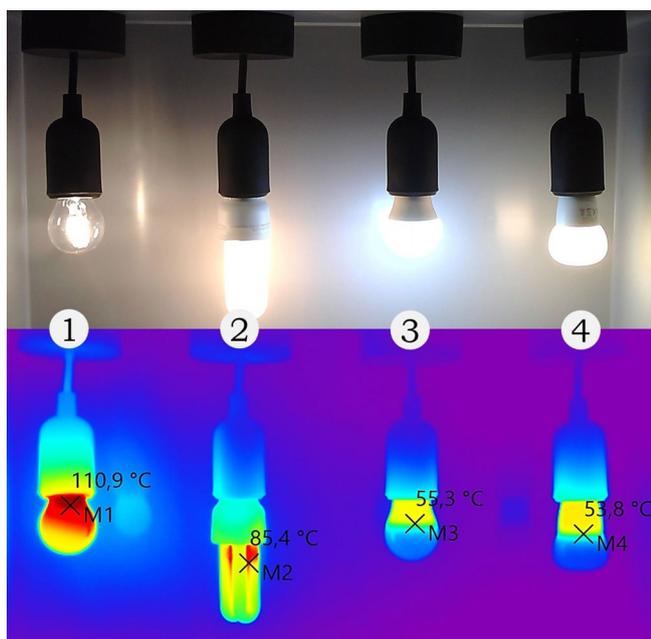


Abb. 3: Vergleich verschiedener Leuchtmittel.

che Verbesserung des Wirkungsgrades der Leuchtmittel. Auch zeigt sich innerhalb der LED-Lampen, von der zuerst verfügbaren kaltweißen LED zur warmweißen Variante, wie sich diese Technologie bzw. die notwendigen Leuchtstoffe weiterentwickelt haben. Da etwa 10% der weltweit erzeugten LEDs maßgeblich zum Energiesparen beitragen [17], verdeutlicht diese Weiterentwicklung den fortschrittlichen und wichtigen Beitrag der Chemie zu einer zukunftsfähigen Entwicklung der Leuchtmittel.

Anhand einer Abbildung einer pc-LED wird in den Aufbau der LED eingeführt und die Notwendigkeit des Leuchtstoffes herausgearbeitet. Die Schülerinnen und Schüler sind dann im weiteren Verlauf der Experimentierstation angehalten, eine Hypothese zu formulieren, wie der Leuchtstoff auf der Diode blaues Licht zu weißem Licht konvertiert.

3.2 Herstellung der Reaktionslösung

Für die Herstellung der Reaktionslösung werden in einem 25 mL-Becherglas 0,81 g $Y(NO_3)_3 \cdot 6 H_2O$, 3,46 g $Al(NO_3)_3 \cdot 9 H_2O$ und 0,02 g $Ce(NO_3)_3 \cdot 6 H_2O$ als Dotierungsmittel in 1 mL Wasser unter Rühren auf dem Magnetrührer gelöst. Im Anschluss werden 2,20 g Harnstoff zur Lösung gegeben und bei 60 °C gerührt, bis eine klare, leicht viskose Lösung entsteht (Abb. 4).

Dieser Prozess benötigt etwa zehn Minuten. Die Lösung kann auch für längere Zeit rühren, wobei sukzessive das Wasser verdunstet und sich die Zusammensetzung verändert. Dies kann dazu führen, dass die Ausbeute aus der Reaktion in der Mikrowelle sinkt. Um dies zu verhindern, können bei längerem Rühren einige Tropfen Wasser nachgegeben werden. Der Ansatz ist ausreichend für etwa sechs Synthesen. Die Chemikalienkosten belaufen sich auf etwa 2,50 € pro Ansatz.

3.3 Vorbereitung des Mikrowellengerätes

Während des Rührens der Reaktionslösung wird die Mikrowelle vorbereitet. Geeignet ist dabei jede herkömmliche Haushaltsmikrowelle mit einer Leistung ab 500 W. Um eine sichere Versuchsdurchführung zu gewährleisten, wird die Mikrowelle in einem Abzug betrieben. Für die Leuchtstoff-Synthese werden hohe Temperaturen benötigt. In einer Mikrowelle werden dabei die Dipolmoleküle des Wassers durch Bestrahlung mit Mikrowellen zur Rotation angeregt. Diese Rotationsbewegung erzeugt Reibungswärme, sodass wasserhaltige Substanzen erhitzt werden. Das Mikrowellengehäuse kann



Abb. 4: Reaktionslösung.

dabei als Faraday'scher Käfig gesehen werden. Im Innenraum der Mikrowelle kommt es an gewissen Punkten zu konstruktiver Interferenz der Mikrowellen. Diese sehr heißen Bereiche mit besonders hoher Energiedichte werden Hot Spots genannt. Hierin liegt im normalen Gebrauch der Mikrowelle zum Erhitzen von Speisen die wichtige Aufgabe des Drehtellers: Das zu erwärmende Gut wird durch den Teller gleichermaßen durch heiße und kalte Bereiche befördert. Für die im Folgenden beschriebene chemische Reaktion sind der Drehteller sowie das Drehgestell allerdings hinderlich. Beide müssen vorab entfernt werden.

Zur Identifizierung der Hot Spots auf dem Mikrowellenboden erhalten die Schülerinnen und Schüler eine passende Styroporplatte, Zellstofftücher, Thermopapier und eine Spritz- oder Sprühflasche mit Wasser. Das angefeuchtete Zellstoffpapier wird auf die Styroporunterlage gelegt und darüber das Thermopapier.

Nach kurzer Zeit bilden sich in der angeschalteten Mikrowelle (Abb. 5) schwarze Flecken auf dem Thermopapier [16]. Auf einen der identifizierten Hotspots wird eine Scheibe Gasbetonstein als Unterlage gelegt und eine mit wenig Sand gefüllte Kristallisierschale als Reaktionsgefäß positioniert.

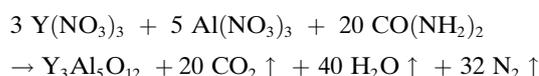


Abb. 5: Platzierung der Reaktionsgefäße und Hotspot-Suche.

3.4 Synthesereaktion

Für den Syntheseprozess werden von der hergestellten Lösung 0,75 mL entnommen und in einen vorgewärmten Porzellantiegel gefüllt. Die Tiegel können hierfür mit auf die Heizplatte des Magnetrührers gestellt werden. Mit der Tiegelzange wird der Tiegel in die sandgefüllte Kristallisierschale gestellt, die Mikrowellentüre sowie die Abzugsscheibe werden geschlossen. Es empfiehlt sich, die Mikrowelle über einen Netzschalter außerhalb des Abzuges an- und auszuschalten. So kann die Mikrowelle auch bei geschlossenem Abzug sicher kontrolliert werden.

Ist die Mikrowelle eingeschaltet, beginnt die Lösung im Reaktionstiegel nach einiger Zeit zu siedeln, es bilden sich Gase (N_2 , CO_2 , H_2O) und der Tiegel erreicht sehr hohe Temperaturen. Die Reaktion ist beendet, sobald ein markantes, gelbgrünes Leuchten (Abb. 6) beobachtet werden konnte. Die Synthese des Wirtgitters $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ verläuft nach folgender Reaktionsgleichung [24]:



Durch den Zusatz der kleinen Menge Cer(III)-nitrat entsteht das Cer-dotierte $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$.

Ist die chemische Reaktion beendet, wird die Mikrowelle ausgeschaltet und die Türe geöffnet, sodass der restliche Dampf entweichen kann. Der sehr heiße Tiegel wird mit einer Tiegelzange aus der Mikrowelle entnommen. Er erreicht hohe Temperaturen und darf nicht mit bloßen Händen entnommen werden. Es empfehlen sich zudem Hitzeschutzhandschuhe. Im Tiegel hat sich ein poröser, gelber Feststoff gebildet.

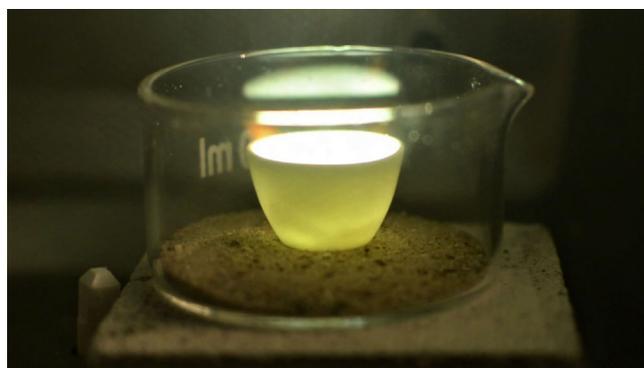
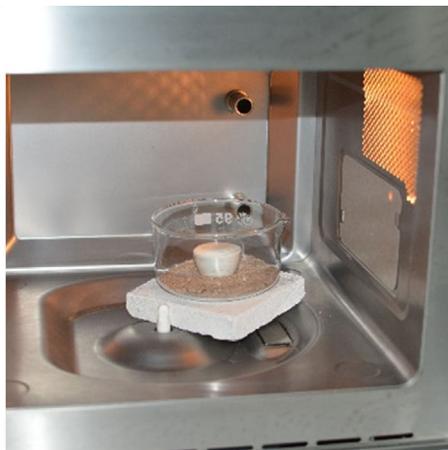


Abb. 6: Synthese in der Mikrowelle.



3.5 "Self-made"- LED: Auftragen auf eine blaue Diode

Der entstandene Feststoff ist $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$, den die Schülerinnen und Schüler anhand der gelblichen Lumineszenz identifizieren können, die er bei Bestrahlung mit UV-Licht oder einer herkömmlichen, blauen LED-Taschenlampe zeigt (Abb. 7).

Die Funktionsweise des Leuchtstoffes kann direkt nachvollzogen werden, indem der entstandene Feststoff aus dem Tiegel geschabt und gemörsert wird und mit handelsüblichem Klebstoff (z. B.: UHU®-Alleskleber) vermengt auf eine blaue LED aufgetragen wird. Hierfür eignen sich alle CoB-LEDs (Chip on Board-LEDs), also solche, ohne Streukörper (zum Beispiel V-TAC LED-Stripes, zu beziehen über Reichelt Elektronik). Die farbkonvertierenden Eigenschaften können sofort erkannt werden, das zuvor blaue Licht erscheint weiß (Abb. 8).



Abb. 7: Syntheseprodukt im Tiegel unter UV-Licht-Bestrahlung.

3.6 Funktionsweise des Leuchtstoffes

Diese eindrucksvolle Fähigkeit des Feststoffes, die nun auf phänomenologischer Ebene anhand des selbst synthetisierten Leuchtstoffes beobachtet werden kann, muss in diesem Schritt auch auf submikroskopischer Ebene erläutert werden.

An dieser Stelle bietet sich die Bildung einer Analogie zwischen bereits Bekanntem, dem Vorwissen der Schülerinnen und Schüler und dem Neuen, Unbekannten an. Geeignet ist in diesem Zusammenhang das Phänomen der Flammenfärbung und der dazugehörige submikroskopische Erklärungsansatz

(Abb. 9). An dieses Vorwissen (Analogiebereich) der Schülerinnen und Schüler kann nun der neue Bereich, die Erklärung der Funktionsweise des Leuchtstoffes (Zielbereich) anknüpfen, Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Konzepte herausgearbeitet und so das Verständnis optimiert werden [25]. Obligatorisch ist aber die Herausarbeitung des gemeinsamen Prinzips [26]. Bereits im Rahmen der Betrachtung von Atommodellen (z. B. im bayerischen LehrplanPLUS verortet in der 8. Jahrgangsstufe) kommen die Schülerinnen und Schüler in Berührung mit dem Phänomen der Flammenfärbung: Die Elektronen eines Atoms (klassischerweise Alkali- und Erdalkalimetalle) werden durch thermische Anregung auf ein höheres Energieniveau angehoben. Beim Zurückfallen auf das ursprüngliche Energieniveau wird Licht einer bestimmten, charakteristischen Wellenlänge ausgesandt.

Die Erklärung der Funktionsweise des Leuchtstoffes zeigt dabei viele Gemeinsamkeiten und folgt einem analogen Prinzip. Ein wesentlicher Unterschied aber ist, dass es sich hier um Emission von Licht durch ein „kaltes“ Objekt handelt: Der Leuchtstoff wird photochemisch durch die blaue LED angeregt und nimmt Energie auf. Die aufgenommene Energie wird zum Aktivator-Ion Ce^{3+} transferiert. Durch dessen Anwesenheit sind viele zusätzliche Schwingungsniveaus entstanden, über die strahlungslose Relaxation erfolgt. Die auf diesen Niveaus emittierte Wärme ist nun der Grund für die unterschiedlichen Wellenlängen von absorbiertem blauem und dem emittierten gelben Licht.

Das Prinzip zwischen Anregung, Relaxation und Emission ist also analog und muss für die Erklärung lediglich erweitert werden. Auch lässt sich auf diese Weise die Bedeutung der Seltenerdmetall-Ionen im Rahmen der Dotierung erläutern. Undotiertes $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ist farblos und zeigt keine Lumineszenz, was anhand einer undotierten Vergleichsprobe mittels UV-Taschenlampe oder Auftrag auf eine blaue LED ebenfalls gezeigt werden kann.

3.7 Herstellung weiterer Leuchtstoffe

Die Bandbreite unterschiedlicher Leuchtstoffe mit unterschiedlichen technischen Anwendungsmöglichkeiten ist groß. Im Rahmen der zuvor dargestellten Herstellungsmethode können neben dem LED-Leuchtstoff $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ auf analoge Weise weitere Leuchtstoffe unterschiedlicher Farben hergestellt werden, die in Tabelle 1 [22,27,28] zusammengefasst sind (Tab. 1):

Während das Auftragen von $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$ und $\text{TAG}:\text{Ce}^{3+}$ auf blaue LEDs einen Effekt zeigt, ist dies mit den anderen syn-

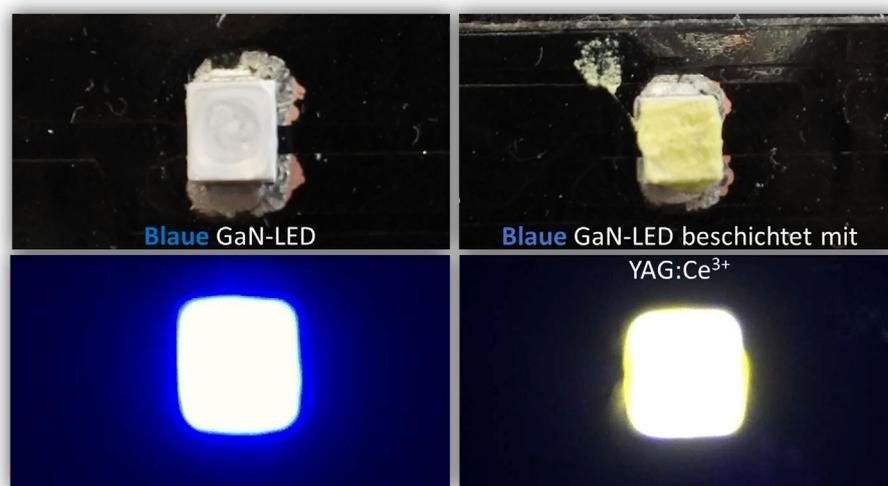


Abb. 8: Blaue LED mit und ohne Beschichtung mit $\text{YAG}:\text{Ce}^{3+}$.

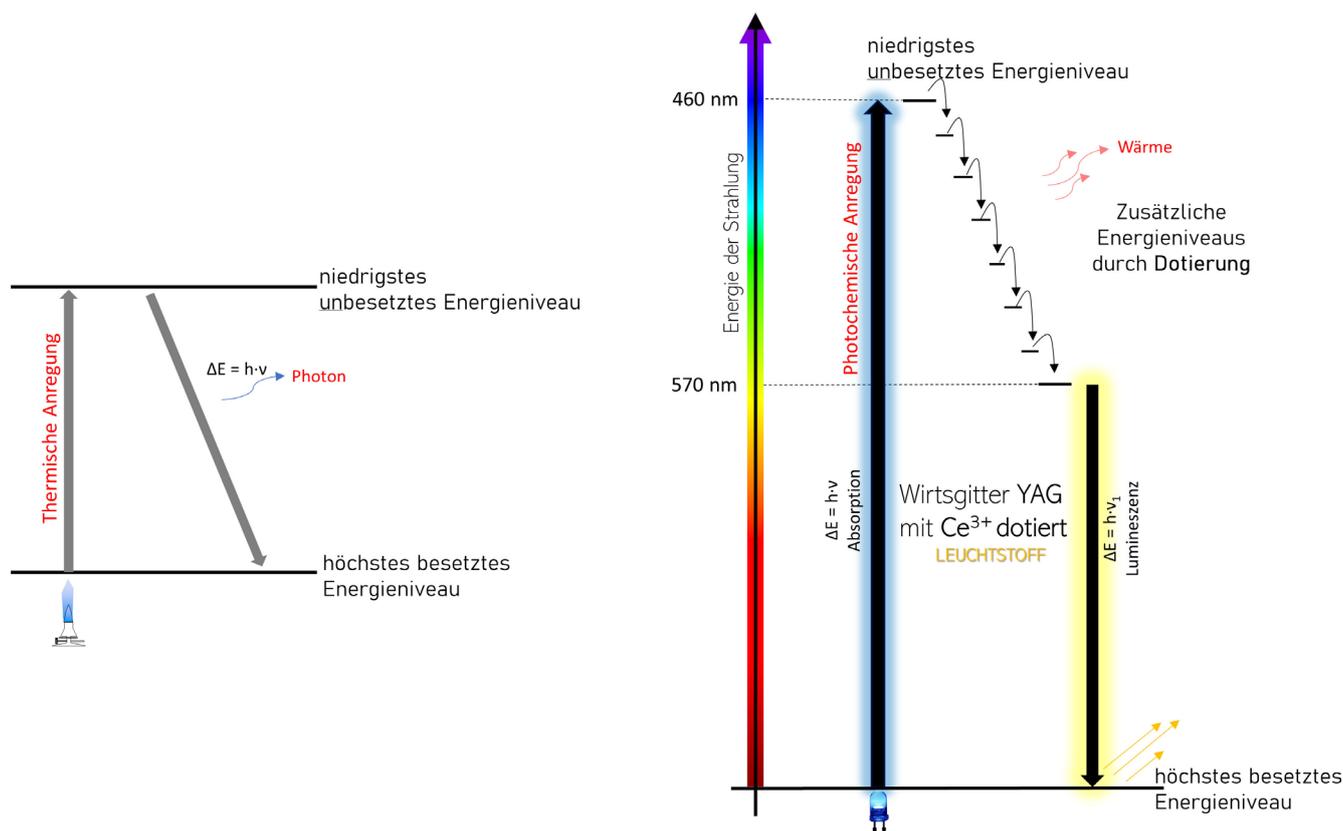


Abb. 9: Analogisierung der Funktionsweise eines Leuchtstoffes mit dem bekannten Phänomen der Flammenfärbung.

Tab. 1: Synthese weiterer Leuchtstoffe in der Mikrowelle.

| Leuchtstoff | Summenformel | λ (Abs.) | λ (Em.) | Anwendung |
|----------------------|---|------------------|--------------------|-------------------------|
| YAG:Ce ³⁺ | Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺ | 470 nm | 532 nm (gelb) | LEDs |
| YAG:Eu ³⁺ | Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Eu ³⁺ | 254 nm | 592 nm (rot) | Roter Linienleuchtstoff |
| TAG:Ce ³⁺ | Tb ₃ Al ₅ O ₁₂ :Ce ³⁺ | 470 nm | 553, 620 nm (gelb) | LEDs |
| BAM:Eu ²⁺ | BaMgAl ₁₀ O ₁₇ :Eu ²⁺ | 250 nm | 453 nm (blau) | Fluoreszenzlampen |

thetisierbaren Leuchtstoffen aufgrund der abweichenden Absorptionsbereiche nicht möglich. Zur Synthese von YAG:Eu³⁺ wird im Vergleich zur genannten Synthese lediglich das Dotierungsmittel Cer-(III)nitrat durch Europium-(III)nitrat ausgetauscht. Gleiches gilt bei der Herstellung von TAG:Ce³⁺ für Yttrium-(III)nitrat und Terbium-(III)nitrat. Für die Herstellung von BAM:Eu²⁺ [29], zu finden in Leuchtstoffröhren, werden im identischen Verfahren 3,0 g Harnstoff, 0,2 g Ba(NO₃)₂, 4,2 g Al(NO₃)₃·9 H₂O, 0,01 g Eu(NO₃)₃·5 H₂O und 0,2 g Mg(NO₃)₂·6 H₂O eingewogen und ebenfalls in der Mikrowelle mit 1 mL Wasser zur Reaktion gebracht.

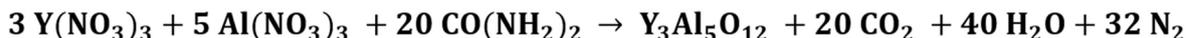
4. Didaktische Betrachtung und Unterrichtsbezug

Das Image der chemischen Industrie sowie des Schulfaches Chemie ist seit vielen Jahren negativ konnotiert. Oftmals wird die Chemie als ökologisch bedenklich, gefährlich, starr und abstrakt [30–33] beurteilt. An dieser Stelle eignet sich das Thema der Leuchtstoffe nicht nur, um die Bedeutung von Seltenmetallen im Chemieunterricht vorzustellen, sondern ebenso, um den Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung, hier einer energiesparenden Beleuchtung durch die Entwicklung immer farbechterer, energieeffizienterer Leuchtstoffe, zu thematisieren.

Im Rahmen der chemischen Betrachtung der Leuchtstoffe zeigt sich zudem die Zusammenarbeit verschiedener Naturwissenschaften für technologische Neuerungen in unserem Alltag. Dies kann auch bei Schülerinnen und Schülern zu einem holistischeren Blick auf die Vernetzung der einzelnen Naturwissenschaften führen sowie auf die Tatsache, dass Chemie, Technologie, Gesellschaft und Wissenschaft miteinander in Beziehung stehen und nicht vollständig fragmentierte Bereiche sind, wie sie vielfach wahrgenommen werden [34,35].

Eben diese Vernetzung verschiedener Dimensionen zeigt sich auch im medial und gesellschaftlich inflationär eingesetzten Begriff „Nachhaltigkeit“, der nach der am weitesten anerkannten und etablierten Definition die drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales gleichberechtigt beinhaltet [36]. Eine auf diesem Begriffsverständnis bauende „nachhaltige Entwicklung“ ist dabei eine Entwicklung, die es der gegenwärtigen Generation ermöglicht, ihre Bedürfnisse zu befriedigen, ohne damit zukünftige Generationen in der Befriedigung ihrer Bedürfnisse zu hindern [31,37].

Im Schulunterricht gilt die Geographie als eines der wenigen Hauptträgerfächer einer Bildung für nachhaltige Entwicklung und dies, obwohl die chemische Forschung essentiell für nachhaltige Entwicklung ist und auch Chemielehrerinnen und Chemielehrer der BnE einen hohen Stellenwert beimessen

Gesamtgleichung:

Identifiziere anhand der Oxidationszahlen Oxidation und Reduktion! Erstelle die Teilgleichungen und ergänze zur vollständigen Redoxgleichung! Ordne die Begriffe Oxidations- und Reduktionsmittel zu!

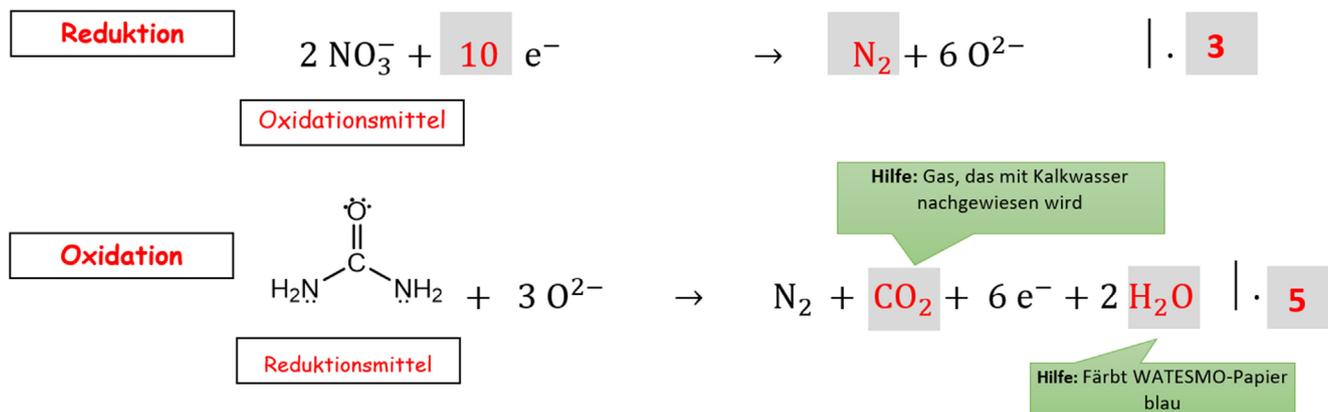
Teilgleichungen:

Abb. 10: Ausschnitt aus dem Schülerskript zur Aufstellung der Redoxgleichung.

[38,39]. In den Fachcurricula der einzelnen Bundesländer finden sich zwar Ansatzpunkte, um den Nachhaltigkeitsgedanken in den Chemieunterricht zu implementieren. Dies geschieht aber meistens ohne den fortschrittlichen, zukunftsweisenden Beitrag der Chemie aufzuzeigen.

Eine gute BnE benötigt integrative, interdisziplinäre und transdisziplinäre Zugänge und damit fächerübergreifende und fächerverbindende Unterrichtsweisen [36]. Dies legitimiert nicht nur die Entwicklung neuer (experimenteller) Lehr- und Lernzugänge unter Beachtung der aktuellen Fachforschung, sondern zeigt, dass auch das Fach Chemie -nicht nur aus Gründen einer Verbesserung des Images des Faches- ebenfalls einen Beitrag leisten kann und soll.

Das vorgestellte Experiment verbindet dabei aktuelle Fachforschung und damit moderne Materialien mit dem Ziel einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. Das kritische Hinterfragen der hohen Umweltbelastung beim Abbau der Seltenen Erden und Problematiken des Recyclings mit deren chemischen Hintergründen von seltenerdmetallhaltigen End-of-Life(EoL)-Produkten [40] können außerdem einen Beitrag zur Schulung der Bewertungskompetenz leisten.

Eine Eingliederung in den Chemieunterricht ist denkbar in den Themen Molekülstruktur und Farbigkeit, Emission und Absorption, Farbigkeit (z. B. im bayerischen Lehrplan verortet in der 11. Jahrgangsstufe) oder im Rahmen der Betrachtung von Redoxprozessen (Jahrgangsstufe 10) [41]. Der Syntheseprozess beruht auf einer Redoxreaktion, die mit Hilfestellungen von den Schülerinnen und Schülern erarbeitet werden kann (Abb. 10).

5. Zusammenfassung und Ausblick

Leuchtstoffe sind moderne Materialien mit hoher Alltagsrelevanz für Schülerinnen und Schüler. Der gezielte Zugriff

dieses Themenkomplexes im Schulunterricht und außerschulischen Lernorten bietet die Möglichkeit, den Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Entwicklung aufzuzeigen, die Interdependenz zwischen unterschiedlichen Wissenschaftszweigen, Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt herauszuarbeiten und so einen holistischen Blick auf naturwissenschaftliche Sachverhalte zu vermitteln. Fächerübergreifender Unterricht ist sowohl mit der Physik (Dotierung, Halbleitermaterialien, Licht) als auch mit der Geographie (Seltenerdmetalle, Gewinnung und Abbau, Global Change) möglich und wünschenswert.

In der chemischen Forschung wird auch weiterhin an immer effizienteren und farbechteren Leuchtstoffen geforscht, sodass das Thema auch seitens der Wissenschaft seine Aktualität behält.

Literatur

- [1] Frondel, M., Lohmann, S. (2011). The European Commission's Light Bulb Decree: Another Costly Regulation? *Energy Policy* 39/6, 3177–3181.
- [2] Winkler, H. et al. (Hrsg.) (2015). *LED Lighting. Technology and Perception*. Wiley-VCH, Weinheim.
- [3] Baumgartner, T. et al. (2012). *Lighting the Way: Perspectives on the Global Lighting Market*. https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/dotcom/client_service/automotive%20and%20assembly/lighting_the_way_perspectives_on_global_lighting_market_2012.ashx (letzter Zugriff am 22.6.2020).
- [4] Bowden, E. Trump jokes that energy-efficient light bulbs make him look orange. <https://nypost.com/2019/12/06/trump-jokes-that-energy-efficient-light-bulbs-make-him-look-orange/> (letzter Zugriff am 22.6.2020).
- [5] Harrer, R. (2014). Leuchtdioden als umweltschonendes Beleuchtungskonzept. *Chem. Unserer Zeit* 48/6, 422–423.
- [6] Diekemper, D., Schnick, W., Schwarzer, S. (2019). Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemis-

- try's Contribution to Sustainable Lighting. *J. Chem. Educ.* 96/12, 3018–3024.
- [7] Bohrmann-Linde, C. et al. (2014). Chemie 2000+ NRW Sek II/ Chemie 2000+ Qualifikationsphase. Buchner C C, Bamberg.
- [8] Bohrmann-Linde, C. (2004). Von der Elektrolysezelle zur Leuchtdiode. Elektrolumineszenz im Chemieunterricht. *Praxis der Naturwissenschaft – Chemie in der Schule* 53/3, 12–19.
- [9] Prechtl, M., Binstadt, F. (2017). Leuchtstoffe mit Seltenerdmetallen im Unterricht. Faszinierende Anwendungen und eine problematische Synthesemethode. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* 28/5, 44–47.
- [10] Zitoun, D. et al. (2009). Microwave Synthesis of a Long-Lasting Phosphor. *J. Chem. Educ.* 86/1, 72.
- [11] Stanish, P. C., Siu, H., Radovanovic, P. V. (2019). Inorganic Phosphors for Teaching a Holistic Approach to Functional Materials Investigation: From Synthesis and Characterization to Applications of Thermo- and Mechanoluminescence. *J. Chem. Educ.* 96/5, 1008–1014.
- [12] Ma, Y.-Z. et al. (2017). Preparing, Characterizing, and Investigating Luminescent Properties of a Series of Long-Lasting Phosphors in a SrO–Al₂O₃ System: An Integrated and Inquiry-Based Experiment in Solid State Chemistry for the Undergraduate Laboratory. *J. Chem. Educ.* 94/8, 1157–1162.
- [13] Banerji, A., Schönbein, A.-K., Wolff, J. (2017). OLED Reloaded: Die Synthese des Halbleiterpolymers MEH-PPV als Schulversuch. *CHEMKON* 24/4, 251–256.
- [14] Banerji, A. (2017). Organische Elektronik als Lehrstoff. *Nachr. Chem.* 65/7-8, 807–809.
- [15] Ruppertsberg, K., Klemeyer, H. (2020). Lactose-Schnelltest: Wie kann man in 60 Sekunden Milchzucker nachweisen? *CHEMKON* (<https://doi.org/10.1002/ckon.201900064>).
- [16] Lühken, A. (2005). Ultraschall und Mikrowellenstrahlung im Chemieunterricht (Dissertation). Frankfurt (Main), Univ., Diss., 2005. Goethe-Universität, Frankfurt am Main.
- [17] Born, M., Jüstel, T. (2006). Elektrische Lichtquellen: Chemie in Lampen. *Chem. Unserer Zeit* 40/5, 294–305.
- [18] Janiak, C., Gudat, D., Kurz, P. (2018). *Moderne anorganische Chemie*, 5. Aufl. De Gruyter, Berlin, Boston.
- [19] Höpfe, H. A. (2009). Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der anorganischen Leuchtstoffe. *Angew. Chem.* 121/20, 3626–3636.
- [20] Jahn, B., Daumann, L. J. (2018). Die faszinierende bioanorganische Chemie der Seltenerd-Elemente. *Chem. Unserer Zeit* 52/3, 150–158.
- [21] Riedel, E., Janiak, C. (2015). *Anorganische Chemie*, 9. Aufl. De Gruyter, Berlin, Boston.
- [22] Xia, Z., Meijerink, A. (2017). Ce³⁺-Doped Garnet Phosphors: Composition Modification, Luminescence Properties and Applications. *Chem. Soc. Rev.* 46/1, 275–299.
- [23] Mueller-Mach, R. et al. (2005). Highly Efficient All-Nitride Phosphor-Converted White Light Emitting Diode. *Phys. Status Solidi (a)* 202/9, 1727–1732.
- [24] Fu, Y.-P. (2006). Preparation of Y₃Al₅O₁₂:Ce Powders by Microwave-Induced Combustion Process and their Luminescent Properties. *J. Alloys Compd.* 414/1-2, 181–185.
- [25] Krämer, V., Reiners, C. S., Schumacher, E. (2008). Zur Bedeutung von Analogien in Lernprozessen. *Praxis der Naturwissenschaft – Chemie in der Schule* 57/7, 36–39.
- Die weiteren Quellen finden sich in der Online-Ergänzung.

Eingegangen am 30. April 2020

Angenommen am 28. Juni 2020

Online veröffentlicht am ■■. ■■ 0000

5.3 Leuchtstoffe in LEDs: Fächerübergreifend, modern und nachhaltig: Herstellung eines LED-Leuchtstoffes in der Mikrowelle

Dominik Diekemper, Bianca Watzka, Stefan Schwarzer

Diekemper, Dominik; Watzka, Bianca; Schwarzer, Stefan (2021): Leuchtstoffe in LEDs: fächerübergreifend, modern und nachhaltig: Herstellung eines LED-Leuchtstoffes in der Mikrowelle. *MNU Journal*, 74(2), 110-118.

Author contributions:

Die Erprobung und Entwicklung des Experiments sowie die didaktische Ausarbeitung wurden durch Dominik Diekemper unter Anleitung von Stefan Schwarzer durchgeführt. Das Manuskript wurde von Dominik Diekemper geschrieben, physikdidaktische Anteile von Bianca Watzka. Das Gesamtprojekt fand unter Anleitung von Stefan Schwarzer statt.

Copyright:

Der Artikel wurde mit Genehmigung durch den Verlag Klaus Seeberger und Förderverein MNU; Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e. V. im Rahmen dieser kumulativen Dissertation abgedruckt.



Leuchtstoffe in LEDs

Fächerübergreifend, modern und nachhaltig: Herstellung eines LED-Leuchtstoffes in der Mikrowelle

DOMINIK DIEKEMPER – BIANCA WATZKA – STEFAN SCHWARZER

Der Siegeszug der LED-Beleuchtung ist durch fächerübergreifende Forschung von Chemie und Physik an modernen Leuchtstoffen möglich geworden. Ohne den Beitrag beider Fachdisziplinen wäre weißes Licht aus LEDs in unserem Alltag nicht vorhanden. Dieser fächerverbindende Gedanke und die einfache Synthese eines aktuellen Leuchtstoffes lassen sich auch in den Schulunterricht transferieren. Im hier vorgestellten Experiment wird schülergerecht mittels Mikrowellensynthese der Leuchtstoff YAG:Ce hergestellt und eine curriculare Einbettung in den Chemie- sowie Physikunterricht diskutiert.

1 Faszination Licht

Licht kann auf vielfältige Art und Weise faszinieren: Ob als Polarlicht in den hohen Breiten, als Lichtshow oder als eine beleuchtete Skyline im Dunkeln. Diese Faszination kann auch Schüler/innen ohne spezielles Fachwissen ergreifen (ELSTER, 2007). Daher kann sich das Thema Licht als motivierender und Interessen fördernder Lerninhalt eignen, um wissenschaftliche Neugier zu wecken. Im naturwissenschaftlichen Unterricht wird das Thema hauptsächlich der Physik zugeordnet. Zwar finden sich in der Chemie sowohl auf Schulebene Themenkomplexe, die elektromagnetische Strahlung mit einbeziehen wie z.B.

Absorption, Emission und Farbstoffe, als auch auf Forschungsebene didaktische und fachwissenschaftliche Forschung zum Thema Licht/Strahlung im Chemieunterricht (TAUSCH, 2020). Dennoch bleibt das Thema im Schulunterricht meist physikdominiert.

Alltagsrelevante und fächerverbindende Produkte sind weiße und warmweiße LEDs, die in nahezu jedem Haushalt zu finden sind. Sie gelten als energieeffizienter und langlebiger als ihre Vorgänger (FRONDEL & LOHMANN, 2011). Für die Entwicklung der dafür grundlegenden blauen LED wurde den japanischen Forschern AKASAKI, AMANO und NAKAMURA 2014 der Nobelpreis für Physik verliehen (DOLLEN, PIMPUTKAR & SPECK, 2014). Auf dem

Weg zur weißen und warmweißen Beleuchtung aber kommt die Chemie ins Spiel: Durch die gezielte feststoffsynthetische Entwicklung farbkonvertierender Leuchtstoffe ist weißes Licht durch energiesparende LED-Technologie überhaupt erst möglich geworden (SCHMIECHEN, PUST, SCHMIDT & SCHNICK, 2014).

1.1 Leuchtstoffe – Produkte mit chemischem Know-how

Leuchtstoffe bestehen aus Pigmenten, die nach einer Anregung durch Strahlung in der Lage sind, Licht zu emittieren, zu lumineszieren. Dabei wird ein Leuchtstoff prinzipiell von Strahlung höherer Energie angeregt und emittiert spontan Strahlung niedrigerer Energie. Zur gezielten Synthese von diesen modernen Materialien werden Wirtsgitter mit Metallionen dotiert. Diese Dotierung führt zu Defekten im Gitter und damit zur Fähigkeit durch photochemische Anregung Licht zu emittieren (JANIAK, GUDAT & KURZ, 2018, JÜSTEL & SCHWUNG, 2019). Es werden hierfür hauptsächlich Ionen der Gruppe der Seltenerdmetalle verwendet. Die Eigenschaft effizient zu fluoreszieren, verdankt diese Gruppe dabei erlaubten Elektronenübergängen zwischen 4f- und 5d-Orbitalen (HÖPPE, 2009).

Eingesetzt werden Leuchtstoffe unter anderem in Leuchtstoffröhren, Kompaktleuchtstofflampen und Bildschirmen, sowie in weißen, Leuchtstoff-konvertierenden LEDs. Einer der prominentesten Leuchtstoffe ist dabei Yttrium-Aluminium-Granat dotiert mit Ce^{3+} , kurz YAG:Ce (XIA & MEIJERINK, 2017). Dieser Leuchtstoff ist in nahezu jeder weißen LED zu finden und soll im Experiment (siehe 4) schülergerecht hergestellt werden (DIEKEMPER, SCHNICK & SCHWARZER, 2019).

1.2 Die LED ein klassisches Halbleiterbauelement

Im Folgenden werden daher die fachlichen Grundlagen zu den zentralen Vorgängen am p-n-Übergang lediglich kurz beschrieben. LEDs emittieren elektromagnetische Strahlung, wenn ihr p-n-Übergang in Durchlassrichtung betrieben wird. Dabei wird die LED mit einem Vorwiderstand in Reihe geschaltet und eine äußere elektrische Spannung so angelegt, dass die n-Seite des Übergangs mit dem Minuspol und entsprechend die p-Seite des Übergangs mit dem Pluspol der Spannungsquelle verbunden sind. Bei passender Konfiguration emittiert die LED dann Strahlung,

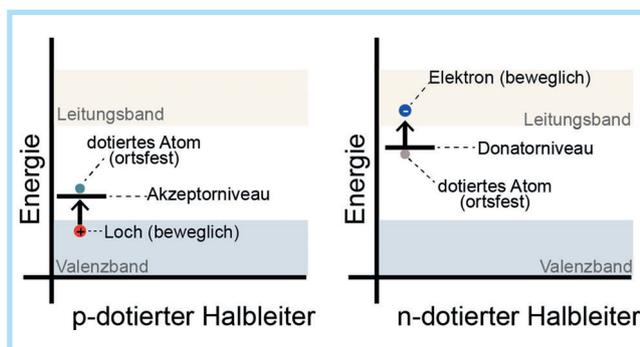


Abb. 1. Akzeptorniveau im p-dotierten Halbleiter und Donatorniveau im n-dotierten Halbleiter. Das Fermi-niveau ist hier jeweils nicht abgetragen, um die Zeichnung übersichtlich zu halten. Es liegt beim p-dotierten Halbleiter in der Nähe des Valenzbandes und beim n-dotierten Halbleiter nahe des Leitungsbandes (TIPLER, MOSCA & KERSTEN, 2019).

die aus der strahlenden Rekombination von Elektronen-Loch-Paaren im p-n-Übergang stammt. Die Wellenlänge der Strahlung wird dabei durch das Halbleitermaterial bestimmt.

Ein p-n-Übergang entsteht, wenn ein p-dotierter mit einem n-dotierten Halbleiter in Kontakt steht. Die Leitfähigkeit im p-dotierten Halbleiter wird überwiegend durch Löcher im Valenzband bestimmt. Im Gegensatz dazu tragen im n-dotierten Halbleiter hauptsächlich Elektronen im Leitungsband zur Leitfähigkeit bei. Im Bändermodell zeigen sich Dotierungen durch zusätzliche Energieniveaus innerhalb der Bandlücke in unmittelbarer Nähe zu den Bandkanten. Es reichen also sehr geringe Energien, um diese Ladungsträger zu freien Ladungsträgern zu machen (Abb. 1).

Im Übergang zwischen n- und p-dotiertem Halbleiter liegt ein Gradient der Konzentrationen von beweglichen Elektronen im Leitungsband und von beweglichen Löchern im Valenzband vor. Daher diffundieren Elektronen aus dem n-dotierten Gebiet in das p-dotierte Gebiet und Löcher vom p-dotierten Gebiet in das n-dotierte Gebiet. Durch diese entgegengesetzten Diffusionsvorgänge entsteht (a) eine Verarmungszone um die p-n-Grenzschicht, (b) eine positive Raumladungsdichte im n-dotierten Bereich und (c) eine entsprechende negative Raumladungsdichte im p-dotierten Bereich. Die positive Raumladungsdichte der n-Seite und die negative Raumladungsdichte der p-Seite erzeugen ein elektrisches Feld, das einen Feldstrom in entgegengesetzter Richtung zum Diffusionsstrom bewirkt. Im thermischen Gleichgewicht kompensieren sich die Diffusionsströme und Feldströme gerade, sodass die Ladungsträgerkonzentration am Übergang gleich Null ist (DEMTRÖDER, 2010). Abbildung 2 zeigt ein Energiediagramm für den p-n-Übergang.

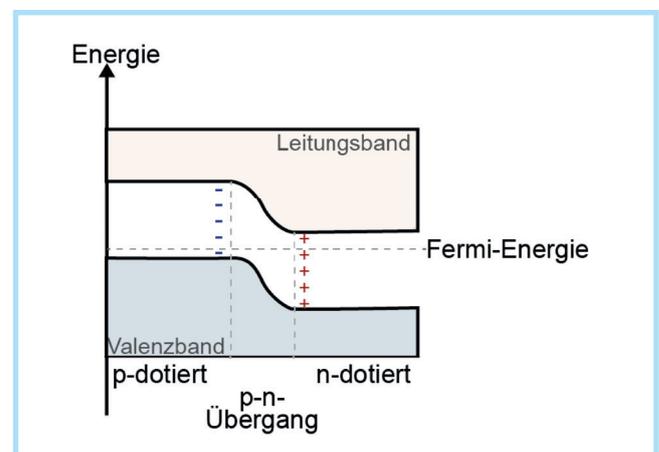


Abb. 2. Energiediagramm des p-n-Übergangs im thermischen Gleichgewicht (keine äußere Spannung) mit negativer Raumladungsdichte (-) im p-dotierten und positiver Raumladungsdichte (+) im n-dotierten Bereich. Beim Zusammenbringen der beiden Halbleiter kommt es bei gleicher Fermi-Energie zu einer Bandverbiegung von Valenz- und Leitungsband (TIPLER, MOSCA & KERSTEN, 2019).

Das Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung bewirkt, dass die Potentialbarriere für Elektronen und Löcher verringert wird und sich die Ladungsträgerkonzentration am p-n-Übergang erhöht. Dadurch können im p-n-Übergang mehr Elektronen-Loch-Paare rekombinieren als im thermischen Gleichgewicht

ohne äußere Spannung. Bei LEDs dominiert die strahlende Rekombination unter Emission eines Photons. Die Energie des frei gewordenen Photons entspricht der Energiedifferenz zwischen Leitungs- und Valenzband (Abb. 3).

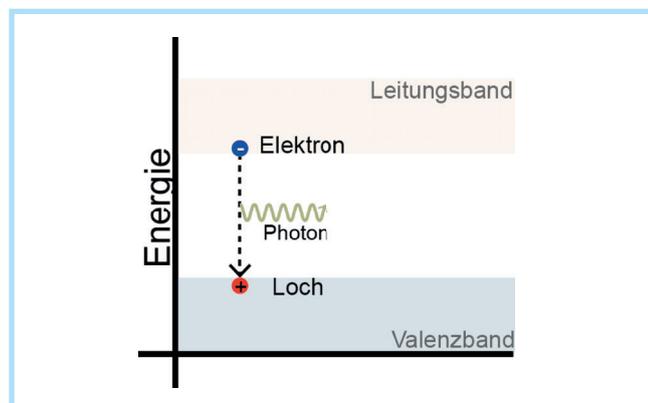


Abb. 3. Vereinfachte Darstellung der strahlenden Elektron-Loch-Rekombination (TIPLER, MOSCA & KERSTEN, 2019)

1.3 Aufbau einer leuchtstoffkonvertierenden LED

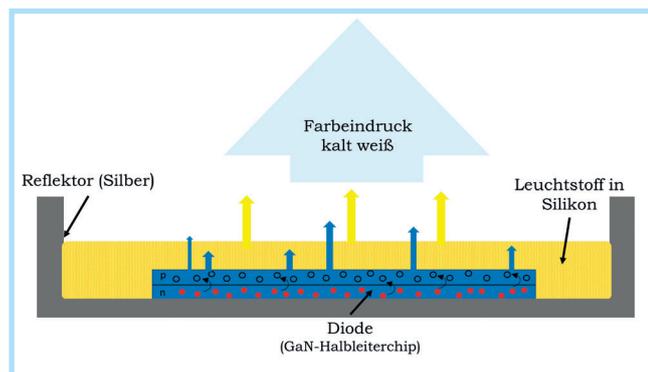


Abb. 4. Aufbau einer leuchtstoffkonvertierenden LED (pc-LED)

Grundsätzlich besteht jede weiße LED aus zwei essenziellen Bestandteilen (Abb. 4). Blaues Licht der Wellenlänge 450 nm mit sehr hoher Intensität wird durch eine Galliumnitrid-LED (GaN-LED) erzeugt. Da bei der Rekombination die freiwerdenden Photonen in alle Richtungen abgestrahlt werden, ist der LED-Halbleiterchip eingebettet in einen Reflektor, zumeist beschichtet mit einer reflektierenden Silberschicht, zur Erhöhung der Lichtausbeute in einer Raumrichtung. Auf den Halbleiterchip wird nun der Leuchtstoff, eingebettet in eine Polymermatrix, aufgetragen. Das Polymer ist dabei häufig ein möglichst transparentes Silikon. Wird die LED in Durchlassrichtung betrieben, sendet sie blaues Licht aus (siehe 1.2). Der Leuchtstoff absorbiert einen großen Teil dieses Lichts und konvertiert es abwärts. Energiereiches blaues Licht wird dabei zu energieärmerem gelbem Licht umgewandelt. Hierbei luminesziert der Leuchtstoff intensiv gelb. Durch additive Farbmischung mit dem verbliebenen blauen Licht (Komplementärfarbe zu gelb) der LED entsteht so weißes Licht (XIA & MEIJERINK, 2017, MUELLER-MACH et al., 2005).

An diesem Beispiel zeigt sich nun, dass heute einzelne Naturwissenschaften keine fragmentierten Bereiche mehr darstel-

len, wie die Aufteilung in Einfächer nahelegt. Vielmehr stehen Naturwissenschaftler/innen, hier Physiker/innen und Chemiker/innen, Technologie, Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft miteinander in Bezug; sie profitieren voneinander und determinieren sich gegenseitig (MAHAFFY, KRIEF, HOPF, MEHTA & MATLIN, 2018, HRIN, MILENKOVIĆ, SEGEDINAC & HORVAT, 2017). Dieser Gedanke kann bei Lernenden zu einem holistischeren Blick auf die Vernetzung der einzelnen Naturwissenschaften führen und eignet sich deshalb, auch im Rahmen des Schulunterrichts, die Thematik gezielt fächerübergreifend oder in Verbundfächern fachintegrativ zu unterrichten.

2 Didaktisches Potential

Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung hat nicht nur medial und gesellschaftlich an Relevanz gewonnen. Es ist auch in der Schule vermehrt zu einem Schlüsselthema geworden. Nach KLAFKI (2006) kann in Anlehnung an den Bildungsgehalt der einzelnen Naturwissenschaften auch von einem epochaltypischen Schlüsselproblem gesprochen werden (GUDJONS & TRAUB, 2016). In allen deutschen Bundesländern ist Bildung für nachhaltige Entwicklung ein zentrales fächerübergreifendes Bildungs- und Erziehungsziel. Jedoch beschränkt sich die Wahrnehmung des Begriffs Nachhaltigkeit zu oft auf ökologische Faktoren. Nachhaltigkeit aber besteht nach der etablierten Definition aus den drei gleichberechtigten Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales (ZIMMERMANN, 2018). Eine auf diesen dreidimensionalen Begriff aufbauende „nachhaltige Entwicklung“ meint dabei eine Entwicklung, die es der gegenwärtigen Generation ermöglicht, ihre Bedürfnisse zu befriedigen, ohne damit zukünftige Generationen in der Befriedigung ihrer Bedürfnisse zu hindern (BURMEISTER, JOKMIN & EILKS, 2011, HAUFF, 1987). Innerhalb der Schulfächer wird oft das Fach Geographie als Hauptträgerfach einer Bildung für nachhaltige Entwicklung gesehen (BAGOLY-SIMÓ, 2014) oder BnE wird insgesamt dem gesellschaftswissenschaftlichen Spektrum zugeordnet. Dass auch die Naturwissenschaften durch ihre Forschung zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen, wird dabei häufig zu wenig beachtet. Ziel dieses alltagsnahen Experimentes zur Leuchtstoffsynthese und der bereitgestellten Arbeitsmaterialien ist es aufzuzeigen, welchen Beitrag Physik und Chemie gemeinsam zu einer nachhaltigen und energiesparenden Beleuchtung durch LED-Technologie leisten und geleistet haben.

Für die Fächer Chemie, Physik ergeben sich daraus fachspezifische didaktische Potentiale:

2.1 Didaktisches Potential aus Sicht der Chemie

Die Chemie leidet seit vielen Jahren an einem stark negativ konnotierten Image. In der breiten Gesellschaft und auch unter Lernenden wird die Chemie oft als ökologisch bedenklich, gefährlich und abstrakt beschrieben (WEßNIGK & EULER, 2014, PRENZEL & ALLOLIO-NÄCKE, 2006, BURMEISTER, JOKMIN & EILKS, 2011). Dabei wird im Unterrichtsfach Chemie hauptsächlich das notwendige Fachwissen theoretischer Natur aufgezeigt, aber das Aufzeigen einer fortschrittlichen, problemlösenden und an einer nachhaltigeren und ressourcenschonenderen Umwelt forschende Wesen der Chemie vernachlässigt. All dies ist jedoch

ein elementarer Bestandteil eines Verständnisses von Nature of Science im Chemieunterricht. Dieses Bild kann bei Schüler/innen dazu führen, dass die Beliebtheit des Faches Chemie und damit das Interesse sinken. Auch das Thema der Seltenerdmetalle ist durch den technologischen Fortschritt und aus Sicht eines Ressourcenmanagements sowohl medial als auch geopolitisch seit Jahren präsent. Viele alltägliche Produkte – eben auch die Beleuchtung durch LEDs – sind ohne den Einsatz von Seltenerdmetallen nicht möglich. Die chemische Betrachtung dieser kritischen Rohstoffe und deren Verwendung in modernen Materialien, eröffnet sich am Beispiel der Thematik der Leuchtstoffe. Da Seltenerdmetalle oft als „Rohstoffe mit Konfliktpotential“ bezeichnet werden, sich bereits in den letzten Jahren geopolitische Verwerfungen aufzeigten und geeignete Recycling-Prozesse ausstehen, eignet sich das Thema auch gezielt, um im Rahmen der Leuchtstoffe Vor- und Nachteile von LED Beleuchtung zu recherchieren um gezielt die Bewertungskompetenz der Schüler/innen zu schulen.

2.2 Didaktisches Potential aus Sicht der Physik

Die Behandlung von LEDs als typische Halbleiterbauelemente im Physikunterricht ermöglicht die Anbindung an eine Vielzahl von technischen Anwendungen. Beispiele hierfür sind farbige LEDs in Displaybeleuchtungen, IR-LEDs in Sensoren zur berührungslosen Steuerung von Wasserhähnen, uvm. Die zahlreichen Anwendungsbeispiele erleichtern es, die Relevanz von LEDs für das tägliche Leben im Unterricht hervorzuheben und darüber bereits vorhandene Interessen der Lernenden anzusprechen oder, wenn noch kein persönliches Interesse besteht, dieses zu wecken (KRAPP, 1992).

Inhaltlich werden im Physikunterricht, je nach Bundesland der Aufbau, die Funktionsweise und Eigenschaften von LEDs bereits in Sek. I behandelt. Dort sind den Lernenden aber keine quantenmechanischen Modelle wie das Bändermodell bekannt. Daher kommen in der Regel zunächst Analogien zur Veranschaulichung und später in Sek. II das Bändermodell zum Einsatz. Eine häufig eingesetzte Analogie zur Veranschaulichung der Leitungsvorgänge ist die Kinositzplatz-Analogie (WÖHRMANN & STÄUDEL, 1978). Löcher im Bändermodell entsprechen leeren Sitzplätzen in Kinoreihen. Die Löcherleitung wird beispielsweise damit veranschaulicht, dass sich in einer langen Sitzreihe ein leerer Platz befindet, der durch das Aufrücken von Personen wandert (BÄKER, 2014). Auch können Übergänge von Elektronen in höhere Energiezustände durch den Sitzplatzwechsel einer Person von einem günstigen auf einen teureren Kinoplatz veranschaulicht werden. Das quantenphysikalische Bändermodell kann in einer vereinfachten Form gegen Ende der Sek. I eingeführt werden. Gewöhnlich wird davor das Energiestufenschema behandelt. Das Bändermodell wird hier zunächst nur dazu genutzt, um die elektrische Leitfähigkeit von Festkörpern (Leiter, Halbleiter und Isolatoren) über die jeweiligen Bandstrukturen zu beschreiben (WINTER, 2012a). In der Sek. II können daran anknüpfend die Idee hinter der Entstehung der Energiebänder, die Potentialverläufe etc. erklärt werden. Das Verwenden von Analogien und Modellen kann grundlegende physikalische Denkprinzipien aufzeigen und zu einem besseren Verständnis der Schüler/innen von der Natur der Naturwissenschaften beitragen.

3 Vorversuch: Verschiedene Leuchtmittel im Vergleich

In einem ersten Schritt soll den Lernenden vor Augen geführt werden, dass es verschiedene Leuchtmittel gibt: Angefangen mit der klassischen Glühlampe (1), der Kompaktleuchtstofflampe (2), einer kaltweißen LED (3) und einer warmweißen LED (4) sind die Lernenden dazu angehalten, die Temperaturunterschiede, die Leistung, den persönlichen Eindruck des Lichts und die Energieeffizienzklasse genauer zu untersuchen (Abb. 5). Sofern in der Schule eine Wärmebildkamera vorhanden ist, kann die Temperatur der einzelnen Leuchtmittel auch eindrucksvoll hiermit untersucht und dargestellt werden (KLEEFELD & BOHRMANN-LINDE, 2019). Ziel dabei ist es, den technischen Fortschritt von der Glühbirne bis hin zur warmweißen LED zu erarbeiten und damit verbunden auch die deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades. Synthetisch hergestellte Leuchtstoffe sind dabei sowohl in der Kompaktleuchtstofflampe als auch in allen weißen LEDs notwendiger Bestandteil, und führen damit erneut die Entwicklungsleistung der Chemie vor Augen. Anhand der Abbildung 4 kann die Notwendigkeit des Leuchtstoffes am Beispiel einer weißen LED verdeutlicht werden.

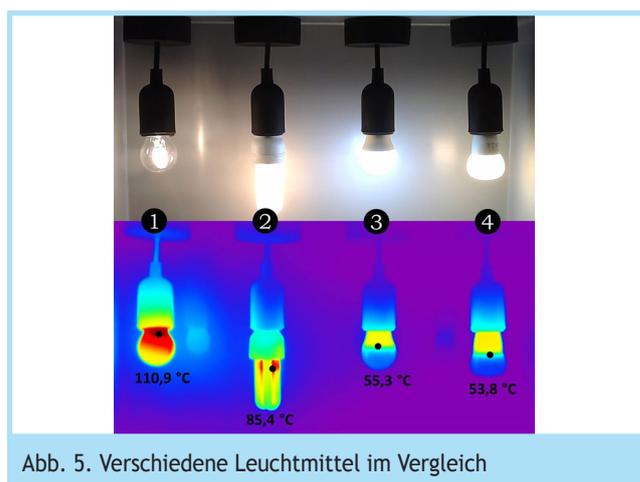


Abb. 5. Verschiedene Leuchtmittel im Vergleich

4 Das Experiment

Materialien: Einstufung der Chemikalien gemäß DEGINTU, Stand: 03.08.2020.



Aluminiumnitrat-Nonahydrat^{1,2} (Achtung), Cer(III)-nitrat-Hexahydrat^{2,3,4} (Gefahr), Yttrium(III)-nitrat-Hexahydrat¹ (Gefahr), Harnstoff, 25 mL Becherglas, Mikrowelle, Kristallisierschale, Porzellantiegel, Magnetrührer mit Thermometer, Rührfisch, 1 cm dicke Scheibe Gasbetonstein (oder Ähnliches als hitzefeste, mikrowellentaugliche Unterlage), Thermopapier (z. B. Kassenzettel-Papier oder Thermofaxpapier), UV-Taschenlampe, LED-Band (blau, $\lambda = 420\text{--}480\text{nm}$, z. B. V-TAC LED-Stripes, zu beziehen über Reichelt Elektronik), Mörser, Klebstoff (z. B. UHU-Alleskleber), Sand.

Alle Chemikalien können z. B. über Sigma-Aldrich bezogen werden.

Die Aufnahme des Versuches in DEGINTU wurde beantragt. Eine Gefährdungsbeurteilung ist über das Gefahrstoffinformationssystem für den naturwissenschaftlich-technischen Unterricht der Gesetzlichen Unfallversicherung unter der Nummer 2887 abrufbar, sobald die Freischaltung erfolgt.

4.1 Herstellung der Reaktionslösung



Abb. 6. Reaktionslösung auf dem Magnetrührer

Für die nachfolgende Synthese in der Mikrowelle wird eine Lösung hergestellt. Dazu werden in einem 25 mL Becherglas 0,81 g Yttrium(III)-nitrat-Hexahydrat, 3,46 g Aluminium-nitrat-Nonahydrat und 0,02 g Cer(III)-nitrat-Hexahydrat als Dotierungsmittel in 1 mL Wasser gelöst. Anschließend werden 2,20 g Harnstoff zur Lösung gegeben. Bei 60 °C wird so lange mittels Magnetrührer gerührt, bis eine klare, leicht viskose Lösung entsteht (siehe Abb. 6).

Dieser Prozess benötigt etwa zehn Minuten. Die Porzellantiegel können mit auf die Heizplatte gestellt werden, um sie vorzuwärmen.

4.2 Vorbereitung der Mikrowelle

Während die Reaktionslösung rührt, kann die Mikrowelle vorbereitet werden. Für die folgende Synthesereaktion eignet sich dabei jede handelsübliche Mikrowelle mit mindestens 500 W Leistung. Um größtmögliche Sicherheit zu gewährleisten, wird die Mikrowelle in einem Laborabzug betrieben. Da für die Synthese des Leuchtstoffes YAG:Ce hohe Temperaturen erforderlich sind, müssen vorab die heißesten Betriebspunkte („Hotspots“) der Mikrowelle gefunden werden: Im Innenraum interferieren an bestimmten Punkten die Wellen ($\lambda = 12$ cm). Diese Bereiche von hoher Intensität werden als „Hotspots“ bezeichnet (KAUFMANN & MENZEL, 2007). Zur Identifizierung der Hotspots auf dem Mikrowellenboden wird der Drehteller samt Gestell entfernt und die Schüler/innen erhalten eine passende



Abb. 7. Schwarze Flecken kennzeichnen Hotspots auf Thermopapier und Platzierung des Reaktionsgefäßes

Styroporplatte als Unterlage, Zellstofftücher und eine Spritzflasche mit Wasser. Das Zellstoffpapier wird auf der Styroporunterlage ausgebreitet, befeuchtet und Thermopapier darübergelegt. All dies wird in die Mikrowelle gegeben und diese für 5–10 s betätigt, bis deutliche schwarze Flecken zu erkennen sind. An diesen Punkten befinden sich die „Hotspots“, so dass dort das feuchte Zellstoffpapier besonders heiß wird. Das Thermopapier verfärbt sich schwarz (LÜHKEN, 2005). Genau an einem dieser Punkte wird die Unterlage, beispielsweise aus Gasbetonstein, positioniert und die mit wenig Sand gefüllte Kristallisierschale daraufgestellt (Abb. 7).

4.3 Durchführung der Synthese

Für den Prozess der Synthese werden von der zuvor vorbereiteten Lösung mit einer Pipette 0,75 mL entnommen und in den vorgewärmten Porzellantiegel gefüllt. Mit der Tiegelzange wird der Tiegel im Anschluss in die sandgefüllte Kristallisierschale gestellt, die Mikrowellentüre und die Abzugsscheibe werden geschlossen. Die Nutzung eines Netzschalters außerhalb des Abzuges ist ratsam, um die Mikrowelle auch bei geschlossenem Abzug an- und ausschalten zu können. Ist die Mikrowelle eingeschaltet, beginnt die Lösung im Reaktionstiegel nach einiger Zeit zu kochen. Dabei bilden sich Stickstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasser. Außerdem erreicht der Tiegel zügig sehr hohe Temperaturen. Das Ende der chemischen Reaktion ist gekennzeichnet von einem gelblich-grünen Aufleuchten (Abb. 8) des Tiegels.



Abb. 8. Aufleuchten des Tiegels zeigt erfolgreiche Synthese an

Sobald das Leuchten beendet ist, ist die Synthese durchgeführt. Die Synthese des Wirtsgitters verläuft dabei nach folgender Reaktionsgleichung (FU, 2006):



Nach Beendigung der Synthesereaktion wird die Mikrowellentüre geöffnet, sodass der Dampf im Laborabzug entweichen kann. Der sehr heiße Tiegel (nicht berühren!) kann mit einer Tiegelzange aus der Mikrowelle entnommen werden. Es empfiehlt sich zudem die Verwendung von Hitzehandschuhen. Im Tiegel kann die Bildung eines porösen, gelben Feststoffes beobachtet werden (Abb. 9).

4.4 Untersuchung des Reaktionsproduktes und „Self-made LED“

Beim entstandenen Feststoff handelt es sich um Cer-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat, kurz YAG:Ce. Dabei deutet der Doppelpunkt die Dotierung mit Cer an. YAG fungiert als Wirts-

gitter. Die Schüler/innen können den entstandenen Feststoff mit einer UV-Lampe oder einer handelsüblichen blauen LED erkennen. Es zeigt sich eine deutliche, gelbe Lumineszenz. Eine „Self-made“ weiße LED kann nun im Anschluss an die Synthese einfach produziert werden: Der entstandene Feststoff wird aus dem Tiegel geschabt und zu einem feinen Pulver gemörsert. Vermengt mit handelsüblichem Klebstoff (z.B.: UHU®-Alleskleber) bildet sich eine streichfähige Masse, die nun mit einem Spatel auf eine blaue LED aufgetragen wird. Dafür eignen sich alle LEDs ohne Streukörper. Kostengünstig sind LED-Bänder oder LED-Stripes, die abgeschnitten und mittels einer 9 V-Batterie in Betrieb genommen werden können. Nach dem dünnen Auftragen auf die LED können die farbkonvertierenden Eigenschaften sofort erkannt werden: das zuvor blaue Licht erscheint weiß (Abb. 10).



Abb. 9. Entstandener Feststoff im Tiegel und Feststoff pulverisiert

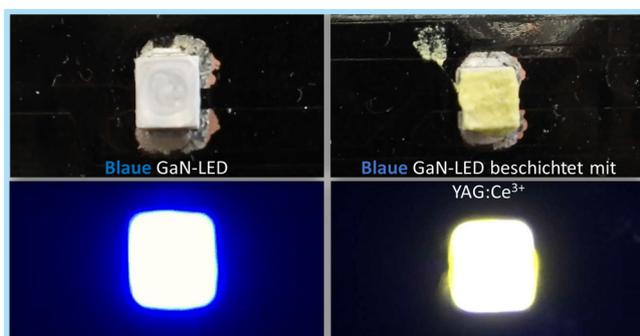


Abb. 10. Blaue LED vor und nach dem Auftragen des Leuchtstoffes

5 Fächerübergreifende Potentiale und unterrichtliche Anbindung

Zu unterscheiden sind die Begriffe fächerübergreifend, fächerverbindend und fachintegrativ (SOMMER, WAMBACH-LAICHER & PFEIFER, 2018, LABUDE & METZGER, 2019). Beim fächerübergreifenden Unterricht steht der Inhalt eines Faches im Vordergrund. Der Charakter der einzelnen Unterrichtsfächer bleibt gewahrt, die Aspekte anderer Fachdisziplinen bzw. hier die fächerübergreifende Zusammenarbeit, wird herausgestellt. Dem gegenüber steht fächerverbindender Unterricht, bei dem die Fächerstruktur aufgelöst wird. Fächerintegrativer Unterricht wird hingegen durch die Studententafel festgelegt. In Fächern wie „Naturwissenschaften“ oder „Natur und Technik“ werden in mehrere Fachrichtungen innerhalb eines Verbundfaches unterrichtet.

Wie sich anhand der einzelnen unterrichtlichen Anbindungen und anhand der Fragen im Online-Material (<https://watzka.h5p.com/content/129099093295531277>) zeigt, kann das Thema der weißen LEDs Fachgrenzen zwischen der Physik und der Chemie aufweichen und horizontal vernetzen.

5.1 Unterrichtliche Anbindung im Fach Chemie

„Licht“ wird in fachdidaktischer Literatur (TAUSCH, 2020) als „Schlüsselkonzept der Chemiedidaktik“ bezeichnet und ist in den Basiskonzepten der Chemie verortet. Auch lässt sich das Thema unter einer Vielzahl an Pflichtinhalten in den geltenden Lehr-/Bildungsplänen der Bundesländer anbinden, beispielsweise Farbstoffe, Elektrochemie (photogalvanische Zellen), chemische Reaktion (Licht als energetischer Antrieb für eine Reaktion). Im Fach Chemie bietet sich für den vorgestellten Versuch eine Einbettung insbesondere unter den Themen Oxidation und Reduktion an. Die auf dem beispielhaften Arbeitsblatt (s. Onlinematerial) aufgeführte Redoxgleichung ist fachlich anspruchsvoll, durch die gegebenen Hilfestellungen aber lösbar und erklärt die auf phänomenologischer Ebene beobachtete Synthese eines Feststoffes unter Gasentwicklung. Die Nitrate der einzelnen Seltenerdmetalle fungieren als Oxidationsmittel, der Harnstoff als Reduktionsmittel. Durch Absorption der Mikrowellenstrahlung, wird die nötige Aktivierungsenergie zugeführt. Das plötzliche Aufglühen der Lösung und die Bildung des porösen Feststoffes kennzeichnen das Ablaufen dieser chemischen Reaktion.

Auf den ersten Blick erscheint die Erklärung der submikroskopischen Vorgänge, also die Funktionsweise eines Leuchtstoffes unter Bezugnahme auf Energiediagramme kompliziert. An dieser Stelle lässt sich aber ein den Lernenden bereits bekanntes Prinzip analog auf den Leuchtstoff anwenden: Im Anfangsunterricht Chemie kommen die Lernenden in der Regel mit dem Phänomen der Flammenfärbung in Kontakt: Hier lernen die Schüler/innen, dass die Elektronen eines Atoms durch die thermische Anregung der Bunsenbrennerflamme auf ein höheres Energieniveau angehoben werden, um beim anschließenden Zurückfallen auf das ursprüngliche Energieniveau Licht einer bestimmten, charakteristischen Wellenlänge auszusenden (TAUSCH & WACHTENDONK, 2009). Klassisch werden hierfür Alkali- und Erdalkalimetallsalze verwendet, deren Ionenbindung bei Zufuhr der nötigen Bindungsdissoziationsenergie durch die Gasbrennerflamme homolytisch gespalten wird, sodass anschließend das Valenzelektron des Metallatoms angeregt werden kann (HAALAND, 1989). Bezug kann hier auch zum Term-schema im Physikunterricht genommen werden, das gegen Ende der Sek. I unterrichtet wird.

Wird dieses Prinzip auf den Leuchtstoff übertragen, kann die Funktion einfacher verstanden werden: Die LED emittiert Licht einer bestimmten Wellenlänge, durch das der Leuchtstoff photochemisch durch Absorption angeregt wird. Diese Energie wird zum Aktivator-Ion Ce^{3+} transferiert, durch dessen Anwesenheit viele zusätzliche Schwingungsniveaus entstanden sind, über die strahlungslose Relaxation erfolgen kann. Die auf diesen Niveaus emittierte Wärme ist nun der Grund für die unterschiedlichen Wellenlängen von absorbiertem blauem und dem

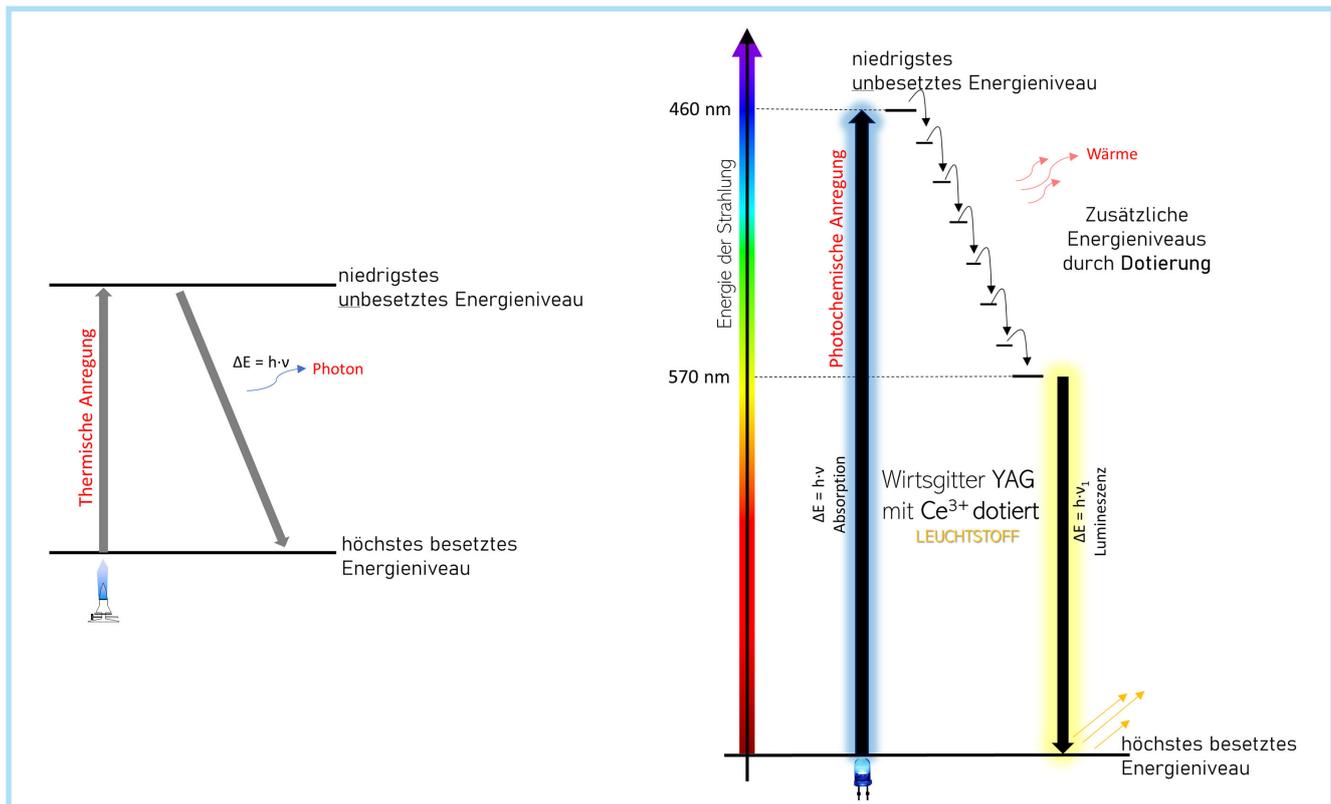


Abb. 11. Analogie zwischen Flammenfärbung und submikroskopischen Vorgängen im Leuchtstoff

emittierten gelbem Licht. Wie sich zeigt, ist das Prinzip zwischen Anregung, Relaxation und Emission analog (Abb. 11). Auch lässt sich auf diese Weise erneut die Notwendigkeit der Seltenerdmetall-Ionen in diesen chemischen Verbindungen erläutern: Ohne deren Anwesenheit zeigt sich bei $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ keine Lumineszenz und der Feststoff ist farblos. Die Begriffe Absorption und Emission lassen ebenfalls eine Anbindung im Bildungsplan an den Themenkomplex der Farbstoffe zu.

5.2 Unterrichtliche Anbindung im Fach Physik

Obwohl Halbleiter in Alltag und Technik omnipräsent sind, spielen sie im Physikunterricht aktuell eine eher untergeordnete Rolle. Dies zeigt sich bei der curricularen Verortung von Inhalten zu Halbleitertechnologien. In den Bildungsplänen der einzelnen Bundesländer sind Umfang und Inhalte zu Halbleitern sehr unterschiedlich ausgewiesen. Meist werden sie gegen Ende der Sek. I behandelt, oftmals aber nur in Wahl- bzw. Profildbereichen.

Werden Leuchtstoffe in LEDs in der Sek. II behandelt, bietet es sich an, das Vorwissen aus der Mittelstufe zu aktualisieren. Ausgangspunkt könnte der Aufbau einer LED sein, der mittels Schemazeichnungen veranschaulicht wird. Mögliche zentrale Sequenzen sind: (1) Struktur von n-dotierten und p-dotierten Halbleitern ohne gegenseitigen Kontakt, (2) Rekombination im p-n-Übergang im Moment des Kontakts von n- und p-dotierten Halbleitern, (3) Bildung einer Verarmungszone um die p-n-Grenzschicht mit der Entstehung des E-Felds und den verschiedenen Raumladungsdichten sowie (4) Vorgänge im p-n-Übergang bei Betrieb der LED in Durchlassrichtung. Jede

der genannten Sequenzen kann jeweils mit einer passenden Schemazeichnung zum Bändermodell erweitert werden, sodass die Vorgänge am p-n-Übergang auf der Grundlage eines Modells von den Lernenden erarbeitet werden kann.

Alternativ können auch bereits vorhandene Schemazeichnungen in interaktive Aufgaben implementiert werden. An dieser Stelle ist exemplarisch eine Aufgabe vorgestellt, zwei weitere sind unter den ergänzenden Online-Materialien zu diesem Beitrag zu finden (Abb. 12).

In einer Aufgabe betrachten die Schüler/innen speziell den p-n-Übergang mit einer in Durchlassrichtung angelegten Spannung. Dazu wird ihnen eine digitale Bildergalerie mit leeren Textfeldern präsentiert. Die Aufgabe der Lernenden lautet, die Vorgänge auf der Zeichnung in eigenen Worten zu beschreiben (<https://watzka.h5p.com/content/1290977869902824507>).

Neben den interaktiven Aufgaben kann auch ergänzend ein experimenteller Zugang zum Thema LEDs gewählt werden. Hier bietet sich eine arbeitsteilige Gruppenarbeit an. In den Gruppen werden verschiedene farbige LEDs (rot, gelb, grün, blau) betrieben und die

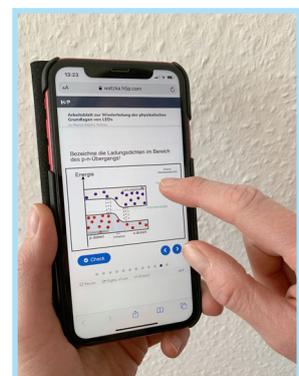


Abb. 12. Interaktive Aufgabe, bearbeitet auf einem Smartphone

Frage diskutiert, weshalb verschiedene Schwellspannungen für den Betrieb nötig sind. Dieses Vorgehen erleichtert den Lernenden, die zugeführte Energie der Spannungsquelle ($E = e \cdot U$) auf die freiwerdende Energie des ausgesandten Lichts ($E = h \cdot f$) zu beziehen. Die Ergebnisse können anschließend gemeinsam im Plenum mit dem Bändermodell erklärt werden. (Anmerkung: Falls das Experiment zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums mit LEDs im Unterricht durchgeführt wurde, kann natürlich anstelle des Schülerversuchs auch darauf verwiesen werden.)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Vorhandensein von energiesparender Beleuchtung durch LED in unser aller Alltag ist ein Ergebnis intensiver Forschung und der Zusammenarbeit verschiedener Wissenschaftszweige. Lernende, die tagtäglich LEDs benutzen, können erfahren, dass die Chemie und die Physik einen wesentlichen Anteil zu ihrem Alltag und zu einer nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft im Allgemeinen leisten. Wie sich in der Durchführung des Experiments im Schülerlabor immer wieder zeigte, waren sich viele Lernende über den Aufbau und die Funktionsweise von LEDs nicht bewusst. Der direkte Nachweis des Leuchtstoffes im Blitzlicht ihres Smartphones durch eine UV-Taschenlampe und die chemische Reaktion in der Mikrowelle sorgte dabei stets für interessierte Nachfragen.



Zu diesem Artikel finden Sie ein Arbeitsblatt in den Online-Ergänzungen.

Literatur

- BAGOLY-SIMÓ, P. (2014). Tracing Sustainability: Education for Sustainable Development in the Lower Secondary Geography Curricula of Germany, Romania, and Mexico. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 23(2), 126–141.
- BÄKER, M. (2014). *Funktionswerkstoffe. Physikalische Grundlagen und Prinzipien*. Springer Vieweg: Wiesbaden.
- BURMEISTER, M., JOKMIN, S. & EILKS, I. (2011). Bildung für nachhaltige Entwicklung und Green Chemistry im Chemieunterricht. *CHEMKON*, 18(3), 123–128.
- DEMTRÖDER, W. (2010). *Experimentalphysik*. Springer: Berlin.
- DIEKEMPER, D., SCHNICK, W. & SCHWARZER, S. (2019). Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 3018–3024.
- DOLLEN, P. VON, PIMPUTKAR, S. & SPECK, J. S. (2014). Let There Be Light-With Gallium Nitride: the 2014 Nobel Prize in Physics. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53(51), 13978–13980.
- ELSTER, D. (2007). In welchen Kontexten sind naturwissenschaftliche Inhalte für Jugendliche interessant. *Plus Lucis*, 3(2007), 2–8.
- FRONDEL, M. & LOHMANN, S. (2011). The European Commission's Light Bulb Decree: Another Costly Regulation? *Energy Policy*, 39(6), 3177–3181.
- FU, Y.-P. (2006). Preparation of Y3Al5O12:Ce Powders by Microwave-Induced Combustion Process and their Luminescent Properties. *J. Alloys Compd.*, 414(1-2), 181–185.
- GUDJONS, H. & TRAUB, S. (2016). *Pädagogisches Grundwissen. Überblick – Kompendium – Studienbuch*. Verlag Julius Klinkhardt: Bad Heilbrunn.
- HAUFF, V. (1987). *Unsere gemeinsame Zukunft*. Eggenkamp Verlag: Greven.
- HÖPPE, H. A. (2009). Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der anorganischen Leuchtstoffe. *Angewandte Chemie*, 121(20), 3626–3636.
- HRIN, T. N., MILENKOVIĆ, D. D., SEGEDINAC, M. D. & HORVAT, S. (2017). Systems Thinking in Chemistry Classroom: The Influence of Systemic Synthesis Questions on its Development and Assessment. *Think. Skills and Creativity*, 23, 175–187.
- JANIAK, C., GUDAT, D. & KURZ, P. (2018). *Moderne anorganische Chemie*. De Gruyter: Berlin, Boston.
- JÜSTEL, T. & SCHWUNG, S. (2019). *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz*. Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg.
- KAUFMANN, I. & MENZEL, P. (2007). Chemie mit Mikrowelle. Neue Möglichkeiten und Wege. *Praxis der Naturwissenschaft – Chemie in der Schule*, 2007(2), 31–34.
- KLEEFELD, S. & BOHRMANN-LINDE, C. (2019). Die Wärmebildkamera im Naturwissenschaftlichen Unterricht. *MNU*, (72), 209–216.
- KRAPP, A. (1992). Das Interessenkonstrukt. Bestimmungsmerkmale der Interessenhandlung und des individuellen Interesses aus der Sicht einer Person-Gegenstands-Konzeption. *Interesse, Lernen, Leistung*, 297–329.
- LABUDDE, P. & METZGER, S. (2019). *Fachdidaktik Naturwissenschaft*. 1.–9. Schuljahr. Haupt Verlag: Bern.
- LÜHKEN, A. (2005). *Ultraschall und Mikrowellenstrahlung im Chemieunterricht (Dissertation)*. Frankfurt am Main.

MAHAFFY, P. G., KRIEF, A., HOPF, H., MEHTA, G. & MATLIN, S. A. (2018). Reorienting Chemistry Education through Systems Thinking. *Nature Reviews Chemistry*, 2, 1–3.

MUELLER-MACH, R., MUELLER, G., KRAMES, M. R., HÖPPE, H. A., STADLER, F., SCHNICK, W., JUESTEL, T. & SCHMIDT, P. (2005). Highly Efficient All-Nitride Phosphor-Converted White Light Emitting Diode. *Phys. Status Solidi (a)*, 202(9), 1727–1732.

PRENZEL, M. & ALLOLIO-NÄCKE, L. (Hg.) (2006). *Untersuchungen zur Bildungsqualität von Schule. Abschlussbericht des DFG-Schwerpunktprogramms*. Waxmann: Münster.

SCHMIECHEN, S., PUST, P., SCHMIDT, P. J. & SCHNICK, W. (2014). Weißes Licht aus Nitriden. *Nachrichten aus der Chemie*, 62(9), 847–851.

SOMMER, K., WAMBACH-LAICHER, J. & PFEIFER, P. (Hg.) (2018). *Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht*. Friedrich Aulis: Seelze.

TAUSCH, M. (2020). *Chemie mit Licht*. Springer Berlin; Springer Spektrum: Berlin.

TIPLER, P.A., MOSCA, G. & KERSTEN, P. (2019). *Physik. Für Studierende der Naturwissenschaften und Technik*.

WEßNIGK, S. & EULER, M. (2014). Wie die Produktion von Eierlöffeln das Image von Chemie und Physik verändern kann. *CHEMKON*, 21(3), 123–128.

WÖHRMANN, H. & STÄUDEL, L. (1978). Die metallische Bindung – Das Bändermodell im Unterricht der Sekundarstufe I. *Naturwissenschaften im Unterricht Physik/Chemie*, 26, 275–279.

XIA, Z. & MEIJERINK, A. (2017). Ce³⁺-Doped Garnet Phosphors: Composition Modification, Luminescence Properties and Applications. *Chem. Soc. Rev.*, 46(1), 275–299.

ZIMMERMANN, F. M. (2018). Nachhaltigkeit – eine Frage der Perspektive. *Geographische Rundschau*, (10), 4–9.

DOMINIK DIEKEMPER, Dominik.Diekemper@uni-tuebingen.de, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Chemiedidaktik an der Eberhard Karls Universität Tübingen. Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung neuartiger Experimente zu modernen Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit für Schule und Schülerlabor.

BIANCA WATZKA, Bianca.Watzka@lmu.de, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Physikdidaktik an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Forschungsschwerpunkte sind die Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Unterrichtsansätze und interaktiver Lernaufgaben.

STEFAN SCHWARZER, Stefan.Schwarzer@uni-tuebingen.de, ist Professor für Chemiedidaktik an der Eberhard Karls Universität Tübingen. Schwerpunkte seiner Arbeit sind die didaktische Rekonstruktion aktueller Forschungserkenntnisse aus der Chemie und Lernwirksamkeitsuntersuchungen der entwickelten Materialien. ■



5.4 From Agricultural Waste to a Powerful Antioxidant: Hydroxytyrosol as a Sustainable Model Substance for Understanding Antioxidant Capacity

Dominik Diekemper, Benjamin Pölloth, and Stefan Schwarzer

J. Chem. Educ. 2021, Article ASAP– Published by American Chemical Society and Division of Chemical Education Inc.

DOI: 10.1021/acs.jchemed.1c00157

Author contributions:

The project was conceived by Dominik Diekemper and Stefan Schwarzer. Experimental studies were performed by Dominik Diekemper, Analytics and scientific advice by Benjamin Pölloth. The manuscript was jointly written by Dominik Diekemper and Benjamin Pölloth.

Copyright:

Reprinted with permission from *The Journal of Chemical Education*, 2021. Copyright 2021 American Chemical Society.

From Agricultural Waste to a Powerful Antioxidant: Hydroxytyrosol as a Sustainable Model Substance for Understanding Antioxidant Capacity

Dominik Diekemper, Benjamin Pölloth, and Stefan Schwarzer*



Cite This: <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00157>



Read Online

ACCESS |



Metrics & More



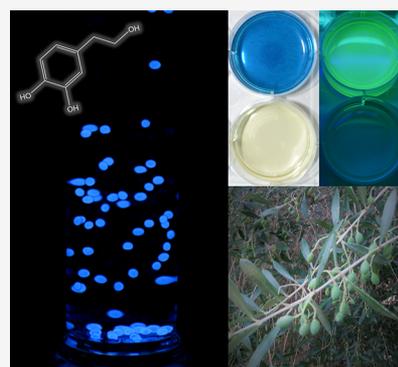
Article Recommendations



Supporting Information

ABSTRACT: Students encounter antioxidants in many areas of their daily life. Antioxidants play a crucial role in cosmetics, in nutritional or dietary supplements, as additives for the preservation of food, and as a natural component in fruit and vegetables. Accordingly, antioxidants are believed to promote health through the prevention of oxidative stress by scavenging free radicals. The underlying oxidation and reduction processes of antioxidants are a central topic of chemistry classes. Additionally, antioxidants can be linked to aspects of sustainability. In this paper, the model substance chosen to demonstrate these aspects of antioxidants is hydroxytyrosol. Hydroxytyrosol is a natural, highly effective antioxidant, which is produced, for example, in olive trees and can be found in high concentrations in olive mill wastewater, which is potentially hazardous to the environment. In the first experiment, WELL-plate experiments are used to show the principal properties of antioxidants, both as reducing agents and radical scavengers, for the example of hydroxytyrosol. The experiments are based on the oxygen radical absorbance capacity (ORAC) test, which is widely applied in the food industry. In a second experiment, the properties of antioxidants are demonstrated using alginate balls as reaction vessels to produce a luminous bubble tea. Furthermore, the school-student-friendly extraction of hydroxytyrosol is presented.

KEYWORDS: High School/Introductory Chemistry, Curriculum, Demonstrations, Laboratory Instruction, Environmental Chemistry, Green Chemistry, Phenols, Oxidation/Reduction, Nutrition



INTRODUCTION

Due to buzzwords such as “oxidative stress”, “functional food”, and “superfood”, and an increasing awareness of the importance of a healthy diet, school students are confronted with the term “antioxidant” more and more in their daily lives. Trends in nutrition such as “naturally functional” and “sustainable” nutrition further underline the great importance of healthy eating. These trends can be used as a motivational context to explain the chemical background of antioxidants to students within the framework of redox processes. The subject of antioxidants has been addressed several times in different contexts of chemical education in past years, also with reference to olive oil.^{1–3}

Thereby, hydroxytyrosol (4-(2-hydroxyethyl)-1,2-benzenediol), HTyr) could serve as a new, appropriate model substance to demonstrate the group of antioxidants in teaching units on the chemical properties of antioxidants in school chemistry. HTyr not only has a reference to everyday life, which can be motivating for students' learning, but also makes possible discussions of aspects of sustainability and popular scientific myths through the explicit discussion of scientific statements in advertisements.

HYDROXYTYROSOL, OLIVE OIL PRODUCTION, AND SUSTAINABILITY

HTyr is a very potent phenolic compound that can be obtained from olive trees, and it is also a byproduct of the manufacture of olive oil.⁴ The typical climate of the Mediterranean basin, characterized by warm weather, dryness, and enduring sunlight irradiation, has allowed the development of endemic plants such as olive trees, which produce a high proportion of antioxidant molecules.⁵ A very prominent representative of such an antioxidant is HTyr, which can be found in large quantities in the leaves and fruit of olive trees (*Olea europaea*). Worldwide, 1.8×10^6 tons of olive oil are produced every year; the majority is produced in the Mediterranean region, especially in Spain, Greece, and Italy.⁶

For extraction, only mechanical methods such as crushing and malaxation of the resulting paste are used in order to

Received: February 18, 2021

Revised: June 1, 2021

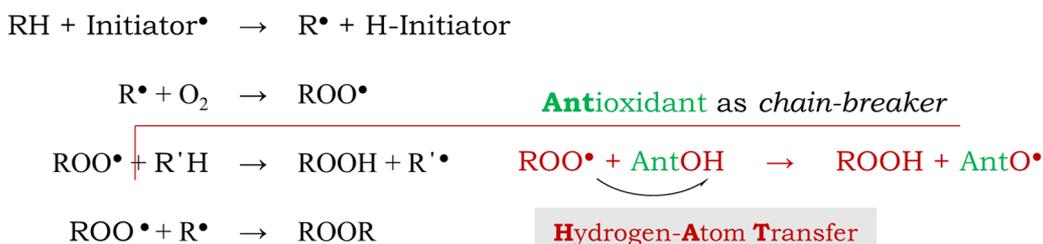


Figure 1. Antioxidants as “chain-breakers” in autoxidation processes, for example, in lipids.

maintain the natural organoleptic quality of the fruit. For the oil extraction phase, different processes are used.⁷ Regardless of the process chosen, the oil extraction produces a large number of byproducts that have a high pollution potential for the environment because of the high content of phenols and polyphenols. At the end of each process, the main products remain: olive oil and olive mill wastewater (OMWW). OMWW is the main waste from the three-phase extraction processes, and the production of olive oil is estimated to yield about $10\text{--}30 \times 10^6$ cubic meters of OMWW per year.⁷ Especially in the Mediterranean region, its highly polluting organic load and high resistance to biodegradation lead to several environmental and ecological problems.⁸ The extent of the ecological problem was discussed in detail in an EU project conducted in 2009 called “Strategies to improve and protect soil quality from the disposal of olive mills’ wastes in the Mediterranean region” (PROSODOL).⁹ Besides organic substances such as sugar, pectin, and fats, and inorganic substances such as potassium, magnesium, calcium, and phosphorus, OMWW contains high concentrations of phenols and polyphenols. The high content of antioxidant compounds¹⁰ makes OMWW highly resistant to biodegradation.⁷ Due to the increasing costs of waste disposal and emerging ecological issues such as soil contamination or the inhibition of plants’ growth, this wastewater has become a focus of current research. As outlined above, there is a growing interest in novel sources of natural antioxidants. Thus, instead of being seen as an environmental toxin, OMWW could be seen as a source of the antioxidants that are important additives in food, cosmetics, or measures taken to combat human disease. One of the main products in this context is HTyr. These outlined aspects make HTyr an excellent model substance for chemistry classes within the context of education for sustainable development (ESD).

As ESD plays an important role in the UN’s Sustainable Development Goals (SDGs),¹¹ every educational domain and subject should contribute to ESD. However, chemistry and chemical research are particularly relevant in working toward global sustainable development, for example, by developing novel and modern materials (e.g., phosphors for energy-efficient LEDs¹²). Therefore, chemistry education plays a central role in fostering ESD.^{13,14} Highlighting the role of chemistry in environmental and sustainability issues can also promote a positive perspective on chemistry learning and on chemistry itself.¹⁵ Thus, the example of HTyr makes it possible not only to discuss the chemical concept of antioxidants but also to underline the links among geography, food technology, the environment, food manufacturing, and sustainable development. This in turn makes it possible to discuss different aspects of a real-world situation in chemistry class.¹⁶ Further aspects of ESD can be discussed by referring to the principles of green chemistry: The use of OMWW could minimize negative

environmental aspects and could prevent the production of waste in olive oil production.¹⁷

■ USE OF HYDROXYTYROSOL AS AN ANTIOXIDANT

A further interesting aspect of HTyr that could be readily discussed is its use as a food supplement. While the role of HTyr and antioxidants is generally described as life-prolonging in advertisements and media, the scientific base for these hypotheses is complex. On one hand, several studies have implied that HTyr has cardioprotective, anti-inflammatory, and even anticarcinogenic effects.^{18–20} Due to its antioxidative properties, it has been reported to protect against low-density lipoprotein (LDL) oxidation,²¹ as well as to have a preventive function against type 2 diabetes.²² However, on the other hand, recent studies did not find antioxidants to have any effects on the lifespan.^{23–25} In contrast, it was even shown that too high concentration of antioxidants such as α -tocopherol or β -carotene can be harmful, while an appropriate number of free radicals was found to be beneficial for living processes.^{26,27} The use of HTyr in education thus makes it possible to discuss the interconnection of scientific discourse, popular science, and economics with the example of the multibillion USD market of antioxidants as food supplements. The widely spread but scientifically controversial theory that free radicals are the main reason for aging and for many diseases could also be critically discussed, while also using easily comprehensible scientific papers in high-end scientific journals.²⁵

■ CHEMISTRY OF ANTIOXIDANTS

In general, antioxidants are molecules that slow down or prevent the oxidation of another molecule.²⁸ Well-known and naturally occurring antioxidants are ascorbic acid (vitamin C), tocopherols (vitamin E), carotenoids, and the group of polyphenols. Other artificial antioxidants that are used in food and cosmetics are butylated hydroxytoluene (BHT) and butylated hydroxyanisole (BHA).²⁹ In popular literature, but also in several scientific publications, the terms antioxidants and radical scavengers are often used synonymously. To avoid confusion, these two terms should be clearly distinguished for educational purposes. From a chemical point of view, not every oxidation process is a free-radical reaction. However, many oxidation processes, especially those under physiological conditions²⁷ or those with the diradical oxygen, are likely to involve free radicals. In food products, especially in fats, autoxidation is an important mechanism (Figure 1) that leads to the spoilage of food. Autoxidation reactions are subdivided into initiation, propagation, and termination reactions. Only recently, it was shown that technically important autoxidation reactions can also be induced in the absence of a radical initiator by molecule-induced radical formation pathways.^{30,31}

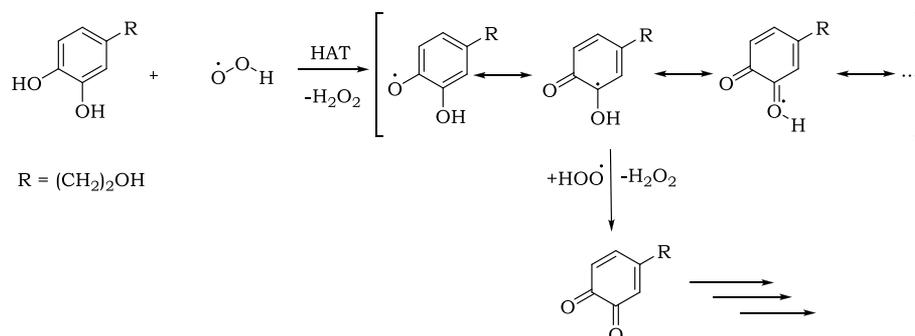


Figure 2. HAT reaction of HTyr as a free-radical scavenger with the hydroperoxyl radical.



Figure 3. Preparation of the olive solution for the experiments with the Soxhlet extractor and with simple infusion.

The most potent antioxidants are thus capable of scavenging free radicals and are oxidized themselves during this process. Olive phenols, such as HTyr, have been found to mainly scavenge radicals by hydrogen-atom-transfer (HAT).³² In this mechanism, a hydrogen atom (proton and electron) is transferred to a free-radical species (such as superoxide-anion, hydroxyl radicals, or peroxy radicals). Radical scavengers are thus characterized by their ability to form relatively stable radicals. The radical product of HTyr is resonance-stabilized due to conjugation (Figure 2).²⁸ Furthermore, a hydrogen bond between the radical electron and the ortho-standing hydroxyl group has an additional stabilizing effect.³³ Due to these effects, the reaction of radical scavengers with free radicals is energetically favorable compared to the unwanted reactions of free radicals such as, for example, autoxidation or reactions with lipids. The produced HTyr radical is thermodynamically stabilized and, thus, is unlikely to propagate further radical chains.²⁸ In contrast, it can

recombine with another free radical to yield a metastable diketone. (Note: Recent research indicates that the reaction could also proceed by a concerted double proton-transfer electron-transfer rather than by a double HAT.³⁴ However, for educational processes, the HAT reaction seems to be more easily comprehensible.) In radical chain reactions, antioxidants can thus “break the chain” and end the process. It is this property that has given antioxidants the name “chain-breaking antioxidants”³⁵ or “antagonists of autoxidation”.³⁶

To quantify the antioxidative capacity and to compare antioxidants, several antioxidant capacity assays have been developed in the food industry. The ORAC value is particularly well-known for its “health claim” on foods and food supplements. The principle of the measurement is based on the reaction of the radical generator AAPH (2,2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride) with fluorescein. The generated radicals oxidize the fluorescein, which inhibits the fluorescence of the fluorophore. This reaction is suppressed or

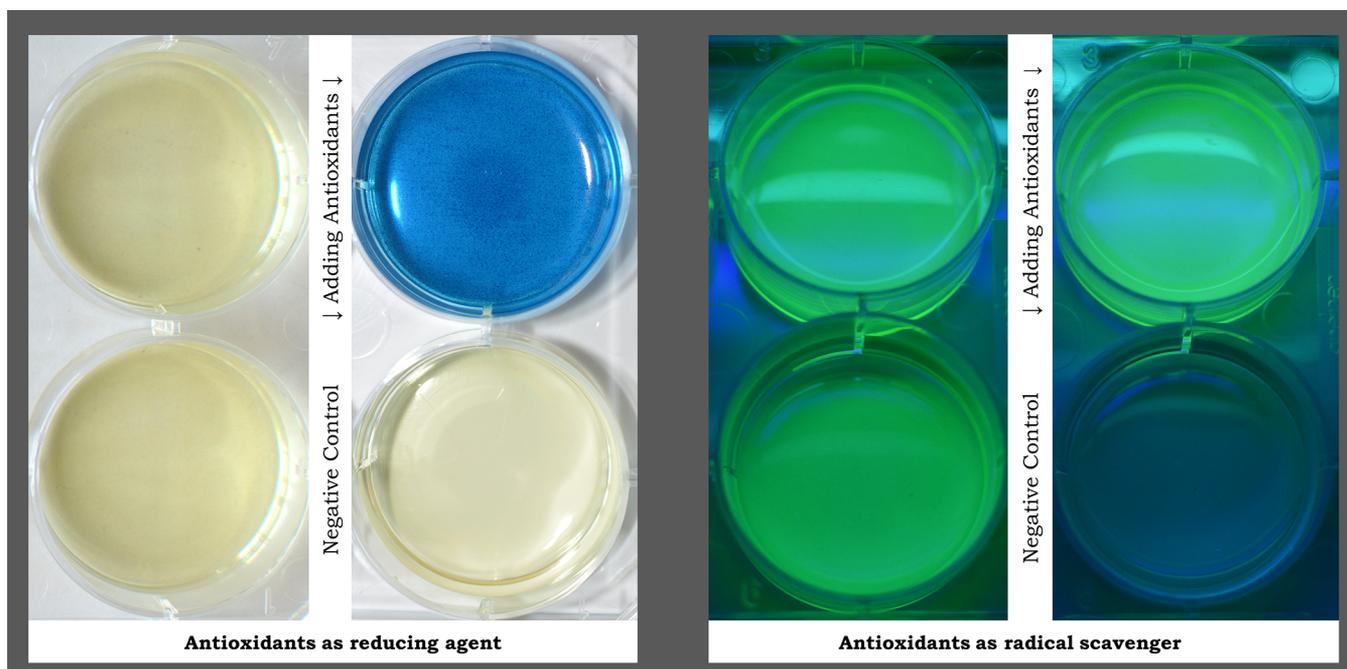


Figure 4. Experimental results of the experiment in the WELL-plate.

slowed down if an antioxidant is present. The generated radicals react first with the antioxidant and not with the fluorescein.³⁵ The delay of fluorescence quenching then indicates the antioxidative capacity.

Other antioxidant capacity assays, such as, for example, the TRAP (total radical-trapping antioxidant parameter),³⁷ TEAC (trolox equivalent antioxidant capacity),^{38,39} or FRAP (ferric reducing ability of plasma)⁴⁰ assay, are based on complex and expensive analytics. The version of the ORAC assay developed in this study can be used with minimal equipment even in high schools.

■ HYDROXYTYROSOL AS A MODEL SUBSTANCE

As outlined above, HTyr can be easily used to explain the chemical background of antioxidants. The manufacturing as well as the handling of the simple and inexpensive substance is suitable for experiments for school students. The capability of HTyr to scavenge free radicals can be easily explained by its structural properties, such as its vicinal hydroxyl groups. Furthermore, the accompanying reducing properties can be readily demonstrated. The combination of these two properties, the structural simplicity of the molecule, and its use in daily life products make HTyr a suitable substance for the discussion of the chemistry of antioxidants in education. The basic principles of antioxidants can be introduced for the model substance HTyr and can subsequently be transferred to other substances such as vitamin C or vitamin E. Commercially, HTyr is currently found particularly in cosmetics and in several food supplements. However, due to the cost-intensive extraction process, chemically pure HTyr is too expensive for a school experiment. Thus, two methods are presented with which the starting substance can be very easily and inexpensively obtained for the following experiments in schools.

Soxhlet Extraction and Infusion

To produce an extract containing HTyr, 5 g of fresh olive leaves (*Olea europaea*) are shredded with scissors and placed in

a Soxhlet tube. The extraction thimble is placed in the extraction space of the Soxhlet extractor. A 50 mL portion of distilled water is used as the solvent. The Soxhlet extractor is operated for about 6 h. A pale, dark green extract is generated. Alternatively, HTyr can be obtained even more simply through infusion. For this purpose, 5 g of leaves from an olive tree are shredded with scissors and put into a tea filter, and 600 mL of boiling water is poured over them. The mixture is left to cool and extract overnight (Figure 3).⁴¹ A high-performance liquid chromatography (HPLC) analysis revealed that both extracts contained approximately 4–8 mg/L HTyr (for details and spectra, see the Supporting Information). The identity of HTyr was confirmed by comparison with a commercial reference sample and by gas chromatography with mass spectrometry (GC–MS). Most likely, the extract also contains other organic antioxidants (e.g., tyrosol). Nonetheless, control experiments with a solution containing 4 mg/L commercial HTyr confirmed that the extracted amount of HTyr alone is already sufficient as an antioxidant for a visible effect in the described experiments.

■ EXPERIMENT 1: INVESTIGATING THE PRINCIPAL PROPERTIES OF ANTIOXIDANTS

Media and food packaging make a multitude of promises concerning the effects of antioxidants. The terms antioxidant and radical scavenger are thereby often used synonymously, as described above. For this reason, in this simple experiment series, the two properties are presented using visible, simple reactions to help students to gain an understanding of the chemical abilities of antioxidants. On one hand, a general antioxidant effect is demonstrated, which is related to the reduction ability of the substances. On the other hand, their function as radical scavengers is shown with a version of the above-presented ORAC assay.

Materials

The necessary materials include the following: 6-WELL cell culture plate, UV lamp or flashlight, iron(III) chloride solution

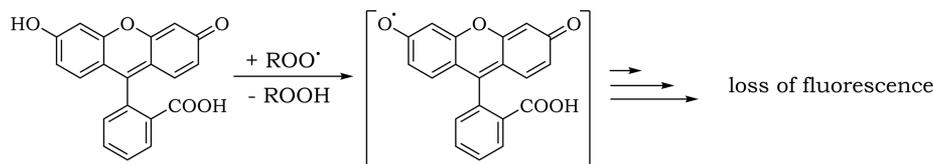


Figure 5. Fluorescein's loss of fluorescence in ORAC reaction (HAT mechanism).³⁵

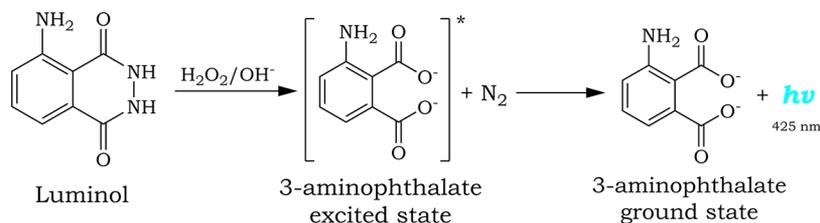


Figure 6. Luminol reaction.

($w = 0.5\%$), potassium ferricyanide solution ($w = 0.5\%$), uranine solution (fluorescein disodium salt, $w = 0.0015\%$), hydrogen peroxide (3%), and antioxidant solution.

Experimental Procedure

A 2 mL portion of the FeCl_3 solution and 2 mL of the $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ solution are placed in two chambers of the WELL-plate. A drop of the prepared antioxidant solution is added to one of the two chambers. In another pair of wells, 4 mL of uranine solution and 0.5 mL of hydrogen peroxide are mixed in each of the two wells. One drop of the antioxidant solution is added to one well. The reaction is observed under UV excitation with a UV lamp or a simple UV flashlight (Figure 4).

Results and Discussion

When the antioxidant is added to the mixture of iron solutions, a blue solid complex, $\text{K}[\text{Fe}^{\text{II}}\text{Fe}^{\text{III}}(\text{CN})_6]$ (Prussian blue), precipitates, which is a common detection method for Fe^{2+} ions. Accordingly, some of the Fe^{3+} ions are reduced to Fe^{2+} by the polyphenols in the solution. Thus, the reducing capability of the polyphenols is tested.

The function of antioxidants as free-radical scavengers is demonstrated by quenching the fluorescence of fluorescein, as it is also done in the ORAC value test. Due to the homolytic decomposition of the hydrogen peroxide under UV radiation, two hydroxyl radicals are formed, which further form peroxide radicals by reacting with oxygen.

Fluorescein loses its ability to fluoresce due to the radical attack (see Figure 5). In the presence of an antioxidant, this mechanism is prevented, the peroxide radical is intercepted by the antioxidant (HAT mechanism, see Figure 2), and the fluorescence is retained for a certain time. Only if all the antioxidants are consumed through this mechanism fluorescein starts to decompose. A student worksheet can be found in the Supporting Information (Supporting Information).

For a further discussion, it may be important to be aware of the fact that the two properties of HTyr depend on each other: While the reduction of Fe^{3+} may include free radicals (Fenton's reaction), the radical reactions of fluorescein and HTyr are formally oxidations. Thus, the separate demonstration of both properties allows a discussion of the aspect that these two categories are neither exclusive nor identical.

EXPERIMENT 2: LUMINOUS BUBBLE TEA

Bubble tea, which became particularly popular in the 2010s, uses alginate balls as "bubbles". These alginate balls have already been employed for demonstration purposes in various contexts of chemistry education.⁴² In the experiment presented here, the classic luminol reaction (see Figure 6) is combined with the protective effect of the antioxidants. It is shown that antioxidants themselves oxidized during protection; they are consumed. Depending on the concentration of the antioxidant, another substance can be protected against oxidative influences for a different length of time. This can be clearly demonstrated using different concentrations and a different duration of the lighting reaction.

Materials

Ammonium chloride, sodium carbonate, luminol, hydrogen peroxide ($w = 10\%$), copper sulfate solution ($c(\text{CuSO}_4) = 1 \text{ mol/L}$), sodium alginate, calcium chloride, glucose, magnetic hot plate stirrer, three 100 mL beakers, 250 mL beaker, a spatula, micro spoon, pipets, sieve, plain cylinder or test tube, Erlenmeyer flask, and antioxidant solution.

Experimental Procedure

For the preparation of the bubble tea solution, 10 drops of the copper sulfate solution are diluted with 25 mL of distilled water in a small Erlenmeyer flask. In a 100 mL beaker, 0.25 g of ammonium chloride, 0.1 g of sodium carbonate, and a spatula tip of luminol are dissolved in 25 mL of water while being stirred on the magnetic hot plate stirrer. A 1 mL portion of the prepared copper sulfate solution is added. Then, 5 g of glucose and 0.5 g of sodium alginate are added to the solution. After the solution has been stirred and has swelled for about 5 min, any lumps are removed.

For the preparation of the bubbles, 0.75 g of calcium chloride is dissolved in 50 mL of distilled water, and the bubble tea solution is dropped with a pipet. Small balls are formed in both solutions, which can be removed with a sieve. The procedure is repeated using a separate beaker with a solution of 0.75 g of calcium chloride dissolved in 50 mL of the already prepared antioxidant solution.

For the demonstration of the glowing bubbles, a plain cylinder is filled with hydrogen peroxide (10%). The balls are consecutively added to the solution with a micro spoon.

Results and Discussion

Immediately, the balls without the antioxidant begin to glow in the hydrogen peroxide solution (see Figure 7). The balls that

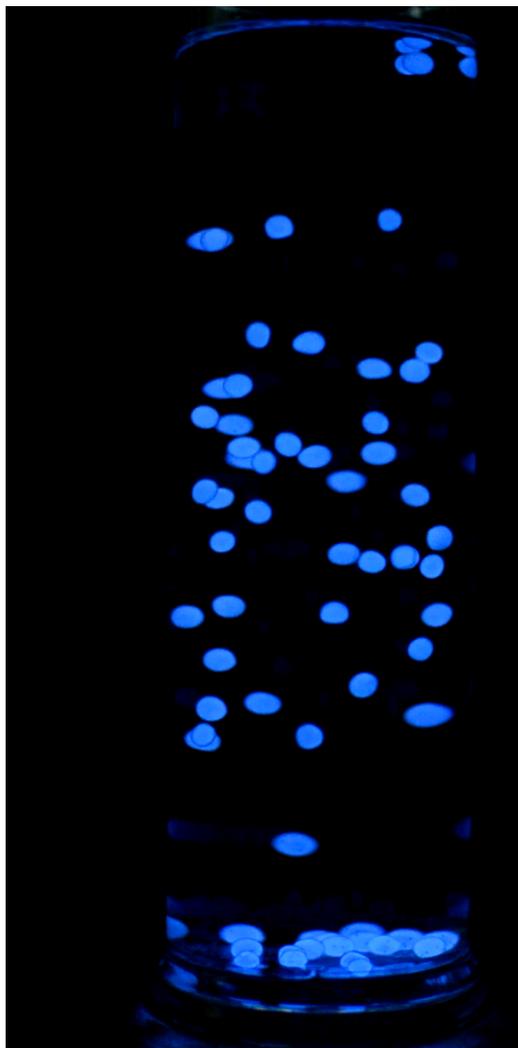


Figure 7. Luminous luminol bubbles in the dark.

have been treated with the antioxidant solution first sink to the bottom and only light up with a delay of several seconds. As soon as all the antioxidant is consumed, they start to glow and to rise due to the formation of N_2 in the vessel. The observed delay indicates how long antioxidants protect the luminol against oxidation, that is, until they are fully consumed themselves. Because the density of the balls was set precisely by means of the added glucose, the balls first sink to the bottom and then rise again due to the formation of N_2 in the luminol reaction. This ensures a dynamic and impressive movement in the solution (for a video, see the [Supporting Information](#)). By varying the amount of antioxidant used, different delays can be observed. This demonstrates the different antioxidative capacities.

HAZARDS

For safety reasons, safety goggles and a laboratory coat should be worn at all times during the experimental procedure. Contact between the chemical substances and skin must be strictly avoided.

Experiment 1

UV light excitation is harmful to the retina, so anti-UV coated goggles should be worn for safety reasons. Leftover product solutions of iron(III) should be transferred into a container designated for metal salts.

Experiment 2

Hydrogen peroxide should be considered corrosive and should not be exposed to acidic solutions that contain oxidizable solvents such as acetone. Leftover solutions of NH_4Cl , Na_2CO_3 , $CaCl_2$, and $CuSO_4$ should be transferred into a container designated for metal salts. Leftover hydrogen peroxide solution should be diluted and then disposed of in a sink.

DISCUSSION

If the connection to the sustainable substance Htyr is not desired, other antioxidants can be used. However, it should be noted here that, for example, the pH value can influence the course of the reaction when ascorbic acid is used. If necessary, the pH value must be set to a neutral level with a buffer.

CONCLUSION AND OUTLOOK

In this paper, we describe two newly developed experiments that are suitable for school students. By conducting these experiments, the chemical properties of antioxidants can be discussed with the students in detail. The experiments make it possible to clearly demonstrate that antioxidants are oxidized themselves while protecting other substances. Furthermore, the experiments underline the chemical roles of antioxidants as reducing agents and radical scavengers. As the subject of antioxidants and functional food is likely to be further promoted in media and advertisements, this class of substances remains part of the everyday world of the students. Especially due to recent scientific discussions regarding the health-promoting effect of antioxidants,²⁵ a basic understanding of the chemical background of antioxidants, their abilities, and their limits could promote students' critical evaluation skills. The antioxidant hydroxytyrosol will continue to be the subject of specialist research due to the large amounts that are released during the production of olive oil and that are hazardous to the environment. This example illustrates the importance of chemistry education and knowledge in the evaluation of local and global systems with regard to sustainable development.⁴³ Thus, the combination of hydroxytyrosol with the school-relevant topic of redox processes, antioxidants, and radical scavengers demonstrates the relevance of chemical contents for a sustainable living environment for the students.

ASSOCIATED CONTENT

Supporting Information

The Supporting Information is available at <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.1c00157>.

Spectroscopy details and student worksheet (PDF, DOCX)

Video of experiment 2 (MP4)

AUTHOR INFORMATION

Corresponding Author

Stefan Schwarzer – Department of Chemistry Education, Eberhard Karls Universität Tübingen, 72076 Tübingen,

Germany; orcid.org/0000-0002-4134-5684;
Email: Stefan.schwarzer@uni-tuebingen.de

Authors

Dominik Diekemper – Department of Chemistry Education,
Eberhard Karls Universität Tübingen, 72076 Tübingen,
Germany; orcid.org/0000-0003-0916-475X

Benjamin Pölloth – Department of Chemistry Education,
Eberhard Karls Universität Tübingen, 72076 Tübingen,
Germany; orcid.org/0000-0001-7777-9903

Complete contact information is available at:
<https://pubs.acs.org/10.1021/acs.jchemeduc.1c00157>

Notes

The authors declare no competing financial interest.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank all the participating students who carried out the experiment during the developmental process for their precious feedback, Andreas Steiger who dealt with this topic in his thesis, student research assistant Lena Baumgartner, and chemical-technical assistant Gudrun Baltjan.

REFERENCES

- (1) Donnelly, T. H. The Origins of the Use of Antioxidants in Foods. *J. Chem. Educ.* **1996**, *73* (2), 158.
- (2) Coleman, W. F. Molecular Models of Antioxidants and Radicals. *J. Chem. Educ.* **2008**, *85* (3), 464.
- (3) Blatchly, R. A.; Delen, Z.; O'Hara, P. B. Making Sense of Olive Oil: Simple Experiments to Connect Sensory Observations with the Underlying Chemistry. *J. Chem. Educ.* **2014**, *91* (10), 1623–1630.
- (4) Martínez, L.; Ros, G.; Nieto, G. Hydroxytyrosol: Health Benefits and Use as Functional Ingredient in Meat. *Medicines* **2018**, *5* (1), 13.
- (5) Visioli, F.; Bellomo, G.; Galli, C. Free Radical-Scavenging Properties of Olive Oil Polyphenols. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **1998**, *247* (1), 60–64.
- (6) Haddad, K.; Jeguirim, M.; Jerbi, B.; Chouchene, A.; Dutournié, P.; Thevenin, N.; Ruidavets, L.; Jellali, S.; Limousy, L. Olive Mill Wastewater: From a Pollutant to Green Fuels, Agricultural Water Source and Biofertilizer. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2017**, *5* (10), 8988–8996.
- (7) *Olive Mill Waste: Recent Advances for the Sustainable Management*; Galanakis, C. M., Ed.; Academic Press, 2017.
- (8) Bernini, R.; Merendino, N.; Romani, A.; Velotti, F. Naturally Occurring Hydroxytyrosol: Synthesis and Anticancer Potential. *Curr. Med. Chem.* **2013**, *20* (5), 655–670.
- (9) PROSODOL—Strategies to Improve and Protect Soil Quality from the Disposal of Olive Mills' Wastes in the Mediterranean Region. https://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=3297&docType=pdf (accessed 2021-04-30).
- (10) Visioli, F.; Romani, A.; Mulinacci, N.; Zarini, S.; Conte, D.; Vincieri, F. F.; Galli, C. Antioxidant and Other Biological Activities of Olive Mill Waste Waters. *J. Agric. Food Chem.* **1999**, *47* (8), 3397–3401.
- (11) United Nations. 17 Goals. <https://sdgs.un.org/goals> (accessed 2021-04-30).
- (12) Diekemper, D.; Schnick, W.; Schwarzer, S. Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting. *J. Chem. Educ.* **2019**, *96* (12), 3018–3024.
- (13) Burmeister, M.; Eilks, I. An example of learning about plastics and their evaluation as a contribution to Education for Sustainable Development in secondary school chemistry teaching. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2012**, *13* (2), 93–102.
- (14) Burmeister, M.; Schmidt-Jacob, S.; Eilks, I. German chemistry teachers' understanding of sustainability and education for sustainable development—An interview case study. *Chem. Educ. Res. Pract.* **2013**, *14* (2), 169–176.
- (15) Garner, N.; Siol, A.; Huwer, J.; Rolf Hempelmann, R. H.; Eilks, I. Implementing innovations in chemistry learning and sustainability education in a non-formal student laboratory context. *LUMAT* **2015**, *3* (4), 449–461.
- (16) Iyere, P. A. Chemistry in Sustainable Development and Global Environment. *J. Chem. Educ.* **2008**, *85* (12), 1604.
- (17) Zuin, V. G.; Eilks, I.; Elschami, M.; Kümmerer, K. Education in green chemistry and in sustainable chemistry: perspectives towards sustainability. *Green Chem.* **2021**, *23* (4), 1594–1608.
- (18) D'Angelo, S.; Ingrosso, D.; Migliardi, V.; Sorrentino, A.; Donnarumma, G.; Baroni, A.; Masella, L.; Antonietta Tufano, M.; Zappia, M.; Galletti, P. Hydroxytyrosol, a natural antioxidant from olive oil, prevents protein damage induced by long-wave ultraviolet radiation in melanoma cells. *Free Radical Biol. Med.* **2005**, *38* (7), 908–919.
- (19) González Arbeláez, L. F.; Ciocci Pardo, A.; Fantinelli, J. C.; Schinella, G. R.; Mosca, S. M.; Ríos, J.-L. Cardioprotection and natural polyphenols: an update of clinical and experimental studies. *Food Funct.* **2018**, *9* (12), 6129–6145.
- (20) Echeverría, F.; Ortiz, M.; Valenzuela, R.; Videla, L. A. Hydroxytyrosol and Cytoprotection: A Projection for Clinical Interventions. *Int. J. Mol. Sci.* **2017**, *18* (5), 930.
- (21) Rietjens, S. J.; Bast, A.; Haenen, G. R. M. M. New Insights into Controversies of the Antioxidant Potential of the Olive Oil Antioxidant Hydroxytyrosol. *J. Agric. Food Chem.* **2007**, *55* (18), 7609–7614.
- (22) Umeno, A.; Horie, M.; Murotomi, K.; Nakajima, Y.; Yoshida, Y. Antioxidative and Antidiabetic Effects of Natural Polyphenols and Isoflavones. *Molecules* **2016**, *21* (6), 708.
- (23) Keaney, M.; Gems, D. No Increase in Lifespan in *Caenorhabditis Elegans* Upon Treatment with the Superoxide Dismutase Mimetic EUK-8. *Free Radical Biol. Med.* **2003**, *34* (2), 277–282.
- (24) Bjelakovic, G.; Nikolova, D.; Gluud, C. Antioxidant supplements to prevent mortality. *JAMA* **2013**, *310* (11), 1178–1179.
- (25) Scudellari, M. The science myths that will not die. *Nature* **2015**, *528* (7582), 322–325.
- (26) Doonan, R.; McElwee, J. J.; Matthijssens, F.; Walker, G. A.; Houthoofd, K.; Back, P.; Matscheski, A.; Vanfleteren, J. R.; Gems, D. Against the oxidative damage theory of aging: superoxide dismutases protect against oxidative stress but have little or no effect on life span in *Caenorhabditis elegans*. *Genes Dev.* **2008**, *22* (23), 3236–3241.
- (27) Azzi, A. Antioxidants: Wonder drugs or quackery? *Biofactors* **2017**, *43* (6), 785–788.
- (28) Craft, B. D.; Kerrihard, A. L.; Amarowicz, R.; Pegg, R. B. Phenol-Based Antioxidants and the In Vitro Methods Used for Their Assessment. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2012**, *11* (2), 148–173.
- (29) Vaclavik, V. A.; Christian, E. W. Food Additives. In *Essentials of Food Science*; Springer: New York, 2008; pp 447–469. DOI: 10.1007/978-0-387-69940-0_18.
- (30) Sandhiya, L.; Jangra, H.; Zipse, H. Molecule-Induced Radical Formation (MIRF) Reactions—A Reappraisal. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2020**, *59* (16), 6318–6329.
- (31) Sandhiya, L.; Zipse, H. Radical-Pair Formation in Hydrocarbon (Aut)Oxidation. *Chem. - Eur. J.* **2019**, *25* (36), 8604–8611.
- (32) Galano, A.; Alvarez-Idaboy, J. R.; Francisco-Márquez, M.; Medina, M. E. A quantum chemical study on the free radical scavenging activity of tyrosol and hydroxytyrosol. *Theor. Chem. Acc.* **2012**, *131* (3), 1173.
- (33) Wright, J. S.; Johnson, E. R.; DiLabio, G. A. Predicting the Activity of Phenolic Antioxidants: Theoretical Method, Analysis of Substituent Effects, and Application to Major Families of Antioxidants. *J. Am. Chem. Soc.* **2001**, *123* (6), 1173–1183.
- (34) Quintero-Saumeth, J.; Rincón, D. A.; Doerr, M.; Daza, M. C. Concerted double proton-transfer electron-transfer between catechol

and superoxide radical anion. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2017**, *19* (38), 26179–26190.

(35) Ou, B.; Hampsch-Woodill, M.; Prior, R. L. Development and Validation of an Improved Oxygen Radical Absorbance Capacity Assay Using Fluorescein as the Fluorescent Probe. *J. Agric. Food Chem.* **2001**, *49* (10), 4619–4626.

(36) Simic, M. G. Free radical mechanisms in autoxidation processes. *J. Chem. Educ.* **1981**, *58* (2), 125.

(37) Wayner, D. D. M.; Burton, G. W.; Ingold, K. U.; Locke, S. Quantitative measurement of the total, peroxy radical-trapping antioxidant capability of human blood plasma by controlled peroxidation. *FEBS Lett.* **1985**, *187* (1), 33–37.

(38) Miller, N. J.; Rice-Evans, C.; Davies, M. J.; Gopinathan, V.; Milner, A. A novel method for measuring antioxidant capacity and its application to monitoring the antioxidant status in premature neonates. *Clin. Sci.* **1993**, *84* (4), 407–412.

(39) Re, R.; Pellegrini, N.; Proteggente, A.; Pannala, A.; Yang, M.; Rice-Evans, C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biol. Med.* **1999**, *26* (9–10), 1231–1237.

(40) Benzie, I. F.; Strain, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Anal. Biochem.* **1996**, *239* (1), 70.

(41) Steiger, A. *Development of New Experiments on the Modern Material Hydroxytyrosol for Science Lab for School Students*. Degree Thesis, Ludwig-Maximilians-University, Munich.

(42) Ducci, M. Redox Reactions in Sodium Alginate Beads. *WJCE* **2019**, *7* (2), 40–44.

(43) Matlin, S. A.; Mehta, G.; Hopf, H.; Krief, A. One-World Chemistry and Systems Thinking. *Nat. Chem.* **2016**, *8*, 393–398.

5.5 Luminol-Bubble-Tea – Antioxidantien und das Leuchten der Bällchen

Luminol-Bubble-Tea – Antioxidants and the glow of the alginate balls

Dominik Diekemper, Gudrun Baltjan, and Stefan Schwarzer

Diekemper, D., Baltjan, G. and Schwarzer, S. (2021), Luminol-Bubble-Tea – Antioxidantien und das Leuchten der Bällchen CHEMKON.

DOI: 10.1002/ckon.202000033

Author contributions:

Die Erprobung und Entwicklung des Experiments sowie die didaktische Ausarbeitung wurden durch Dominik Diekemper unter Anleitung von Stefan Schwarzer durchgeführt. Das Manuskript wurde von Dominik Diekemper geschrieben. Gudrun Baltjan leistete laborpraktische Unterstützung in der Erprobung.

Copyright:

Reprinted with permission from *CHEMKON*, 2021. Copyright 2021 John Wiley and Sons.



Luminol-Bubble-Tea – Antioxidantien und das Leuchten der Alginatbällchen

Dominik Diekemper,^{*,[a]} Gudrun Baltjan^[b] und Stefan Schwarzer^{*,[a]}

Zusammenfassung: Vielfach begegnen Antioxidantien Schülerinnen und Schülern im Alltag: In Lebensmitteln, Kosmetika oder in speziellem Functional Food. Bei der Behandlung von Redox-Reaktionen oder Lebensmittelzusatzstoffen im Chemieunterricht werden Antioxidantien häufig thematisiert, oftmals aber ohne einen motivierenden Kontext zu schaffen und ohne die chemischen Hintergründe der Antioxidantien genauer zu beleuchten. Das hier vorgestellte Experiment verbindet dabei diese chemischen Sachverhalte mit der bekannten Luminol-Reaktion und dem Trend des Bubble Teas. Als Modellsubstanz kann zusätzlich Hydroxytyrosol, ein Antioxidans aus der Olive, das in großen Mengen als Abfallprodukt bei der Olivenölherstellung anfällt, dienen.

Stichworte: Antioxidantien · Bubble Tea · Luminol-Reaktion

Luminol-bubble-tea – antioxidants and the glow of the alginate balls

Abstract: Students encounter antioxidants in food, cosmetics or functional food in their everyday life. When treating redox reactions or food additives in chemistry class, antioxidants are usually discussed, but often without creating a motivating context or a profound discussion of the chemical background of the antioxidants. The following experiment combines these chemical facts with the well-known luminol reaction and the trend of bubble tea. An antioxidant from the olive serves as a model substance, which is produced in large quantities as a waste product in the production of olive oil.

Keywords: antioxidant · bubble-tea · luminol-reaction

1. Das Comeback des Bubble Teas?

Als Bubble Tea zu Beginn der 2010er Jahre auch in Deutschland populär wurde, eröffneten zahlreiche Bubble-Tea-Shops in den Innenstädten. Auch altbekannte Fast-Food- und Kaffee-Ketten führten fortan Bubble Tea im Angebot [2]. Zum Ende des Trends trug u.a. eine Veröffentlichung der RWTH Aachen aus dem Jahr 2012 bei. In dieser Arbeit war

von einer Kanzerogenität bei häufigem Verzehr von Bubble Tea die Rede. Wenngleich diese Einschätzung widerlegt werden konnte, ist der Bubble-Tea-Trend so schnell abgeflaut, wie er aufgekommen war (Abb. 1).

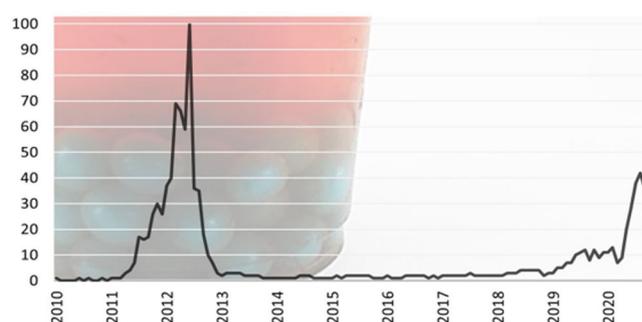


Abb. 1: Deutschsprachige Suchanfragen bei Google zu „Bubble Tea“ zwischen 2010 und 2020. Die Werte geben das Suchinteresse zum höchsten Wert (= 100) an.

Aus Sicht der Chemiedidaktik aber liefern die Alginatbällchen großes Potential. Zahlreiche deutschsprachige und internationale Veröffentlichungen zur Nutzung der Alginatbällchen im Chemieunterricht zeugen von einem gänzlich anders gerichteten Trend innerhalb des Chemieunterrichts und der fachdidaktischen Forschung. Neben Fluoreszenz-Phänomenen, kinetischen Reaktionsprozessen, verschiedenen Redoxprozessen und einem Modellversuch zu *Helicobacter pylori* [3–6] lässt sich auch die Luminol-Reaktion in „Bubble-Form“ durchführen und anhand dieser chemischen Reaktion die Wirkung von Antioxidantien, wie sie in unserem Alltag vorkommen, erklären. Antioxidantien sind häufig Gegenstand von Marketing und Werbung und haben damit einen direkten Lebensweltbezug für Schülerinnen und Schüler. Als Modellsubstanz für ein modernes, nachhaltiges Antioxidans kann hierfür, neben dem etablierten Vitamin C (Ascorbinsäure), die moderne Substanz Hydroxytyrosol [7] aus dem Olivenbaum verwendet werden. Ziel ist es, die chemischen Eigenschaften der Antioxidantien in einem aktuellen, motivierenden Kontext zu zeigen und dabei die kritische Haltung gegenüber Werbeversprechen, z. B. in Bezug auf Functional Food oder Kosmetik, zu schulen.

2. Die Luminol-Reaktion: Ein Evergreen der Chemie(didaktik)

Die Luminol-Reaktion und das dabei deutlich zu beobachtende Phänomen der Lumineszenz gehört ohne Zweifel zu den Klassikern der chemischen Showexperimente. Dabei zeichnet sich diese chemische Reaktion durch eine vergleichsweise starke, gut beobachtbare Lumineszenz aus.

Die Fähigkeit zur Chemolumineszenz von Luminol in Gegenwart eines Oxidationsmittels wie Wasserstoffperoxid beruht auf der Öffnung des N-Heterocyclus und der daraus resultierenden Bildung eines Intermediates im angeregten Zustand. Genauer wird das bei der chemischen Reaktion verwendete

[a] D. Diekemper, S. Schwarzer
Eberhard Karls Universität Tübingen
Didaktik der Chemie
Auf der Morgenstelle 18
72076 Tübingen
* E-Mail: Dominik.Diekemper@uni-tuebingen.de
Stefan.Schwarzer@uni-tuebingen.de

[b] G. Baltjan
Ludwig-Maximilians-Universität München
Didaktik der Chemie
Department Chemie
Butenandtstraße 5-13
81377 München

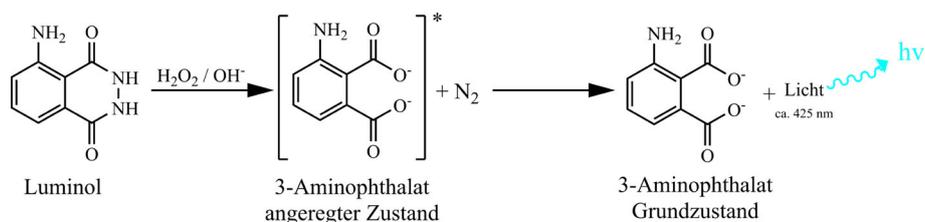


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung der Reaktion von Luminol mit Wasserstoffperoxid unter charakteristischer, blauer Chemolumineszenz.

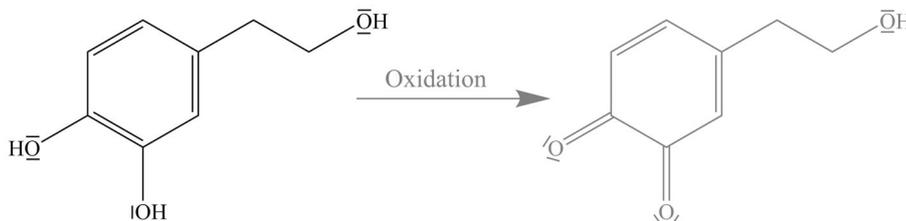


Abb. 3: Strukturformel von Hydroxytyrosol (l.) und Strukturformel der oxidierten Form (r.).

Luminol (3-Aminophthalsäurehydrazid) zunächst durch das alkalische Milieu unter H^+ -Abspaltung zum Luminol-Dianion oxidiert. Daraufhin kommt es zur Ringöffnung unter Stickstoffabspaltung. Für die Lumineszenz in diesem Oxidationsprozess ist entscheidend, dass das entstehende 3-Aminophthalat in einem angeregten Zustand gebildet wird. Beim anschließenden Übergang in den Grundzustand wird ein Photon im blauen Bereich des sichtbaren Lichtspektrums (circa 425 nm) emittiert (Abb. 2) [8].

Unter Zuhilfenahme der deutlichen Lumineszenz, hervorgerufen durch den beschriebenen Oxidationsprozess, lässt sich die Wirkung von Antioxidantien im Experiment zeigen.

Im Allgemeinen sind Antioxidantien chemische Stoffe, die unerwünschte, durch oxidative Prozesse bedingte Veränderungen in den zu schützenden chemischen Verbindungen hemmen oder unterbinden [9]. Dabei können sie sowohl als Reduktionsmittel wirken als auch als Radikalfänger. Wird nun im Folgenden ein Antioxidans der Reaktion zugesetzt, wird die Chemolumineszenz des Luminols zeitweise unterbunden und das Auftreten der Leuchterscheinung verzögert sich sichtbar [10–12]. Anhand dieses Zusammenhangs lässt sich ein wichtiger Sachverhalt aufzeigen: Antioxidantien werden selbst oxidiert, also umgesetzt. Die Schutzwirkung hält nur so lange, wie das Antioxidans unverändert (also nicht oxidiert) vorliegt (Abb. 3), was sich auch durch entsprechende Konzentrationsreihen in diesem Experiment visualisieren lässt.

3. Hydroxytyrosol: Vom Abwasser zum hochwirksamen Antioxidans

Das typische Klima der mediterranen Zone mit heißem Sommer und Trockenheit, verbunden mit einer hohen Sonnenintensität, hat die endemischen Pflanzen – wie den Olivenbaum – dazu veranlasst, zum Schutz eine hohe Menge an Antioxidantien zu produzieren. Ein hochwirksames und im großen Maße vertretenes Antioxidans ist das Polyphenol Hydroxytyrosol (2-(3,4-Dihydroxyphenyl)ethanol), zu finden in den Blättern, Ästen und Früchten des Olivenbaumes. Hydroxytyrosol wirkt sowohl reduzierend als auch als wirksamer Radikalfänger [13]. Diese Fähigkeit beruht auf den mesomeren Effekten (+M-Effekt) der vicinalen Hydroxygruppen (Abb. 3).

Hydroxytyrosol findet sich in hohen Konzentrationen im Abwasser der Olivenölherstellung, dem sogenannten Olive Mill

Waste Water (OMWW). Die hohe Konzentration an antioxidativ wirkenden Polyphenolen, kann in der mediterranen Region, wo sich die Olivenölproduktion konzentriert, zu ökologischen Problemen führen. Aus diesem Grund ist das Interesse an OMWW als neuartige Quelle für natürliche Antioxidantien groß. Besonders in der Kosmetikindustrie ist man auf das antioxidative Potential der natürlichen Substanz aufmerksam geworden. Ganze Produktreihen widmen sich nunmehr diesem Antioxidans aus der Olive, oft zu hohen Preisen, denn: Die Herstellung bzw. Extraktion reinen Hydroxytyrosols ist sehr kostenintensiv, sodass auch die Chemikalie kaum erschwinglich erscheint. Um dieses Problem zu umgehen und um diese interessante antioxidative Verbindung trotzdem zugänglich zu machen, eignen sich für den Chemieunterricht zwei alternative Darstellungsmethoden (Tabelle 1), die im Folgenden aufgezeigt werden.

4. Experimenteller Teil: Luminol-Alginatbällchen

Chemikalien und Geräte: Ammoniumchlorid (GHS 07), Natriumcarbonat (GHS 07), Luminol, Wasserstoffperoxid ($\omega = 10\%$; GHS 03, GHS 05) oder Lösung aus Heitmann® Reine Sauerstoffbleiche ($\omega = 5\%$, GHS07), Kupfersulfat-Lösung ($c = 2 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), Natriumalginat, Calciumchlorid (GHS 07), Glucose, Magnetprüher, Standzylinder, 250-mL-Becherglas, drei 100-mL-Bechergläser, Spatel, Löffel, Pipette, Sieb.

Versuchsdurchführung:

Schritt I: Vorbereitung der Alginatbällchen-Lösung

In einem 100-mL-Becherglas 0,25 g Ammoniumchlorid, 0,1 g Natriumcarbonat und eine Spatelspitze Luminol unter Rühren auf dem Magnetprüher in 25 mL Wasser lösen. 1 mL der Kupfersulfat-Lösung hinzugeben. Im Anschluss 0,5 g Natriumalginat sowie 5 g Glucose zugeben. Die Lösung weiter-rühren/quellen lassen. Mögliche Klümpchen können durch Zerdrücken mit einem Spatel oder leichtem Erwärmen der Lösung beseitigt werden (Abb. 4).

Schritt II: Herstellung der Alginatbällchen

In einem 250-mL-Becherglas 1,5 g Calciumchlorid in 100 mL dest. Wasser lösen. Die Lösung auf zwei 100-mL-Bechergläser aufteilen. In eines der Bechergläser wird zusätzlich das Antioxidans gegeben bzw. die Calciumchlorid-Lösung statt mit dest. Wasser mit Aufguss oder Extrakt hergestellt. Je nach Versuchsdurchführung eignen sich verschiedene Antioxidan-

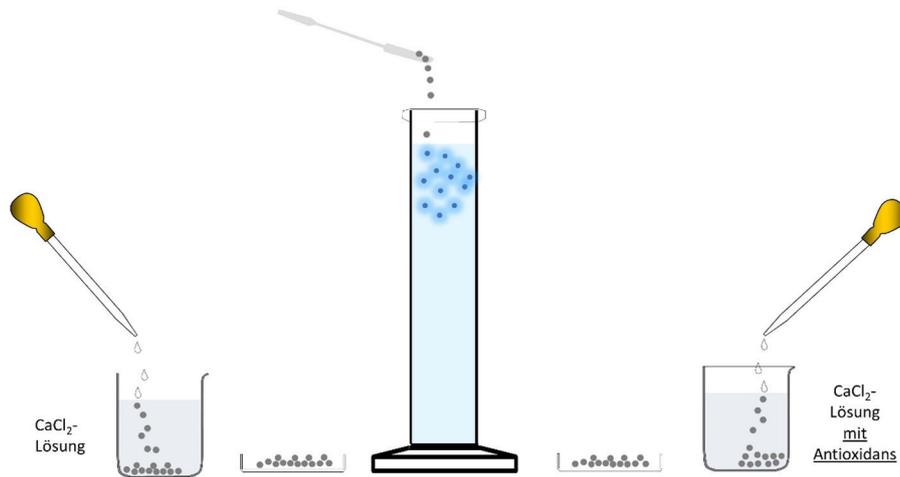


Abb. 4: Versuchsaufbau für den Vergleich der Alginatbällchen mit und ohne Antioxidans.

tien und Dosierungen (Tab. 1). Mithilfe einer 3-mL-Einmalpipette (es ist sinnvoll, Teile der Spitze mit einer Schere zu entfernen, um eine größere Öffnung zu erhalten) die Alginatbällchen-Lösung in die Bechergläser zutropfen (Abb. 4). Es entstehen in beiden Lösungen kleine Bällchen, die mit einem Sieb entnommen werden können.

Tab. 1: Verwendung und mögliche Gewinnung/Bezugsquelle von Hydroxytyrosol und Ascorbinsäure als Antioxidantien.

| Antioxidans | Gewinnung/Darstellung | Dosierung |
|----------------|---|--|
| Hydroxytyrosol | Hydroxytyrosol-Pulver (z.B. WACKER; beziehbar über die zukünftige Version des CHEM ₂ DO-Koffers) | 0,2 g pro 50 mL der CaCl ₂ -Lösung |
| | Soxhlet Extrakt Olivenblätter 5 g zerkleinerte Olivenblätter für ca. 6 h der Soxhlet-Extraktion unterziehen (Lösungsmittel: Wasser) | 5 g zerkleinerte Olivenblätter mit 100 mL Wasser |
| | Olivenblatt-Aufguss | 5 g Olivenblätter mit 100 mL siedendem Wasser übergießen, über Nacht ziehen lassen |
| Ascorbinsäure | Ascorbinsäure-Pulver (z. B. Grüsing) | 0,2 g pro 50 mL CaCl ₂ -Lösung |
| | Vitamin C Brausetablette (120 mg pro Tablette) | 1 Tablette pro 75 mL Wasser lösen. Zu 50 mL CaCl ₂ -Lösung 5 mL dieser Lösung geben |
| | Limettensaft | 2 mL pro 50 mL CaCl ₂ -Lösung (Zugabe ohne Fruchtfleisch!) |

Schritt III: Leuchten der Alginatbällchen

Der Standzylinder wird mit 10%iger Wasserstoffperoxid-Lösung gefüllt. Die Alginatbällchen der unterschiedlichen Bechergläser werden nacheinander mit einem Löffel in die Lösung gegeben (es können für die unterschiedlichen Bällchen auch zwei getrennte Standzylinder verwendet werden,

um den Effekt getrennt und zeitgleich demonstrieren zu können). Das unterschiedliche Verhalten wird beobachtet.

Beobachtung:

I: Es entsteht eine zähflüssige, leicht bläulich-trübe Flüssigkeit.

II: Beim Eintropfen der Alginatbällchen-Lösung in die Calciumchlorid-Lösung bilden sich kleine, zähe Kügelchen.

III: In Gegenwart einer oxidierenden Lösung (z.B. Wasserstoffperoxid) beginnen die Bällchen bläulich zu lumineszieren (Abb. 5). Diejenigen Bällchen, die zusätzlich mit dem Antioxidans versetzt worden sind, leuchten vorerst nicht und sinken zu Boden. Nach kurzer Zeit beginnen diese ebenfalls zu lumineszieren und steigen im Folgenden ebenfalls leuchtend an die Oberfläche.

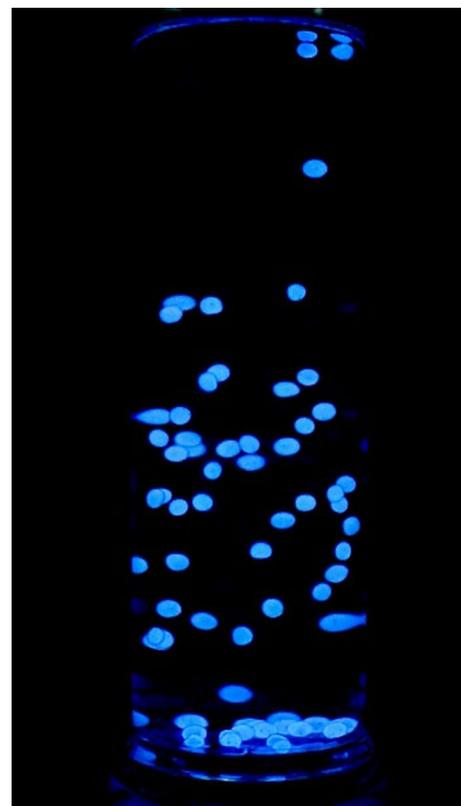


Abb. 5: Lumineszierende Alginatbällchen in Wasserstoffperoxid-Lösung.

Erklärung:

Das Luminol in den Alginatbällchen wird bei Anwesenheit des Oxidationsmittels Wasserstoffperoxid nach obenstehender Reaktionsgleichung (Abb. 2) oxidiert. Die bei dieser chemischen Reaktion freiwerdende Energie wird als Wärme- und Lichtenergie abgegeben. Die zugesetzten Kupfer(II)-Ionen dienen als Katalysator. Bei Anwesenheit eines Antioxidans wird der Oxidationsprozess des Luminols zeitweilig unterbunden, da zunächst das Antioxidans oxidiert wird. Es findet somit keine Lichtemission statt. Das Antioxidans wird in der Regel zuerst oxidiert. Sobald die vorhandene Stoffmenge Antioxidans vollständig umgesetzt ist, beginnen die Bällchen nach einiger Zeit zu leuchten, da nun das Luminol oxidiert werden kann. Das Luminol-Molekül eliminiert ein Stickstoff-Molekül, dabei werden unter Ringöffnung die beiden vicinalen Carboxyl-Gruppen (Phthalat) gebildet (Abb. 2). Durch den Auftrieb des Stickstoff-Moleküls steigen die Alginatbällchen wieder an die Oberfläche.

5. Didaktische Betrachtung und Fazit

Die Tatsache, dass auch die Wirkung der Antioxidantien im betrachteten System begrenzt ist und diese nur solange oxidative Prozesse verhindern, bis sie selbst oxidiert sind, ist durch das verzögerte Auftreten der Lumineszenz eindrucksvoll visualisiert. Gleichzeitig verknüpft das Experiment das bekannte Luminol-Experiment mit den sehr alltagsrelevanten Antioxidantien und kann durch den Bezug zum „Bubble-Tea-Trend“ und der konkreten Beobachtung motivierend wirken. Auch beim Stichwort Functional Food und den vielfach beworbenen Eigenschaften mancher Kosmetikprodukte und Lebensmittel, spielt der Begriff Antioxidans und ein kritischer Umgang mit den Eigenschaften eine wichtige Rolle im Alltag der Schülerinnen und Schüler.

Danksagung

Besonderer Dank gilt WACKER für die Überlassung der Substanz HTEssence® (Hydroxytyrosol) zur Erprobung von

neuen Experimenten für die Weiterentwicklung des CHEM₂DO Schulversuchskoffers und Andreas Steiger für Erprobungsarbeiten im Zusammenhang mit Hydroxytyrosol im Rahmen seiner Zulassungsarbeit.

Literatur

- [1] Google Trends. Google Trends - Bubble Tea. <https://trends.google.de/trends/explore?q=Bubble%20Tea&geo=DE> (letzter Zugriff am 21.10.2020).
- [2] Süddeutsche Zeitung. Modegetränk Bubble Tea: Chemiker finden Spuren giftiger Stoffe.
- [3] Ducci, M. (2017). „AC meets OC“ ... in Alginatbällchen. Chemkon 24/2, 88–90.
- [4] Ducci, M. (2019). Redox Reactions in Sodium Alginate Beads. WJCE 7/2, 40–44.
- [5] Ducci, M. (2020). Kinetic Reaction Processes in Alginate Beads. Chemkon 54/3, 167.
- [6] Ducci, M. (2020). Helicobacter Pylori – New Model Experiments on a “Chemically Gifted” Bacterium. Chemkon 27/7, 322–327.
- [7] Ciriminna, R. et al. (2016). Extraction, Benefits and Valorization of Olive Polyphenols. Eur. J. Lipid Sci. Technol. 118/4, 503–511.
- [8] Stoica, B. A. et al. (2016). Improving Luminol Blood Detection in Forensics. Journal of forensic sciences 61/5, 1331–1336.
- [9] Groteklaes, M. et al. (2009). Antioxidantien. Thieme Gruppe.
- [10] Pascual, C., Romay, C. (1992). Effect of Antioxidants on Chemiluminescence Produced by Reactive Oxygen Species. Journal of bioluminescence and chemiluminescence 7/2, 123–132.
- [11] Wieczorek, R. R., Sommer, K. (2011). Demonstrating the Antioxidative Capacity of Substances with Lightsticks. J. Chem. Educ. 88/4, 468–469.
- [12] Wieczorek, R., Sommer, K. (2012). Antioxidantien – Die Opferanoden der Natur? PdN 61/4, 16–23.
- [13] Hu, T. et al. (2014). Hydroxytyrosol and its Potential Therapeutic Effects. Journal of agricultural and food chemistry 62/7, 1449–1455.

Eingegangen am 2. Februar 2021

Angenommen am 8. März 2021

Online veröffentlicht am ■■. ■■■ 0000

5.6 *Miscanthus giganteus* als nachhaltiger Rohstofflieferant

Auch in der Erschließung neuer, nachwachsender und nachhaltiger Rohstoffquellen spielt die Fachwissenschaft Chemie eine bedeutende Rolle. Curricular werden im Schulunterricht Chemie standardmäßig Themen rund um Rohstoffe und Ressourcen aufgegriffen und mit einer Bildung für nachhaltige Entwicklung verknüpft: So findet man in deutschen Lehrplänen häufig die Themen Biokraftstoffe und nachwachsende Rohstoffe für die Kunststoffherstellung (z.B. [91]). Allerdings zeigen die verankerten Lehrplanbeispiele besonders in Anbetracht ihres innovativen Charakters in der experimentellen Umsetzung und ihrer gesellschaftlichen Kontroverse häufig Potential für neuere Ansätze. Ein möglicher Kandidat für eine schulexperimentelle Umsetzung des Themas „nachhaltiger Rohstofflieferant“ ist aus diesem Grund die lignocellulosereiche Pflanze *Miscanthus giganteus* (Abb. 13), die sich auch innerhalb der deutschen Forschungslandschaft interdisziplinär steigendem Interesse erfreut.



Abb. 13: *Miscanthus giganteus*
(Quelle: Kristina Hock 2021)

5.6.1 Fachwissenschaftlicher Hintergrund

Die ursprünglich aus dem ostasiatischen Raum stammende Pflanze ist eine Gattung aus der Familie der Poaceae, der Süßgräser und wurde erst 1935 nach Europa eingeführt, damals vorrangig als Zierpflanze oder Windschutzpflanze [92]. Die C4-Pflanze *Miscanthus* verbindet dabei viele Vorteile: Die hohe Anpassungsfähigkeit an klimatische Bedingungen macht einen Anbau auch in den gemäßigten Mittelbreiten und auf nährstoffarmen Böden möglich. Zusammen mit einer bis zu 15-jährigen Lebensdauer, einem geringen Feuchtigkeitsgehalt bei der Ernte, einer geringen Anfälligkeit für Schädlinge und geringe Anforderungen bezüglich Melioration oder Herbiziden [93] ergibt sich ein großes Potential als nachwachsender Rohstoff.

Interessant wird *Miscanthus giganteus* als Ausgangsprodukt für die Produktion von nachhaltigen Treibstoffen und Polymeren aufgrund seines hohen Gehaltes an Lignin, Cellulose und Hemicellulose. Mit 20 Gew.-%, Lignin, 43 Gew.-% Cellulose und 21 Gew.-% Hemicellulose [94] zeigt *Miscanthus* somit vergleichsweise hohe Anteile.

Lignin gehört zur Gruppe der phenolischen Biopolymere und verfügt je nach biologischem Ursprung über eine spezifische Zusammensetzung. Grund dafür ist die Lignin-Biosynthese, die über einen radikalischen Mechanismus verläuft. Die Monomere, Phenylpropanoide, aus denen Lignin aufgebaut ist, bilden Cumarylalkohol, Coniferylalkohol und Sinapylalkohol (Abb. 14).

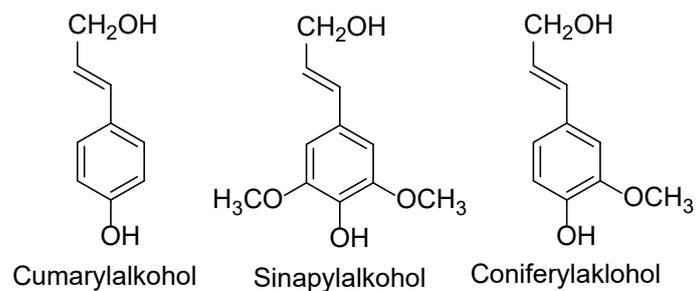


Abb. 14: Strukturformeln der Monomere (Monolignole) des Lignins

Ausgehend von diesen Verbindungen wird in der Pflanze durch radikalische Polymerisation das Polymer Lignin synthetisiert, das in alle Raumrichtungen vernetzt, äußerst widerstandsfähig und wasserunlöslich ist. Eine der häufigsten Verknüpfungstypen ist dabei die Ausbildung einer β -O-4-Bindung, deren Entstehung in Abb. 15 beispielhaft anhand der Dimerisierung von zwei Molekülen Coniferylalkoholen gezeigt wird [94]. Die Bildung von Radikalen für die Initiierung der Radikalreaktion erfolgt durch Zellwandperoxidasen [95].

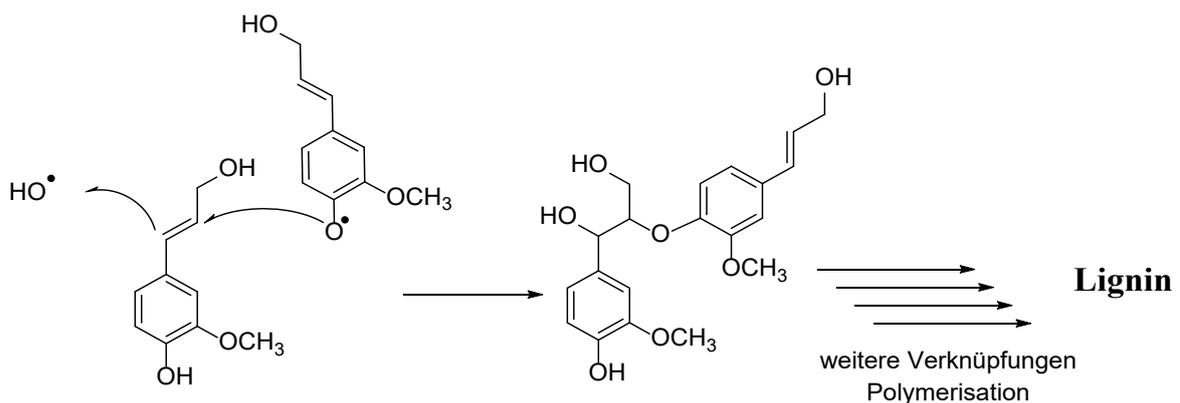


Abb. 15: Polymerisation von Lignin am Beispiel der Kopplung von zwei Coniferylalkoholen

Ein weiterer Hauptbestandteil des Süßgrasgewächses ist Cellulose. Cellulose ist das am häufigsten vorkommende Biopolymer mit einer natürlichen Jahresproduktion von $2 \cdot 10^{11}$ t [96]. Das 1,4-verknüpfte Poly- β -D-glucopyranosid (Abb. 16) besteht aus etwa 2000–15000

Monomereinheiten und ist linear angeordnet. Ursächlich für die starre Struktur der Cellulose ist, dass die einzelnen Cellulosestränge sich parallel zueinander ausrichten und durch eine Vielzahl von Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden werden. Eben jene Eigenschaft prädestiniert Cellulose als Gerüstsubstanz für pflanzliche Zellwände aber auch als Werkstoff für Industrie und Technik [96,97].

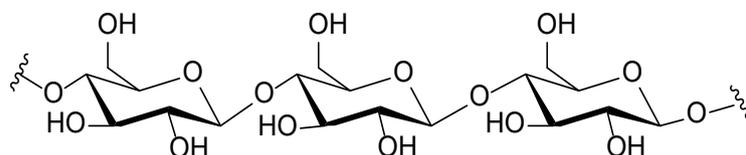


Abb. 16: Strukturformel der Cellulose

Zur Inwertsetzung der beiden genannten Inhaltsstoffe von Miscanthus und damit dessen Nutzung als nachwachsender Rohstoff sind Aufschluss- und Konversionsprozesse notwendig. Industriell findet häufig das Kraft-Verfahren Anwendung, in welchem das pflanzliche Material mit Natronlauge, Natriumsulfid, -sulfat und -carbonat unter erhöhtem Druck aufgeschlossen wird. Das Lignin wird hierbei in lösliche Fragmente depolymerisiert. Im Sulfit-Verfahren, das bei weitem die technisch größte Bedeutung hat, wird mit Sulfiten verkocht um wasserlösliche Lignosulfonate zu erhalten, während beim Soda-Verfahren Natriumhydroxid eingesetzt wird [98]. Das hier schulexperimentell umgesetzte Verfahren orientiert sich am Organosolv-Verfahren. Hierbei werden organische Lösemittel wie Ethanol, Essigsäure oder Ameisensäure als Aufschlussreagenzien verwendet. Als Produkt erhält man schließlich Zellstoff und vergleichsweise reines, unverändertes Lignin [99]. Anzumerken ist aber, dass sich dieses Verfahren aufgrund der eingesetzten Chemikalien gut für eine Umsetzung im Chemieunterricht eignet, großtechnisch aber bislang nicht im großen Stil eingesetzt wird.

Die beiden in dieser Versuchsdurchführung gewonnen Rohstoffe, Lignin und Cellulose, zeichnen sich durch vielfältige Weiterverarbeitungsmöglichkeiten aus. So wird Vanillin großtechnisch aus Lignin gewonnen und gilt als aktuell einzige phenolische Verbindung, die großindustriell aus Biomasse gewonnen wird. Vanillin kommt so eine Schlüsselrolle in der Weiterentwicklung von Polymeren aus nachwachsenden Rohstoffen zu [100].

Weiterhin weist Lignin – bedingt durch seine Struktur – die Fähigkeit auf, einen breiten Wellenlängenbereich des ultravioletten Lichtes zu absorbieren und eignet sich als Sonnenschutz. Von besonderem Interesse ist Lignin, da chemischer Sonnenschutz, wie er gewöhnlich verwendet wird, besonders bei längerfristiger Verwendung schädliche Effekte

auf die Haut haben kann. So bekommen natürliche Substanzen vermehrt Aufmerksamkeit, darunter neben Kaffee-Öl und Extrakten aus der Papaya eben auch Lignin [101]. Neben diesen beiden Anwendungsmöglichkeiten eignet sich Lignin weiterhin als Ausgangsstoff zur Herstellung von Polymeren [102], Klebstoff, Dispergatoren, Emulgatoren und Grundchemikalien wie Dimethylsulfid (DMS) und Dimethylsulfoxid (DMSO) [103].

5.6.2 Didaktisches Potential

Im Rahmen der Thematisierung von Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht und des gezielten Aufgriffs der Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen, können nachwachsende Rohstoffe ein geeignetes Themenfeld darstellen. Miscanthus findet seit den 1990er Jahren vermehrt seinen Platz auf deutschen Äckern und ist den Schülerinnen und Schülern so auch im Alltag zugänglich, häufig sogar als Zierpflanze in heimischen Gärten.

Die in den Lehrplänen bereits seit vielen Jahren curricular verorteten Themen rund um Biokraftstoffe und Biopolymere geben Anlass zur kritischen Diskussion und bieten gleichzeitig die Möglichkeit, neue Fachforschung am Beispiel Miscanthus einfließen zu lassen. Unter dem Aspekt der Ausbildung von Bewertungskompetenz können Chancen und Risiken, insbesondere im Vergleich zu Biokraftstoffen und Biopolymeren, abgewogen werden, all dies fächerverbindend mit Geografie und Biologie (Rohstoffgewinnung im Ausland, Boden, Ökosysteme, Pflanzenphysiologie). Im Experiment zu Miscanthus eröffnet sich den Lernenden der Beitrag der Chemie bei der Erschließung neuer Verfahren und zur Gewinnung von Rohstoffen aus nachwachsender Biomasse. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit der Verknüpfung mit Basiskonzepten der Chemie (z.B. Struktur-Eigenschaft-Konzept bei der Ausfällung von Lignin) und Anknüpfung an Vorwissen der Schülerinnen und Schüler.

Neben einer gezielten Extraktion durch die Vielfalt an Aufschlussverfahren, fällt Lignin in großen Mengen als Restprodukt der Papierherstellung an; ausgehend von der Inwertsetzung dieser Restprodukte, die zum aktuellen Zeitpunkt hauptsächlich der Energieerzeugung durch Verbrennung dienen, ist ebenso eine Projektgestaltung möglich und ein möglicher problemorientierter Ausgangspunkt für die Experimente gegeben.

Zu Lignocellulose, Lignin und Miscanthus wurden bisher Unterrichtskonzepte zur energetischen Nutzung [104] zur stofflichen Nutzung als Dämmmaterial sowie zur Zellstoffgewinnung [105] innerhalb der deutschsprachigen Literatur vorgestellt. Das pflanzliche Material wurde unter anderem mit dem Acetosolv-Verfahren [106] und einem

säurekatalysierten Verfahren mit Ameisensäure und Wasserstoffperoxid [104] aufgeschlossen und in den Schulunterricht implementiert.

Auch zur Weiterverarbeitung beziehungsweise Anwendung von Lignin im Chemieunterricht existieren Vorarbeiten in der Literatur, zum Beispiel zur Herstellung einer Sonnencreme [107], Experimenten zu Vanillin [108] oder als Klebstoff [109]. Bei der Verwendung von Cellulose zeigt sich eine Konzentration auf die Papierherstellung und auf Experimente zu Eigenschaften von Cellulose und Papier [110].

Eine weitere Nutzung des selbstgewonnenen Lignins ist außerdem in Redoxflussbatterien möglich, sodass sich ausgehend von Lignin auch der Themenkomplex effizienter und nachhaltiger Energiespeicherung eröffnen lässt [111].

5.6.3 Experimentelle Umsetzung

Die experimentelle Umsetzung umfasst verschiedene Teilschritte, die in Abb. 17 zur Übersicht dargestellt sind.

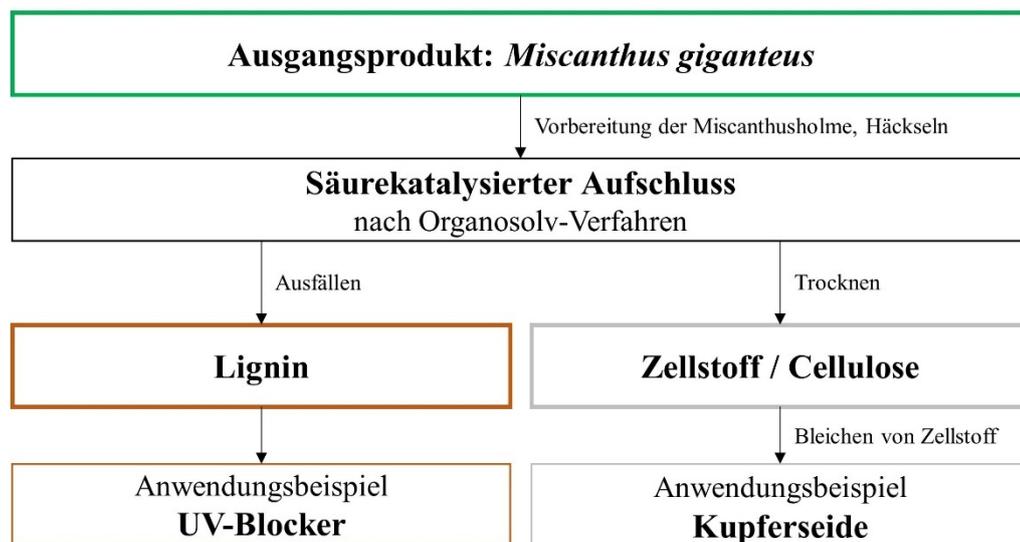


Abb. 17: Strukturierung der Einzelexperimente im Projekt *Miscanthus giganteus* (Eigene Darstellung 2021)

| Experiment 1: Aufschluss von <i>Miscanthus giganteus</i> | |
|---|--|
| Geräte | Chemikalien |
| Stativ, 2 Muffen, 2 Stativklappen, | <i>Miscanthus giganteus</i> |
| Kühlwasserschläuche, 3 | Ethanol   |
| Schlauchschellen, Rückflusskühler, 250- mL-Rundkolben, Rührfisch, | Salzsäure (37 %)   |
| Magnetrührer, Heizpilz, 100-mL- Messzylinder, Einmalpipetten, Pulvertrichter, Korkring, Standmixer, Schere, Waage, Spatel, Wägeschiffchen, Filtriereinheit, Trockenschrank, Uhrglas | Dest. Wasser |

Versuchsdurchführung:

- 1) Der Rückflusskühler wird mittels Muffe und Stativklemme am Stativ befestigt und mit Kühlwasserschläuchen und Schlauchklappen ans Kühlwasser angeschlossen. Zur Befestigung des Reaktionskolbens wird eine zweite Stativklammer mit Muffe unterhalb des Kühlers befestigt und ein Magnetrührer mit Heizpilz unter der Vorrichtung positioniert.
- 2) Von den Holmen des *Miscanthus* werden die Blätter abgetrennt, die Holme mit der Schere in kleine Stücke zerteilt und in einem handelsüblichen Standmixer möglichst fein gehäckselt.
- 3) 10 g des fein gehäckselten *Miscanthus* werden mit Hilfe eines Pulvertrichters in den 250-mL-Rundkolben gegeben und 95 mL Ethanol, 5 mL Wasser sowie 4 mL Salzsäure zugefügt.
- 4) Ein Rührfisch wird zugefügt, der Kolben in den Heizpilz gestellt und mit der Stativklammer befestigt.
- 5) Der Rückflusskühler wird aufgesetzt und das Gemisch unter Rühren 3 h Rückfluss gekocht.
- 6) Nach Abkühlen des Reaktionsgemisches und Absetzen der unlöslichen Bestandteile wird die überstehende Lösung mit einer Pipette abgenommen. Der verbliebene Feststoff wird mit Ethanol resuspendiert und filtriert. Der Feststoff wird im Trockenschrank bei 75 °C getrocknet.

Beobachtung:

Die zu Beginn farblose Reaktionslösung färbt sich tiefbraun. Der im Kolben verbliebene Feststoff weist ebenfalls eine dunklere Farbe auf als vor dem Aufschluss. Der unlösliche Bestandteil Cellulose wird durch Filtration abgetrennt.

Erklärung:

Die chemischen Bindungen zwischen Lignin und Cellulose werden säurekatalytisch gespalten, das im Miscanthus vorhandene Lignin wird dadurch in Lösung gebracht.

| Experiment 2: Gewinnung von Lignin als Reinstoff | |
|---|--|
| Geräte | Chemikalien |
| 600-mL-Becherglas, Trichter, Faltenfilter, Stativ, Muffe, Stativring, Pipette, Trockenschrank | Filtrat des Aufschlusses Aceton   |

Versuchsdurchführung:

- 1) Das Filtrat wird mit 2-3 mL Aceton versetzt und anschließend in ein mit 400 mL Wasser gefülltes 600-mL-Becherglas überführt.
- 2) Das Gemisch wird wenige Minuten stehen gelassen.
- 3) Der ausgefallene Feststoff wird mittels Filtriereinheit, bestehend aus Stativ, Stativring, Trichter und Faltenfilter, filtriert. Der Rückstand wird bei 75 °C getrocknet.

Beobachtung:

Es bildet sich ein feiner, hellbrauner Niederschlag (Abb. 18).

Erklärung:

Lignin ist aufgrund seiner chemischen Struktur unpolar und in Wasser nicht löslich. Aus diesem Grund fällt das Biopolymer bei Überführung des Aufschlussfiltrats in Wasser aus und kann anschließend abfiltriert werden.



Abb. 18: Feiner, hellbrauner Niederschlag von Lignin in Wasser und gewonnenes Lignin nach Filtration (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

| Experiment 3: Nachweis von Lignin | |
|---|---|
| Geräte | Chemikalien |
| 50-mL-Becherglas, Reagenzglas, Reagenzglasständer, Pipetten, Spatel, Glasstab | Ethanol   |
| | Phloroglucin (1,3,4-Trihydroxybenzol)  |
| | Salzsäure (5 M)   |
| | Gewonnenes Lignin |

Versuchsdurchführung:

- 1) Eine gehäufte Spatelspitze Phloroglucin wird im 50-mL-Becherglas in 10 mL Salzsäure gelöst.
- 2) Eine Spatelspitze des gewonnenen Reaktionsproduktes aus Experiment 2 wird in 2-3 mL Ethanol gelöst.
- 3) Es werden 2 mL der Phloroglucin-Lösung hinzugegeben.

Beobachtung:

Die zuvor leicht bräunliche Lösung färbt sich intensiv rot (Abb. 19).

Erklärung:

Funktionelle Gruppen im Lignin bilden mit Phloroglucin einen roten Komplex.



Abb. 19: Positiver Lignin Nachweis (rechts) und Blindprobe (links) (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

| Experiment 4: Verarbeitung und Verwendung von Lignin | |
|--|--|
| Geräte | Chemikalien |
| 250-mL-Becherglas, 100-mL-Messzylinder, Trichter, 3 50-mL-Bechergläser, Spatel, Glasstab, UV-Lampe, Reagenzgläser und Reagenzglasständer | Ethanol   Natriumfluoresceinat (Uranin) Gewonnenes Lignin Sonnencreme |

Versuchsdurchführung:

- 1) Eine kleine Spatelspitze Uranin wird in 100 mL Ethanol gelöst und gleichmäßig auf die drei 50-mL-Bechergläser verteilt.
- 2) In je ein Becherglas wird eine Spatelspitze Sonnencreme bzw. eine Spatelspitze des gewonnenen Lignins gelöst. Das dritte Becherglas dient als Vergleichsprobe.
- 3) Die Bechergläser werden mit UV-Licht bestrahlt.

Beobachtung:

Die Bechergläser, in denen zuvor Lignin und Sonnencreme gelöst wurde, fluoreszieren unter UV-Licht-Bestrahlung deutlich weniger als die Blindprobe (Abb. 20).

Erklärung:

Lignin ist durch seine chromophoren Gruppen in der Lage, UV-Licht zu absorbieren.

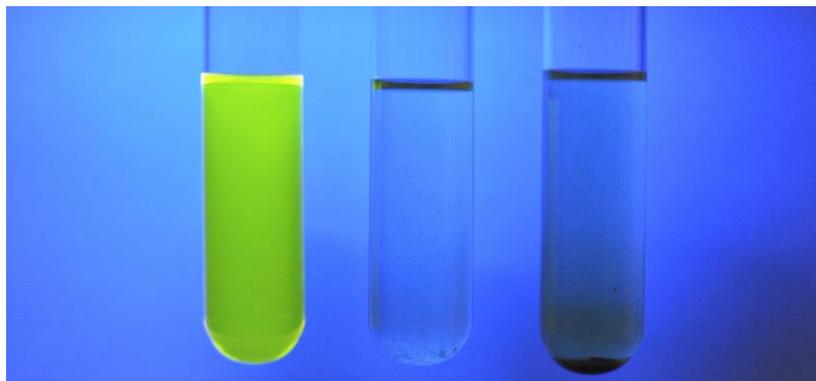


Abb. 20: UV-blockende Wirkung von Lignin im Experiment: Ethanolische Fluorescein-Lösung (links), mit Sonnencreme (mitte) und mit Lignin (rechts) unter UV-Licht-Bestrahlung (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

| Experiment 5: Bleichen von Zellstoff | |
|--|---|
| Geräte | Chemikalien |
| 2000-mL-Becherglas, 400-mL-Becherglas, Sieb, Glasstab, 2 100-mL-Messzylinder, 2 Trichter, Mörser mit Pistill, Waage, Magnetrührer mit Heizfunktion, Wägeschiffchen, Spatel | Wasserstoffperoxid (30 %)    Natronlauge (10 %) Lefax® (Simeticon) (Simeticon-Siliciumdioxid) Gewonnener Zellstoff |

Versuchsdurchführung:

- 1) 60 mL Wasserstoffperoxid (30 %) und 60 mL Natronlauge werden im Becherglas vereinigt. 1 g des gewonnenen, gemörserten Zellstoffs wird mit einer gemörserten Tablette Lefax® hinzugegeben. Das Gemisch wird unter Rühren mit einem Glasstab auf einer Heizplatte erhitzt.
- 2) Weiterrühren, bis der entstandene Schaum farblos ist.
- 3) Die Suspension wird durch ein Sieb gegossen, der Rückstand gründlich mit Wasser gewaschen.

Beobachtung:

Der zuvor braune Zellstoff aus dem Miscanthus-Aufschluss ist nun weiß.

Erklärung:

Im aus dem Aufschluss gewonnenen Zellstoffs sind noch Reste von Lignin, die durch die oxidierende Wirkung des Wasserstoffperoxid-Natronlauge-Gemisches aufgearbeitet werden.

| Experiment 6: Herstellung von Kupferseide [112] | |
|---|--|
| Geräte | Chemikalien |
| Zwei 100-mL-Bechergläser, 2 | Kupfer(II)-sulfat-5-hydrat    |
| Uhrgläser, Rührfisch, Magnetrührer, 50- | Schwefelsäure (2 mol/L)  |
| mL-Messzylinder, 2 10-mL- | Ammoniak (25 %)    |
| Messpipetten, 2 Trichter, Einmalspritze, | Natronlauge  |
| große Glaswanne, Vorrichtung zum | Gebleichter Zellstoff |
| Aufrollen, Waage, Wägeschiffchen, 25- | Dest. Wasser |
| mL-Einmalspritze | |

Versuchsdurchführung:

- 1) Herstellung des Schweizers-Reagenz: 3,25 g Kupfersulfat werden in 10 mL Wasser gelöst. 10 mL Ammoniak werden zugefügt sowie anschließend 2,2 mL der Natronlauge.
- 2) 0,25 g gebleichter Zellstoff werden in ein Becherglas eingewogen und 4 mL des Schweizers-Reagenz hinzugegeben. Die viskose Lösung wird mit einer Spritze aufgezogen.
- 3) Die Glasschale wird zwei cm hoch mit Schwefelsäure gefüllt, und die Lösung aus der Spritze in die Schale gespritzt.
- 4) Sobald der Faden sich zu entfärben beginnt, wird er aufgerollt.

Beobachtung:

Die Kupfersulfat-Lösung färbt sich durch die Zugabe von Ammoniak dunkelblau. Das Schweizers-Reagenz und die Cellulose bilden eine hochviskose dunkelblaue Lösung. Im Fällbad entsteht ein hellblauer Faden (Abb. 21).

Erklärung:

Die Cellulose lässt sich mithilfe des Schweizers-Reagenz in Lösung bringen, da sich Komplexe des Kupfers in die Cellulose-Struktur einlagern und so die Wasserstoffbrücken-bindungen aufbrechen. Im Fällbad lösen sich die Kupferionen aus der Struktur

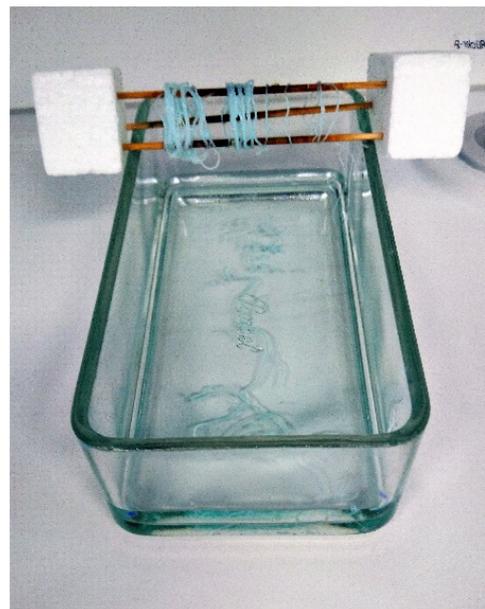


Abb. 21: Aufroll-Vorrichtung für die Kupferseide über Fällungsbad (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

und es entsteht wieder Cellulose, wobei die Cellulose-Ketten nun antiparallel angeordnet sind. Es bildet sich eine sogenannte Regeneratfaser, die ausgehend von einer natürlichen Faser durch chemische Prozesse gewonnen wurde.

5.7 Diclofenac: Vom Schmerzmittel zum Spurenstoff im Abwasser

Spuren- und Mikroschadstoffe wie Mikroplastik, Rückstände von Medikamenten und endokrine Disruptoren (z.B. aus Kontrazeptiva) rücken in den letzten Jahren vermehrt gesellschaftlich, wissenschaftlich und politisch in den Betrachtungshorizont.

Viele innerdeutsche Lehr- und Bildungspläne bieten Anknüpfungspunkte für pharmazeutische Themen [91,113]. Trotzdem zeigt sich, dass pharmazeutische Themen und eine Anwendung bereits erworbenen Wissens der Lernenden auf pharmazeutische Fragestellungen bislang im Chemieunterricht kaum präsent sind. Somit ist die Pharmazie ein Wissenschaftszweig, der im Schulunterricht curricular nicht vertreten ist.

Das im Folgenden vorgestellte Experiment verbindet die Implementierung von einfachen, alltagsrelevanten pharmazeutischen Themen mit der Idee der Nachhaltigkeit im Chemieunterricht.

5.7.1 Fachwissenschaftlicher Hintergrund

Diclofenac-Natrium (Natrium[[2-[(2,6-dichlorphenyl)amino]phenyl]acetat] (Abb. 22) ist eine weiße, kristalline und schwach hygroskopische Substanz [114] und wird in Deutschland unter anderem unter dem Handelsnamen Voltaren® als apothekenpflichtiges, teilweise verschreibungsfreies Analgetikum verkauft. Der Wirkstoff aus der Wirkstoffgruppe der nicht steroidalen Antirheumatika (NSAR) wird vorwiegend bei rheumatischen oder arthrosebedingten Gelenkschmerzen, Zerrungen und Prellungen eingesetzt [115]. Diclofenac kommt in unterschiedlichen Darreichungsformen vor. Es wird unter anderem oral in Tabletten- oder Kapselform, rektal als Zäpfchen oder dermal als Gel angewendet.

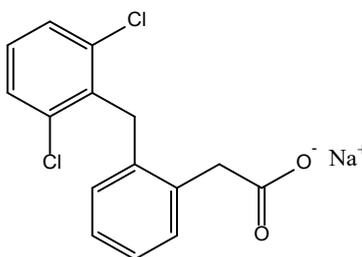


Abb. 22: Natrium-Salz von Diclofenac

Relevanz in der Verknüpfung von Chemieunterricht mit dem Gedanken der Nachhaltigkeit erlangt Diclofenac als Alltagsprodukt durch seine negative Auswirkung auf die Umwelt. Diclofenac gilt als sogenanntes „Contaminant of Emerging Concern“ (CEC) und wurde deshalb 2013 Teil einer Beobachtungsliste für Gewässerschadstoffe (EU-Watch-List) der Europäische Union. Auf dieser Grundlage und den beschlossenen Grenzwerten wird seither

in europäischen Mitgliedsstaaten das Vorkommen in den Oberflächengewässern gemessen [116–118]. An diesen sogenannten LAWA-Messtellen wird in den letzten Jahren vermehrt der festgelegte Umweltqualitätsnorm-Wert für Diclofenac überschritten [117].

Ein Großteil des Analgetikums wird bei systemischer Einnahme durch den menschlichen Organismus unverändert durch Diurese wieder ausgeschieden. Ebenso ist das Auftragen auf die Haut in Form eines Gels mit hohen Einträgen des Wirkstoffes in das Abwasser verbunden. Dementsprechend ist Diclofenac eines der am weitest verbreiteten Pharmazeutika in Kläranlagen und dort oft in hohen Konzentrationen im Abwasser anzutreffen [119].

Diclofenac führt bei Geier-Populationen und einigen Fischarten bereits im niedrigen μg Bereich pro Liter zu akutem Nierenversagen [120,121]. Diesbezüglich stellt die hohe Persistenz von Diclofenac im Gewässersystem ein Problem dar: Herkömmliche Kläranlagen sind in der Entfernung von Diclofenac aus den Abwässern ineffizient und können lediglich einen Anteil von 20 – 30 % der vorhandenen Spurenstoff-Konzentration beseitigen [122].

Eine Möglichkeit innerhalb einer neu einzuführenden vierten Reinigungsstufe organische

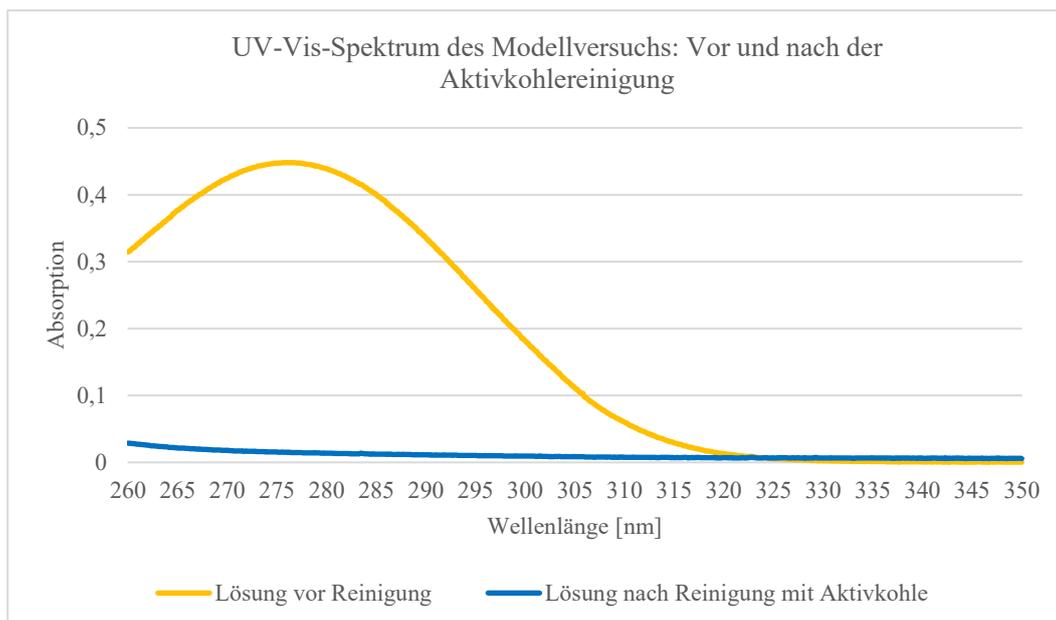


Abb. 23: UV-Vis-Aufnahme vor und nach der Reinigung durch die im Modellexperiment verwendete Aktivkohle-Spritze

Schadstoffe wie Diclofenac effizient zu entfernen, können adsorptionsbasierte Verfahren mit Aktivkohle sein. Neben Verfahren mit granulierter Aktivkohle (Granulated Active-Carbon, kurz GAC) sind auch Verfahren mit pulverisierter Aktivkohle (Powdered Active Carbon, kurz PAC) praktikabel [123].

Analytisch lässt sich die Anwesenheit von Diclofenac in wässrigen Lösungen unter anderem mittels UV-Vis-Spektroskopie nachweisen (Abb. 23). Der Wirkstoff zeigt eine signifikante

Absorption bei 276 nm , die sich durch den Anteil des aromatischen Rings im Molekül ($\lambda=254$ nm) und der Carboxyl-Funktion ($\lambda=273$ nm) an der Absorption erklären lässt. Nasschemisch ist ein Nachweis durch eine Oxidation mit einer alkalischen Lösung von Kaliumhexacyanido-ferrat(III) (Rotem Blutlaugensalz) möglich und gut visualisierbar. Bei der Zugabe einer alkalischen, gesättigten Lösung des roten Blutlaugensalzes färbt sich bei Anwesenheit von Diclofenac das Gemisch rötlich braun. Fakultativ kann zusätzlich durch das Ansäuern mit Salpetersäure das Ausfallen von kolloidalem Berliner Blau beobachtet werden. Die Farbreaktionen beruhen auf der Oxidation des Diclofenacs zu einem Diphenylderivat. Das Hexacyanidoferrat(III) wirkt als Oxidationsmittel, da durch die Aufnahme eines Elektrons die stabilere t_{2g}^6 -Konfiguration des Komplexes gebildet wird, es bildet sich Hexacyanidoferrat(II). Durch Ansäuern kann dieses nun mit den vorhandenen Fe(III)-Ionen zu Berliner Blau reagieren [124].

Grundlegende pharmazeutische Denkweisen sind ebenso Teil der Versuchsdurchführung. Die Entwicklung von Arzneistoffen stellt eine Schnittstelle zwischen Chemie, Biochemie und Medizin dar. An ein wirksames Arzneimittel werden hohe Anforderungen gestellt: Neben Sicherheit und wenigen Nebenwirkungen, sollen sich Arzneistoffe einfach verabreichen lassen, vorzugsweise als kleine Tablette. Bedeutend ist auch die Fähigkeit in ausreichender Konzentration das Zielmolekül im Organismus erreichen zu können. Die Resorption, Verteilung, Stoffwechsel und Ausscheidung auf dem Weg zum Zielmolekül sind entscheidend für die Wirksamkeit. Dies wird oftmals unter den sogenannten ADME-Eigenschaften (**a**dsorption, **d**istribution, **m**etabolism, **e**xcretion) zusammengefasst [125]. Eine Vereinfachung bzw. Verallgemeinerung dieser Vorgänge sind die sogenannten Lipinski-Regeln [126], die besagen, dass eine schwache Resorption zu erwarten ist, wenn:

1. Die Molekülmasse des Arzneistoffes über $500 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$ liegt,
2. die Anzahl der Wasserstoffbrücken-Donatoren größer als 5 ist
3. die Anzahl der Wasserstoffbrücken-Akzeptoren größer als 10 ist,
4. der Verteilungskoeffizient $\log [P]$ größer als 5 ist.

All diese Faustregeln können auf die beteiligten Schmerzmittel in dieser Versuchsdurchführung angewandt werden und so einen ersten Eindruck der pharmazeutischen Wissenschaft vermitteln.

5.7.2 Didaktisches Potential

Die Durchführung des Experiments beinhaltet das Ziel, den Schülerinnen und Schülern den Zusammenhang ihres chemischen Fachwissens und der Pharmazie aufzuzeigen. Zudem soll Sachkompetenz und Verantwortungsbewusstsein im Umgang mit Arzneimitteln generiert werden. Aus diesem Grund beginnt der Experimentierzyklus mit den einfachen, chemischen Voraussetzungen, die ein Arzneistoff-Molekül aufweisen muss, um oral verabreicht wirksam sein zu können. Mithilfe der zuvor genannten Lipinski-Regeln wird das Molekül bezüglich einer möglichen Wirksamkeit beurteilt. Der Großteil der Regeln kann von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe II an den einzelnen Schmerzmittel-Molekülen problemfrei nachvollzogen werden. Die Verbindung des Vorwissens zur Systematik der funktionellen Gruppen in Verknüpfung mit der Bedeutung für die Wirksamkeit eines Arzneimittels können konkreten Anwendungsbezug in die organische Systematik bringen. Funktionelle Gruppen können so mit dem Alltag verknüpft werden, was sich auch positiv auf die Behaltensleistung auswirken könnte.

Weiterhin findet ein klassisches pharmazeutisches Nachweisverfahren Anwendung. Das verwendete Froehde-Reagenz dient der Identifizierung über eine Farbreaktion und lehnt an die vorgeschriebene Überprüfung neu eingehender Substanzen in den Rezepturen von Apotheken an.

Der im Experiment folgende Reinigungsschritt, die Adsorption mit Aktivkohle wird vielfach in Kosmetika und Nahrungsmitteln beworben. Die vorteilhaften Eigenschaften der Aktivkohle werden hier im Modellexperiment in anderem Zusammenhang gezeigt und mit einem aktuellen und ökologischen Aspekt verknüpft.

Die Verwendung instrumenteller Analytik ermöglicht einen gezielten Einblick in das Denken und Arbeiten von Chemikerinnen und Chemikern bzw. hier Pharmazeutinnen und Pharmazeuten. Eine Gegenüberstellung mit der nasschemisch vorgestellten klassischen Analytik lässt den Fortschritt in der chemischen Analytik erkennen und durchaus auch historisch-problemorientierte Unterrichtsansätze zu. Zusätzlich wird das Problem des Nichtvorhandenseins von schultauglichen UV-Vis-Geräten in vielen Chemiesammlungen umgangen.

Besonders im Rahmen der Generierung von Bewertungskompetenz, stellt sich die Diskussion um eine vierte Reinigungsstufe in Klärwerken als gewinnbringend dar. Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit lassen sich auf die Notwendigkeit einer vierten Reinigungsstufe anwenden und so das Fehlen dieser Einrichtungen in Klärwerken kritisch hinterfragen. Auch zeigt sich an diesem Beispiel das Vorhandensein der unterschiedlichen

Dimensionen und damit, dass Sachverhalte nicht nur aus einer ökologischen Perspektive oder Notwendigkeit heraus betrachtet werden sollten.

Schlussendlich könnte sich die Verlinkung von Pharmazie und Chemie auch aus epistemologischen Gründen für das Unterrichtsfach Chemie anbieten: Während Chemie eher negativ konnotiert ist, könnte die Pharmazie – allein durch ihre grundsätzliche Aufgabe, Medikamente gegen Leiden zu entwickeln – positiv auf die vermittelten chemischen Fachinhalte auswirken. Die Chemie leistet damit einen fachlichen Beitrag zu einer vertieften Auseinandersetzung und eröffnet erneut die Möglichkeit zur Zusammenarbeit mit Fächern wie Biologie und Geografie. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit, mit pharmazeutischen Themen besonders Mädchen und junge Frauen anzusprechen und damit der Geschlechtsspezifität naturwissenschaftlicher Interessen gerecht zu werden, wie sie unter anderem für die Sekundarstufe I existieren. Themen um Krankheiten, Körperfunktionen und Körperbewusstsein zeigen dabei gesteigertes Interesse [127].

5.7.3 Experimentelle Umsetzung

| Vorversuch: Identifikation verschiedener Schmerzmittel | |
|--|---|
| Geräte | Chemikalien |
| Tüpfelplatte, 3 Spatel, Tropfflasche, Farbtabelle Froehde Reagenz, Porzellan-Mörser mit Pistill, Waage, Wägeschiffchen, Trichter, Magnetrührer, Rührfisch, 150-mL- Becherglas | Schwefelsäure (96 %)  |
| | Ammoniumheptamolybdat  |
| | Paracetamol |
| | Aspirin |
| | Diclofenac |

Zur Herstellung des Froehde-Reagenzes werden 0,5 g $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ in 50 mL konzentrierter Schwefelsäure gelöst und unter Rühren leicht erwärmt. Nach dem Abkühlen in Tropfflasche umfüllen. Für die Bereitstellung der drei Schmerzmittel eignen sich herkömmliche, rezeptfrei erwerbliche Tabletten ohne Überzug, die in einem Porzellan-Mörser vorab pulverisiert werden.

Versuchsdurchführung:

- 1) Je eine Spatelspitze der pulverisierten Pharmazeutika werden in eine Mulde der Tüpfelplatte gegeben.
- 2) Es werden jeweils 1-2 Tropfen des Nachweis-Reagenzes zugetropft.
- 3) Anhand der Farbveränderung werden die einzelnen Substanzen identifiziert.

Beobachtung:

Nach Zugabe des Nachweis-Reagenzes zu den weißen, pulverisierten Schmerzmitteln zeigen sich unterschiedliche Färbungen (Abb. 24).



Abb. 24: Unterschiedliche Farbreaktionen nach Zugabe des Froehde-Reagenzes: Aspirin (links) blau-violett, Paracetamol hellblau (mittig), Diclofenac rosa (rechts) (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

Erklärung:

Die unterschiedliche Farbgebung beruht auf dem unterschiedlichen Oxidationsvermögen der Schmerzmittel auf die im Reagenz gebildete Molybdänsäure [128]. Die unterschiedlichen Farben beruhen also auf den verschiedenen Oxidationsstufen des Molybdäns.

| Diclofenac und die vierte Reinigungsstufe des Klärwerks | |
|--|---|
| Geräte | Chemikalien |
| 20-mL-Einmalspritze mit Luer-Lock, Glaswolle, Spritzenfilter (1-2 µm Glasfaser), geteilte Petrischale, schultaugliches UV-VIS-Spektrometer (z.B. PHYWE oder Pasco), Quarz-Küvette, Spatel, Magnetrührer, Rührfisch, 250-mL-Becherglas, 250-mL-Erlenmeyerkolben, Trichter, Faltenfilter | Gekörnte Aktivkohle Natronlauge (c = 1 mol/L)  Rotes Blutlaugensalz Diclofenac, gemörsert Dest. Wasser |

Versuchsdurchführung:

- 1) Für die Herstellung des Spritzenaufbaus wird ein ein-Cent-großes Büschel Glaswolle mit dem Stempel an das untere Ende der Spritze gedrückt. Mit einem Spatel wird die Spritze etwa zur Hälfte mit gekörnter Aktivkohle befüllt (Abb. 25).
- 2) Mithilfe des Magnetrührers wird eine wässrige Lösung von Diclofenac hergestellt. Dazu wird eine Spatelspitze der gemörserten Tablette mit 100 mL dest. Wasser vermennt.
- 3) Die Lösung wird filtriert und ein UV/VIS-Spektrum aufgenommen.
- 4) Die mit Aktivkohle bestückte Spritze wird mit der Diclofenac-Lösung möglichst weit aufgezogen und geschüttelt. Ein Spritzenfilter wird aufgeschraubt und die Lösung aus der Spritze in eine Küvette gedrückt. Von der Aktivkohle-gereinigten Probe wird erneut ein UV-VIS-Spektrum aufgenommen.

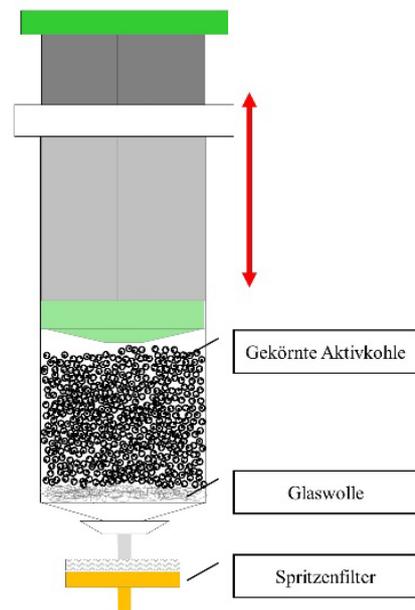


Abb. 25: Aufbau des Modellexperiments zur Aktivkohlereinigung in Einmalspritze (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

Beobachtung:

Die pulverisierte Tablette löst sich nicht vollständig. Sobald die Diclofenac-Lösung in der Aktivkohlespritze ist, zeigt sich ein leichter Beschlag an der Plastikwand der Spritze. Bei der Durchführung der UV-VIS-Messung vor der Reinigung zeigt sich eine breite Bande bei 276 nm. Diese verschwindet nahezu vollständig bei der durch die Aktivkohle gereinigten Lösung.

Erklärung:

Die handelsübliche Tablette beinhaltet neben dem Wirkstoff Diclofenac noch verschiedene, teilweise unlösliche Bestandteile wie Füllstoffe (unter anderem Calciumphosphat, Cellulose, Maisstärke). Beim Reinigungsschritt mit der Aktivkohlespritze zeigt sich die hohe Adsorptionsfähigkeit von Aktivkohle: Bei Aktivkohle handelt es sich um reinen Kohlenstoff mit einem deutlich erhöhten Porenanteil, sodass ein Gramm Aktivkohle eine Gesamtoberfläche von circa 1000 m² besitzt. Die Adsorption an der Oberfläche beruht hauptsächlich auf der Wechselwirkung zwischen der polaren Substanz Diclofenac und den π -Elektronen der Oberfläche des Kohlenstoffs [129]. Diclofenac zeigt eine starke Absorptionsbande bei 276 nm, die im UV-VIS-Spektrometer identifiziert werden kann.

Ein möglicher qualitativer Nachweis, besonders bei Fehlen eines UV-Vis-Gerätes, gelingt mit einer wässrigen Lösung von $K_3[Fe(CN)_6]$ in einer 1 molaren Natronlauge. In einer geteilten Petrischale werden zu zwei Millilitern der ungereinigten bzw. gereinigten Lösung werden jeweils zwei Milliliter der Nachweis-Lösung gegeben. Bei Gegenwart von Diclofenac tritt eine rötlich-braune Färbung auf (Abb. 26). Das Rote Blutlaugensalz fungiert hier als Oxidationsmittel.

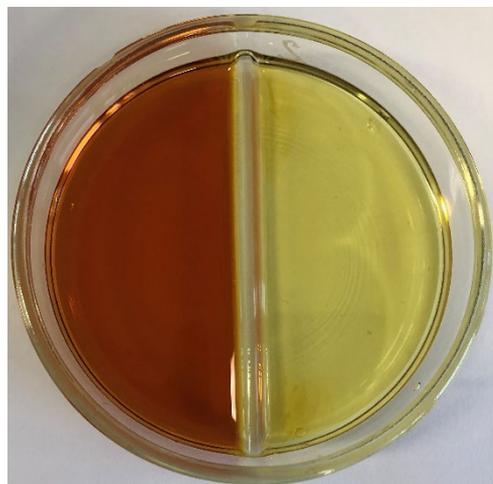


Abb. 26: Nachweis mittels $K_3[Fe(CN)_6]$. Links ungereinigt, rechts bereinigt im Modellexperiment (Quelle: Eigene Darstellung 2021)

6. Evaluation der Experimente in der Lehrkräftefortbildung

Zur Optimierung und zeitgemäßen Anpassung von Lehr- und Lernprozessen im naturwissenschaftlichen Unterricht sind konzeptionelle Entwicklungsarbeiten und damit die Entwicklung von Experimenten für den Schulunterricht ein wichtiger Bestandteil der chemiedidaktischen Forschung. Bei der Entwicklung des Experiments und der konzeptionellen Umsetzung sind eine Vielzahl von Parametern zu beachten. Es ist also zielführend die brauchbare Umsetzung dieser Determinanten für ein gelungenes Schulexperiment in der Schulpraxis zu evaluieren. Dieser iterative Charakter ist wesentlicher Bestandteil des Forschungsmodells der didaktischen Rekonstruktion (Kap. 2).

Versuchsbeschreibungen müssen adressatengerecht verfasst sein und die Experimente müssen gewünschte Ergebnisse erzielen [130]. Ob die Experimente in der Schule relevant sind und die Versuchsbeschreibungen für Außenstehende und Lehrkräfte verständlich und nachvollziehbar abgefasst wurden, lässt sich am besten an aktiven Lehrkräften erfassen. Aktive Lehrerinnen und Lehrer können sowohl die strukturellen Gegebenheiten der Schule als auch das Interesse und die Fähigkeiten und Fertigkeiten ihrer Schülerinnen und Schüler adäquat einschätzen. Die Eignung und Entwicklungsleistung hinter den Experimenten lässt sich auf diese Weise zielführend evaluieren. Im Folgenden werden die Methodik sowie die Ergebnisse der durchgeführten Lehrkräftebefragung vorgestellt.

6.1 Methode

Eine Akquise der Lehrkräfte erfolgte in Bayern hauptsächlich über das zentrale Lehrkräftefortbildungssystem FIBS und etablierte E-Mail-Verteiler an den Standorten München und Tübingen. Angeboten wurden auch schulinterne Lehrkräftefortbildungen (SchiLF) für ganze Fachschaften. Die Planungen sahen eine durchschnittliche Fortbildungsgröße von 20–25 Teilnehmenden und die Durchführung von 10–15 Fortbildungen vor. Bedingt durch die geltenden Corona-Hygienevorschriften zwischen März 2020 bis zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Forschungsarbeit, waren Veranstaltungen zeitweise überhaupt nicht durchführbar, oder mit maximal 10 Teilnehmenden. Ein Großteil der geplanten Veranstaltungen konnte zudem entweder aufgrund neuer geltender Bestimmungen, Bedenken am Veranstaltungsort oder der Nichtteilnahme der Lehrkräfte nicht stattfinden. Häufig erfolgte auch keine Freistellung der Lehrkräfte durch die Schulleitung, um zusätzlichen Unterrichtsausfall zu vermeiden. Es konnten insgesamt 6 Fortbildungen in Bayern und Baden-Württemberg realisiert werden, an

denen 36 Lehrkräfte (N = 36) teilnahmen. Bei der Befragung handelt es sich um ein Interventionsdesign mit Prä-Post-Fragebogen. Für die Fragebögen wurde die herkömmliche Paper-Pencil-Methode gewählt. Die Teilnehmenden erhielten einen Fragebogen vor dem Impulsvortrag der Fortbildung und zum Ende der Veranstaltung. Vor der eigentlichen Studie wurde eine Interviewstudie mit insgesamt 13 Lehrkräften (n = 13) durchgeführt.

6.2 Fragebogen

Der eingesetzte papiergebundene Fragebogen (Paper-Pencil-Methode), der im Rahmen der Fortbildungsveranstaltung durch die Lehrkräfte ausgefüllt wurde, enthielt sowohl offene Antwortformate als auch ratingskalierte Fragen. Zu Beginn wurden personenbezogene und soziodemographische Hintergrunddaten (Alter, Geschlecht) und berufsbezogene Daten (Unterrichtstätigkeit, weiteres Unterrichtsfach, Stundenverpflichtung, Fachdidaktische Zeitschriftenlektüre) der Lehrkräfte erhoben. Ein Identifikationscode ermöglichte die anonyme Zuordnung des Prä- und Post-Fragebogens. Eine Zuordnung zu den Bundesländern, in denen die Fortbildungsveranstaltungen durchgeführt wurden, war durch den jeweiligen Veranstaltungsort möglich. Alle ratingskalierten Fragen verfügten über eine 5-stufige Antwortskala (trifft zu (0), trifft eher zu (1), teils teils (2), trifft eher nicht zu (3), trifft nicht zu (4)). Die vollständigen Fragebögen des prä- und post-Tests sind im Anhang 4 zu dieser Arbeit zu finden. Die einzelnen Items der Fragebögen sind in Tabelle 3 zur Übersicht zusammengefasst.

Tabelle 3: Skalen und Items des eingesetzten Fragebogens.

| Aspekt/Skala | Bezugsquelle/Anzahl Items | Itemformulierung |
|--|---------------------------|--|
| Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung | | |
| <u>Offene Frage:</u> <i>Definieren Sie bitte möglichst konkret den überfachlichen Begriff „Nachhaltigkeit“</i> | | |
| Begriff Nachhaltigkeit | Eigenentwurf (3) | <input type="checkbox"/> <i>Das Konzept hinter dem Begriff „Nachhaltigkeit“ ist mir vertraut.</i> <input type="checkbox"/> <i>Ich halte Nachhaltigkeit im Allgemeinen für ein wichtiges Thema</i> <input type="checkbox"/> <i>Ich halte Nachhaltigkeit für ein Thema, das in Zukunft immer wichtiger wird.</i> |
| Begrifflichkeit Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) | Eigenentwurf (3) | <input type="checkbox"/> <i>Das Konzept „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ ist mir vertraut.</i> <input type="checkbox"/> <i>Über die Weltdekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BnE) das „UNESCO-Weltaktionsprogramm“ oder „Umweltbildung Bayern“ kam ich in</i> |

| | | |
|--|--------------------------------|--|
| | | <p><i>Kontakt mit nachhaltigen Themen und Konzepten.</i></p> <input type="checkbox"/> <i>Der Begriff Gestaltungskompetenz ist mir vertraut.</i> |
| Nachhaltigkeit in der eigenen Ausbildung | Eigenentwurf (3) | <input type="checkbox"/> <i>Im Rahmen meines Studiums bin ich mit „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BnE) in Berührung gekommen.</i> <input type="checkbox"/> <i>Im Rahmen meines Referendariats bin ich mit „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BnE) in Berührung gekommen.</i> <input type="checkbox"/> <i>Nachhaltigkeit und BnE waren bereits Thema einer Fortbildung, die ich besucht habe.</i> |
| Nachhaltigkeit im Chemieunterricht | Eigenentwurf (8) | <input type="checkbox"/> <i>Nachhaltigkeit ist ein Thema, das aktuell im Chemieunterricht eine Rolle spielt.</i> <input type="checkbox"/> <i>Nachhaltigkeit im Chemieunterricht halte ich für einen Aspekt, der die Schülerinnen und Schüler interessiert.</i> <input type="checkbox"/> <i>Die Fachwissenschaft Chemie leistet einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung.</i> <input type="checkbox"/> <i>Ich kann mir vorstellen, chemierelevante, nachhaltige Themen in meinem eigenen Chemieunterricht zu bearbeiten.</i> <input type="checkbox"/> <i>Die Themen des Chemieunterrichts bieten geeignete Anknüpfungspunkte, um nachhaltige Entwicklung zu thematisieren.</i> <input type="checkbox"/> <i>Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung spielen eine wichtige Rolle in meiner Schule.</i> <input type="checkbox"/> <i>Ich verfüge über Experimente, die nachhaltige Ansätze in der Chemie unterstreichen.</i> <input type="checkbox"/> <i>Ich wünsche mir mehr unterrichtsrelevante Versuche, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen.</i> |
| <p><u>Mehrfachauswahl-Frage:</u> <i>Besonders wichtig für die Umsetzung einer Bildung für nachhaltige Entwicklung sind die Fächer: Religion/Ethik, Mathematik, Chemie, Geografie, Deutsch, Informatik, Biologie, Wirtschaft & Recht, Fremdsprachen, Physik Geschichte P-/W-Seminar</i></p> | | |
| <p><u>Rating-Skala:</u> Für wie wichtig halten Sie ein Bildung für nachhaltige Entwicklung im Schulunterricht auf einer Skala von 0 bis 10 (0 = überhaupt nicht wichtig, 10 = ziemlich wichtig) [131]:</p> <p>a) Im Allgemeinen b) Im Chemieunterricht</p> | | |
| <p><u>Offene Frage:</u> <i>Welche lehrplanrelevanten Themen sind Ihrer Meinung nach geeignet, um Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht zu implementieren?</i></p> | | |
| Motivation zur Teilnahme an Lehrkräftefortbildungen | | |
| Soziale Interaktion | Rzejak et. al. (2014) [63] (4) | <input type="checkbox"/> <i>...ich Kontakte zu Kollegen an anderen Schulen pflegen kann.</i> <input type="checkbox"/> <i>...ich den kollegialen Austausch suche.</i> <input type="checkbox"/> <i>...ich Kontakt zu Kollegen mit ähnlichen Interessen knüpfen kann.</i> <input type="checkbox"/> <i>...ich an den Erfahrungen anderer Kollegen teilhaben will.</i> |

| | | |
|---|-----------------------------------|--|
| Externale Erwartungsanpassung | Rzejak et. al. (2014) [63] (4) | <input type="checkbox"/> ...ich im Kollegium nicht unangenehm auffallen will. <input type="checkbox"/> ...ich dazu verpflichtet bin. <input type="checkbox"/> ...ich sonst mit Restriktionen rechnen muss. <input type="checkbox"/> ...ich von meinen Kollegen für das Einbringen neuer Ansätze Anerkennung erhalte. |
| Karriereorientierung | Rzejak et. al. (2014) [63] (3) | <input type="checkbox"/> ...ich meine Aufstiegschancen erhöhen kann. <input type="checkbox"/> ...ich mich für Leitungsfunktionen / Funktionsstellen qualifizieren will. <input type="checkbox"/> ...ich in eine höhere Gehaltsstufe kommen möchte. |
| Entwicklungsorientierung | Rzejak et. al. (2014) [63] (4) | <input type="checkbox"/> ...ich dort Anleitung zur Lösung von Problemen im Schulalltag erwarte. <input type="checkbox"/> ...ich up-to-date sein möchte über neue Experimente für den Chemieunterricht. <input type="checkbox"/> ...ich mich für methodisch-didaktische Innovationen interessiere. <input type="checkbox"/> ...ich meinen Unterricht nach dem neusten pädagogischen und didaktischen Forschungsstand ausrichten will. |
| Experimente im Chemieunterricht | Eigenentwurf (4) | <input type="checkbox"/> ...ich offen bin für neue Experimente für den Chemieunterricht. <input type="checkbox"/> Das Testen neuartiger Experimente für den Chemieunterricht bereitet mir Freude. <input type="checkbox"/> Neue Experimente in den Chemieunterricht einzubauen bedeutet für mich einen erheblichen Mehraufwand. <input type="checkbox"/> Ich bin motiviert, die neuen Experimente in meinem Unterricht durchzuführen. |
| Evaluation der präsentierten Experimente | | |
| Experiment: Persönliche Einschätzung | Eigenentwurf (5) | <input type="checkbox"/> Das vorgestellte Experiment entspricht meinen Vorstellungen an ein Schulexperiment. <input type="checkbox"/> Ich schätze das Interesse der Schülerinnen und Schüler an diesem Experiment als hoch ein. <input type="checkbox"/> Ich halte das Experiment für gelingsicher und reproduzierbar. <input type="checkbox"/> Ich sehe inhaltliche Umsetzungsschwierigkeiten im Unterricht. <input type="checkbox"/> Ich habe vor, das Experiment in meinem Chemieunterricht einzusetzen. |
| Experiment: Thematische Einschätzung | Eigenentwurf (6) | <input type="checkbox"/> Das Thema des Experiments besitzt großes Potential für die Unterrichtspraxis. <input type="checkbox"/> Das Experiment lässt sich gut in den Chemieunterricht integrieren. <input type="checkbox"/> Den Zusammenhang zu einer nachhaltigen Entwicklung kann ich klar erkennen. <input type="checkbox"/> Das Experiment lässt sich in der Schule mit den vorhandenen Mitteln problemlos durchführen. <input type="checkbox"/> Das Experiment eignet sich besonders als Lehrerdemonstrationsexperiment. <input type="checkbox"/> Das Experiment kann problemlos von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden. |

6.3 PUBLIKATION 7: Nachhaltigkeit als Thema in Chemieunterricht und Lehrkräftefortbildung – Ergebnisse einer standortübergreifende Lehrkräftebefragung

Dominik Diekemper und Stefan Schwarzer

Nachhaltigkeit als Thema im Chemieunterricht und Lehrkräftefortbildung – Ergebnisse einer länderübergreifenden Lehrkräftebefragung. In: Menthe, J.; Waitz, T. (Hrsg.): *BnE im Rahmen von Schule und Lehrkräftefortbildung*. Münster: Waxmann Verlag. (angenommen).

Beiträge der Autoren:

Die Lehrkräftefortbildung und Befragung wurde durch Dominik Diekemper konzipiert und durchgeführt. Das Manuskript wurde von Dominik Diekemper und Stefan Schwarzer verfasst.

Urheberrechte:

Abdruck für diese Dissertation mit freundlicher Genehmigung durch Waxmann Verlag GmbH, 48159 Münster. Alle Rechte vorbehalten.

Nachhaltigkeit als Thema in Chemieunterricht & Lehrkräftefortbildung

Ergebnisse einer standortübergreifenden Lehrkräftebefragung

1 Nachhaltigkeit im Trend. Auch für die Chemie.

Demeter, der Blaue Engel und FSC: Alle diese Siegel werben mit dem Konstrukt der Nachhaltigkeit und führen bei Konsumenten häufig zu einem angepassten Kaufverhalten (pwc 2019). Der breite Themenkomplex Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung ist Trend und Hype gleichermaßen. Bereits 2009 gaben 65 % der Jugendlichen an, sich mit nachhaltigen Themen auseinandergesetzt zu haben (Bertelsmann Stiftung 2009). Spätestens mit dem Aufkommen der Fridays for Future Bewegung ist Nachhaltigkeit, Klima- und Umweltschutz ein Thema der Jugendgeneration geworden und muss in zunehmenden Maße im Bildungssystem Berücksichtigung finden.

Die bildungspolitische Dimension der Nachhaltigkeit findet sich bereits im bekannten Brundtland-Bericht (1987). Mit der Rio-Konferenz 1992 und der Agenda 21 wurde Bildung für nachhaltige Entwicklung als zentraler Bestandteil beschlossen. Spätestens mit dem Ausrufen einer „Weltdekade nachhaltige Entwicklung 2005-2014“ stand der Wille zur Neuausrichtung des Bildungssystems auf der Tagesordnung.

Nach dem Anspruch der Kultusministerkonferenz (2007) ist Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) eine transdisziplinäre, gemeinschaftliche Aufgabe der gesamten Schule. Problemlagen und Themen sind fächerübergreifend und in unterschiedlichen Fachdomänen zu verorten (KMK 2007; Programm Transfer-21 2007; Hellberg-Rode 2011).

Mit der Verankerung im deutschen Bildungswesen war für den Bereich der Sekundarstufe II auch der Anspruch verbunden, BnE im Fachunterricht zu thematisieren. Diese Forderung, verbunden mit der Tatsache, dass die Chemie auch an einer nachhaltigen Zukunft forscht, verlangt auch vom Fachunterricht Chemie eine gezielte Implementierung. Daraus folgt ergänzend die Notwendigkeit die Thematik in Lehrkräftefortbildungen zu behandeln und auf diese Weise Lehrkräften zugänglich zu machen. Ähnlich wie bei den Umweltsiegeln stellt sich also für die Konzeption passender Lehrkräftefortbildungen und Planung chemiedidaktischer Forschung die Leitfrage: Wo lassen sich konkrete Anknüpfungspunkte zur Thematik Nachhaltiges im Chemieunterricht finden?

2 Chemie und BnE – eine gute Kombi

BnE kann als pädagogische Antwort auf das politische und gesellschaftliche Leitbild der Nachhaltigkeit gesehen werden (Grundmann und Overwien 2016) und der Wille zur Implementierung in die Bildung als eine der wichtigsten Maßnahmen auf dem Weg hin zu einer nachhaltigen Entwicklung (Kropp 2019).

Gleichzeitig ist festzustellen, dass die öffentliche Meinung der Gesellschaft zu Chemie und Chemieunterricht häufig negativ konnotiert ist. Die Naturwissenschaft Chemie wird – auch im Vergleich zu den Naturwissenschaften Biologie und Physik – als hauptsächlich ökologisch bedenklich, gefährlich und abstrakt beschrieben (Weßnigk und Euler 2014; Prenzel und Allolio-Näcke 2006; Burmeister et al. 2011).

Genau aus dieser Perspektive bietet die Umsetzung der Forderung zur Implementierung von BnE auch eine eigene Chance für den Chemieunterricht: Themen rund um Nachhaltigkeit sind gesellschaftlich anerkannt, bedienen einen positiven Trend und sind für die Zukunft der Menschheit unerlässlich. Der Schulunterricht im Fach Chemie vernachlässigt aber häufig die Einblicke in die aktuelle Fachforschung und damit das Aufzeigen des nachhaltigen und fortschrittlichen Charakters der Fachwissenschaft Chemie: Und dies obwohl weite Teile der chemischen Forschung aktuell auf nachhaltige Themen fokussiert und damit langfristig die Chemie einen wesentlichen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leistet (Koch 2017).

Die Frage nach dem „*Cui bono?*“ für den Chemieunterricht lässt sich also zusätzlich durch eine mögliche Imageverbesserung – neben der Verpflichtung eines Abbildes der realen Forschung in der Naturwissenschaft – begründen.

Schon die Dreidimensionalität der Nachhaltigkeit mit ihren Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales eignet sich außerdem für das Schaffen eines holistischen Bildes der Naturwissenschaften durch

fächerverbindenden oder fächerübergreifenden Unterricht. BnE soll vermehrt in alle Fächer integriert werden und diese stärker mit einem gesamtinstitutionellen Ansatz verbinden. Auch sind BnE Themen gesellschaftlich relevant, interessant für die Lernenden und geben Anlass zur Untersuchung von weiteren Wechselwirkungen, die häufig auch eine Verbindung zu den Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen möglich machen (Schreiber 2016).

Mit der oben genannten verbindlichen Festsetzung der BnE in den deutschen Schulunterricht wurden auch die Lehr- und Bildungspläne des innerdeutschen Bildungsföderalismus auf diese Gegebenheiten angepasst.

Das Thema Bildung für nachhaltige Entwicklung findet sich in den Lehrplänen häufig auf übergeordneter Ebene, als „fächerübergreifendes Bildungs- und Erziehungsziel“ in Bayern (ISB Bayern) oder „Leitperspektive“ in Baden-Württemberg (Kultusministerium BW 2016).

Mit den KMK-Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife im Fach Chemie (KMK 2020) wird außerdem bundeseinheitlich der Bildungsbeitrag der Chemie für eine Bildung für nachhaltige Entwicklung manifestiert. Auch „Aktuelle Technologien und chemische Produkte“ sind mit „Modernen Werkstoffen“ Teil dieses Kompetenzrahmens.

In die ländereigenen Fachlehrpläne, Fachanforderungen und Bildungspläne Chemie fand Nachhaltigkeit und BnE Einzug. So finden sich häufig unter den übergeordneten Fachprofilen (Bayern) oder dem Beitrag zu den Leitgedanken Formulierungen, wie „ressourcenschonender Umgang“ (Baden-Württemberg) und die Frage der Folgen und Auswirkungen des menschlichen Handelns auf die Umwelt (Bayern, Baden-Württemberg), häufig aber mit negativer Konnotation wie „Freisetzung von giftigen und umweltgefährdenden Substanzen“ (ISB Bayern), die nicht zwingend ein positives Licht auf die Wissenschaft werfen, in dem diese Inhalte thematisiert werden soll, die Chemie. Des Weiteren werden meist Schwerpunkte gesetzt wie Mobilität, Energiebilanzen und alternative Rohstoffe, so zum Beispiel in Niedersachsen.

Bereits 2013 wurde durch Burmeister et al. gezeigt, dass die deutschen Chemielehrkräfte ein intuitiv richtiges Verständnis vom Begriff Nachhaltigkeit haben, dass aber nicht theoriebasiert ist. Trotz aller Bemühungen auf politischer Seite, die Thematik Nachhaltigkeit im Unterricht zu implementieren, scheint es so, dass viele Lehrkräfte aufgrund externaler Faktoren insbesondere im Chemieunterricht nur wenig Anknüpfungspunkte sehen. So zeigte sich auch in einer eigenen Interview-Pilotstudie (n=13) im Rahmen der in diesem Beitrag vorgestellten Lehrkräftefortbildung, dass viele Lehrkräfte dem Chemieunterricht eher eine untergeordnete Rolle zuordnen, wenn es um nachhaltige Themen und Unterrichtskonzepte geht (Mühlbauer 2020):

„[...] [BNE] kommt immer mehr in letzter Zeit. [...] Aber so konkretisiert ist es [...]noch nicht so ganz, meiner Meinung nach.“

„an diversen Stellen streue ich das natürlich jederzeit in meinen Unterricht ein, aber so konkret längere Zeit mit der Thematik [befassen] – oder – kann man sich eigentlich nicht. Zumindest nicht in den Fächern Biologie und Chemie.“

„Wir müssen da irgendwie was entwickeln[...] was man dann dazu auch unterrichten soll eigentlich [...].“

Gerade diese Aussagen erfahrener Lehrkräfte sollten für die Fachdidaktik Chemie in Zusammenarbeit mit der Fachwissenschaft weiterhin Anreiz sein, passende Unterrichtsmaterialien und Experimente zu entwickeln. Diese können auf der einen Seite den fortschrittlichen und nachhaltigen Charakter der chemischen Fachforschung aufzeigen, sind gleichzeitig aber auch schulgeeignet. Die entwickelten Experimentierstationen, die im Rahmen der im Folgenden beschriebenen Fortbildung den teilnehmenden Lehrkräften aus Bayern und Baden-Württemberg präsentiert wurden, verbinden eben jenen Charakter des „Modernen Materials“ mit dem Aspekt der chemischen Forschung an einer nachhaltigen Entwicklung.

3 Fortbildung „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“

Die deutschsprachige Forschung zur Lehrkräftefortbildung steckt im Allgemeinen, aber auch im Speziellen für das Unterrichtsfach Chemie in den Kinderschuhen (Rauin 2014). Dabei zeigen vorhandene Untersuchungen zur dritten Phase der Lehrkräftebildung, dass Inhalte der Fortbildungen unmittelbar in unterrichtliches Handeln umsetzbar sein sollen, Kohärenz zu schulischen und länderspezifischen Vorgaben vorhanden sein sollen und für Chemielehrkräfte höchste Priorität hat, schulrelevante Experimente kennenzulernen sowie aktuelle

fachliche Bezüge aufzuzeigen (Göb 2018; Huber und Radisch 2010; Daus et al. 2004). Lehrkräftefortbildungen sollen aus Sicht der Teilnehmenden „close to the job“ sein (Lipowsky 2010). Hieran orientiert sich auch die konzipierte Fortbildung „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“, die im Folgenden vorgestellt wird.

Die ganztägige Veranstaltung besteht aus einem Impulsvortrag und einem Experimentierpraktikum, wobei das Hauptaugenmerk auf dem selbstständigen Erproben und Experimentieren der Lehrkräfte liegt (Abb. 1). Im vorangestellten Impulsvortrag wird ein fundiertes wissenschaftliches Verständnis über den Begriff der Nachhaltigkeit vermittelt, im Weiteren dann zugeschnitten auf Chancen für das Unterrichtsfach Chemie.

Der Vortrag verfolgt auch das Ziel, für die einzelnen Experimente das notwendige Hintergrundwissen zu vermitteln und den Bezug sowohl zum Thema der Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung als auch die klare Verbindung zur aktuellen Fachforschung herzustellen.

In der anschließenden Experimentierphase führen die Lehrkräfte die Experimente eigenständig und selbstgesteuert in Zweiergruppen durch.

Die Fortbildung stellt also auch gezielt die von der Literatur geforderte Verschränkung von Input-, Erprobungs-/Experimentierphasen und Reflexionsphasen her (Lipowsky und Rzejak 2021).

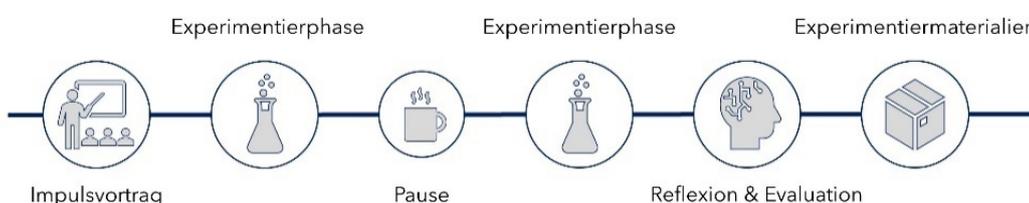


Abbildung 1: Ablauf der Lehrkräftefortbildung „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“

Um den Transfer der Experimente und der Inhalte in den Schulunterricht zu vereinfachen, erhalten die Lehrkräfte zum Abschluss neben einer offiziellen Teilnahmebestätigung auch ein Experimentierset kostenfrei zur Verfügung gestellt, sodass die Experimente in der schuleigenen Chemiesammlung sowohl weiter erprobt als auch im Unterricht direkt durchgeführt werden können. Zu allen Experimenten wird außerdem digitales Lehr- und Lernmaterial zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der Fortbildung (Abb. 2) wurden die folgenden Experimente erprobt:

- Mikrowellensynthese des Leuchtstoffs YAG:Ce und Herstellung einer selbstbeschichteten LED (Diekemper et al. 2020, 2019)
- Vom Abwasser zum „Functional Food“: Ein Antioxidans aus der Olive
 - Antioxidative Wirkung in der WELL-Plate (Diekemper et al. 2021b)
 - Nachweis mit Knicklichtern (Wieczorek und Sommer 2011)
 - Luminol Bubble Tea (Diekemper et al. 2021a)
- Spurenstoffe im Abwasser und 4. Reinigungsstufe im Klärwerk: Das Schmerzmittel Diclofenac
- Herstellung einer „grünen“ Wunderkerze (Scheid et al. 2021)
- Lotos-Effekt auf einer Kupferoberfläche (Bethke et al. 2017)

Die Teilnehmenden der Fortbildung wurden vor und nach der Veranstaltung mit einem papiergebundenen Fragebogen befragt. Der Fragebogen enthielt neben Fragen zur Person sowohl standardisierte als auch teilstandardisierte Fragen zu den Aspekten: Begriffsverständnis Nachhaltigkeit, Nachhaltigkeit in Studium und Referendariat im Chemieunterricht, Motivation zur Teilnahme an Lehrkräftefortbildungen und eine Evaluation der vorgestellten Experimentierstationen. Beispielitems sind in Tabelle 1 aufgeführt. An der Befragung nahmen insgesamt 36 aktive Lehrkräfte während sechs Veranstaltungen, davon 21 aus Bayern und 15 aus Baden-Württemberg, teil. Eine höhere Stichprobe war geplant, aber durch die Corona-Krise und den damit verbundenen Einschränkungen für Lehrkräfte und Universität nicht realisierbar.

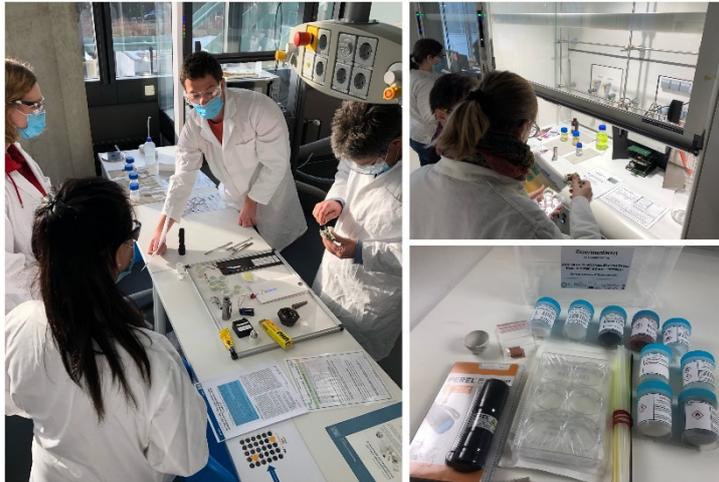


Abbildung 2: Selbstgesteuerte Experimentierphase in der Lehrkräftefortbildung und Experimentiersets für die Lehrkräfte

4 Ergebnisse der Lehrkräftebefragung

Begriffsverständnis Nachhaltigkeit: Um auch im Chemieunterricht Themen rund um Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung thematisieren zu können und mit Fachinhalten der Chemie zu verbinden, ist ein fundiertes Begriffsverständnis des Terminus „Nachhaltigkeit“ erforderlich. Um den diesbezüglichen Kenntnisstand bei den Chemielehrkräften zu erfassen, wurden diese vor Beginn der Fortbildungsveranstaltung im Fragebogen um eine möglichst „konkrete Definition“ von Nachhaltigkeit gebeten. Ein Großteil der Lehrkräfte, 63 % verband den Begriff mit Ressourcenschonung, ohne aber die drei Dimensionen von Nachhaltigkeit aufzugreifen. Lediglich 22 % beriefen sich definitorisch auf diese Dimensionen. Häufig werden auch „nachfolgende Generationen“ mit in die intuitiv verfasste Definition mit einbezogen. Stellvertretend für die große Zahl an Definitionen können folgende Zitate angeführt werden:

„Etwas, das einen langfristigen Nutzen mit sich bringt.“

„Schonender Umgang mit Ressourcen im Hinblick auf nachfolgende Generationen.“

Auffällig ist gleichwohl, dass knapp drei Viertel der befragten Lehrkräfte vor der Veranstaltung angaben, mit dem Konzept der Nachhaltigkeit vertraut zu sein. In den zuvor getätigten Definitionen zeigen sich aber nur Teilaspekte einer umfassenden Begriffsdefinition (z.B. auf Grundlage des 3-Säulen-Modells).

Mehr als 80 % der Befragten hielten Nachhaltigkeit für ein wichtiges Thema und nahezu alle Lehrkräfte stimmen darin überein, dass das Thema Nachhaltigkeit in Zukunft immer wichtiger wird in der Schule.

Im Rahmen des Impulsvortrages wurde ausführlich die Begriffe Nachhaltigkeit und BnE definiert, sodass im Anschluss an die Veranstaltung 78 % der Lehrkräfte die Definition auf Basis des Drei-Säulen-Modells beantworten konnten. Insgesamt sind die Ergebnisse vor der Veranstaltung im Einklang mit Burmeister et. al. (2013).

Tabelle 4: Auswahl an Beispielimens des Fragebogeninstruments

| Skala | n Items | Beispielimens | Cronbachs α |
|---|---------------------|---|--------------------|
| Begriffsverständnis Nachhaltigkeit/BnE | 5 (Eigenentwurf) | <i>Das Konzept hinter dem Begriff Nachhaltigkeit ist mir vertraut. Ich halte Nachhaltigkeit für ein Thema, das in Zukunft immer wichtiger wird. Das Konzept Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) ist mir vertraut.</i> | .680 |
| Nachhaltigkeit in der Ausbildung | 3 (Eigenentwurf) | <i>Im Rahmen meines... ...Studiums bin ich mit Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) in Berührung gekommen ...Referendariats bin ich mit Bildung für nachhaltige Entwicklung (BnE) in Berührung gekommen ...Nachhaltigkeit und BnE waren bereits Thema einer Fortbildung, die ich besucht habe.</i> | .742 |
| Nachhaltigkeit im Chemieunterricht | 3 (Eigenentwurf) | <i>Nachhaltigkeit ist ein Thema, das aktuell im Chemieunterricht eine Rolle spielt. Nachhaltigkeit im Chemieunterricht halte ich für einen Aspekt, der die Schülerinnen und Schüler interessiert.</i> | .641 |

Nachhaltigkeit als Teil von Studium und Referendariat: Aufschlussreich sind die Angaben der Lehrkräfte zum Thema Nachhaltigkeit in der ersten bis dritten Phase des eigenen beruflichen Werdegangs: Der Großteil der Lehrkräfte ist nach eigenen Angaben weder während des Studiums noch während des Referendariats in Kontakt mit Inhalten zur Nachhaltigkeit und Bildung für nachhaltige Entwicklung gekommen. Auch besuchte nahezu keine der Lehrkräfte bisher eine Fortbildung zu diesen Themen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Bundesländern ist bei der Frage nach BnE im Referendariat erkennbar: So kommen die Referendare in Baden-Württemberg häufiger in Kontakt mit BnE während der zweiten Phase ihrer Ausbildung als bayerische Lehrkräfte ($t(31) = 2,982, p = .006$). Aus den Zahlen lässt sich tendenziell selbiges für die Phase des Studiums erkennen. Diese Tatsache lässt sich möglicherweise auch aus den unterschiedlich strukturierten Lehr- bzw. Bildungsplänen begründen: Im Baden-Württembergischen Bildungsplan sind passende Themen für das Fach Chemie direkt mit der Leitperspektive BnE verknüpft (Kultusministerium BW 2016). In Anbetracht der geringen Stichprobengröße sind alle diskutierten Ergebnisse der Fragebogenerhebung unter Vorbehalt zu sehen.

Rolle von Nachhaltigkeit im Chemieunterricht:

Grundsätzlich messen die befragten Chemielehrkräfte auf einer Skala von 0-10 (0 = überhaupt nicht wichtig bis 10 = ziemlich wichtig) dem Thema Nachhaltigkeit „im Allgemeinen“ einen hohen Stellenwert zu (9,06) als auch „im Chemieunterricht“ (8,44). Speziell auf das Unterrichtsfach Chemie bezogen, nannten schon in der vorangestellten Interview-Erhebung Lehrkräfte als lehrplanrelevante Anknüpfungspunkte für Nachhaltigkeit im Chemieunterricht insbesondere Elektrochemie (Brennstoffzelle, Batterien/Akkumulatoren, E-Mobilität), Kunststoffe (Biopolymere, Mikroplastik) und Kohlenwasserstoffe (Alkane, fossile Brennstoffe) und organische Chemie im Allgemeinen. Diese Präferenzen ließen sich auch innerhalb der Fragebögen vor der

Fortbildung klar erkennen und weisen auch eindeutig auf die geltenden Lehr- und Bildungspläne der beiden Bundesländer hin, in welchen diese Themen die Implementierung einer BnE ermöglichen bzw. wünschen. Einheitlich zeigte sich, dass die Teilnehmenden sich vorstellen können, chemierelevante, nachhaltige Themen in ihrem eigenen Chemieunterricht zu bearbeiten ($M = 0,19$, $SD = ,401$ mit Skala 0-4: trifft zu, trifft eher zu, teils trifft eher nicht zu, trifft nicht zu) und, dass die Themen des Chemieunterrichts geeignete Anknüpfungspunkte bieten, um nachhaltige Entwicklung zu thematisieren ($M = 0,44$, $SD = ,695$). Gleichwohl wünschen sich die Teilnehmenden mehr unterrichtsrelevante Versuche, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen ($M = 0,39$, $SD = ,728$).

Evaluation der vorgestellten Experimente

Zentraler Bestandteil der Fortbildungsveranstaltung war die selbstgesteuerte Durchführung der Experimente. Die Experimente wurden im Anschluss an die Fortbildung ebenfalls papiergebunden mit einem Fragebogen evaluiert. Die Bewertung mit Schulnoten zeigen im Mittel eine positive Einschätzung zu den Experimenten (durchschnittliche (Schul-)Note: 1,78), wobei besonders phänomenologisch eindrucksvolle Experimente wie der lumineszierende Bubble-Tea (Diekemper et al. 2021a) – trotz vergleichsweise aufwändiger Durchführung – besonders positiv (1,33) bewertet wurden.

Aus den erhobenen Einschätzungen der Lehrkräfte zu den vorgestellten Experimenten geht hervor, dass der Bezug zum Oberthema Nachhaltigkeit bei allen Experimenten für die Teilnehmenden erkennbar war. Aus den Daten lässt sich aber erkennen, dass es keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Bewertung der Nachhaltigkeit und dem Einsatz des Experiments im Chemieunterricht gab. Andererseits schätzen die Lehrkräfte das Potential für die Unterrichtspraxis signifikant höher ein, wenn der Zusammenhang zum Thema Nachhaltigkeit für sie klar erkennbar ist ($r = ,438$; $p < ,001$; $N = 36$).

Entscheidend scheint die mögliche inhaltliche Anbindung an den Unterricht ($r = ,603$; $p < ,001$; $N = 36$) zu sein. Genauso wichtig sind praktische Aspekte in der Durchführbarkeit. Obwohl die Chemikalien für die Durchführung nach Ende der Veranstaltung zur Verfügung gestellt wurden, war die Notwendigkeit weitere Materialien und Laorgeräte, z.B. eine Haushaltsmikrowelle für die Herstellung des Leuchtstoffes, zur Verfügung zu haben ein entscheidendes Hemmnis. Auf die Durchführung im Chemieunterricht scheint das geschätzte Interesse der Schülerinnen und Schüler einen signifikanten Einfluss zu haben ($r = ,382$; $p < ,001$; $N = 36$). Wenn das Experiment von Schülerinnen und Schülern problemlos selbst durchgeführt werden kann, steigt auch der Wille, dieses im Chemieunterricht einzusetzen ($r = ,458$; $p < ,001$; $N = 36$).

5 Diskussion, Ausblick und Fazit

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen der Befragung vorläufig schlussfolgern, dass der Bedarf an weiteren Fortbildungsveranstaltungen zum Thema Nachhaltigkeit dringend gegeben ist, um BnE auch in den Chemieunterricht zu integrieren. Insgesamt zeigen sich die Lehrkräfte der beiden Bundesländer aber gleichermaßen sehr offen für nachhaltige Themen im Chemieunterricht.

Sowohl in den qualitativen Definitionen und Kommentaren der Lehrkräfte in den Fragebögen, aber auch im persönlichen Gespräch fällt auf, dass in der grundsätzlich als sinnvoll zu erachtende Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Chemieunterricht der Ansatzpunkt für Unterrichtskonzepte und Denkweisen häufig die chemiegemachte Schäden und deren Begrenzung sind. Umweltschäden und -verschmutzung, Gefahrstoffe und deren Substitution und Chemieunfälle scheinen die greifbarsten Beispiele, um Nachhaltigkeit im Chemieunterricht zu thematisieren. Zu bezweifeln ist aber, ob dies förderlich für eine positive Grundhaltung gegenüber der Chemie sein kann. Wie es scheint, sind aber seitens der Lehrkräfte die Möglichkeiten einer Umsetzung von BnE im Chemieunterricht gegeben, sofern die Lehr- und Bildungspläne die gezielte Thematisierung zulassen und dafür Zeiträume vorsehen.

Danksagung

Die Autoren danken dem Fonds der Chemischen Industrie für die großzügige finanzielle Unterstützung der Lehrkräftefortbildungen durch die Finanzierung von Experimentiermaterialien für die Lehrkräfte. Ebenfalls sei den GDCh-Lehrerfortbildungszentren an der Universität Erlangen-Nürnberg und an der Pädagogischen Hochschule Karlsruhe für die organisatorische Unterstützung gedankt.

Literaturverzeichnis

Bertelsmann Stiftung (2009): Jugend und die Zukunft der Welt. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage in Deutschland und Österreich „Jugend und Nachhaltigkeit“. Wien/Gütersloh.

Bethke, Christine; Adelung, Rainer; Schwarzer, Stefan (2017): Generierung einer mikro- und nanostrukturierten Kupferoberfläche mit Lotos-Effekt – Ein Versuch für die Sekundarstufen I und II. In: *CHEMKON* 24 (1), S. 31–38.

Burmeister, Mareike; Jokmin, Sebastian; Eilks, Ingo (2011): Bildung für nachhaltige Entwicklung und Green Chemistry im Chemieunterricht. In: *CHEMKON* 18 (3), S. 123–128.

Burmeister, Mareike; Schmidt-Jacob, Sabine; Eilks, Ingo (2013): German chemistry teachers' understanding of sustainability and education for sustainable development—An interview case study. In: *Chem. Educ. Res. Pract.* 14 (2), S. 169–176.

Daus, Jessica; Pietzner, Verena; Höner, Kerstin; Scheuer, Rupert; Melle, Insa; Neu, Christoph et al. (2004): Untersuchung des Fortbildungsverhaltens und der Fortbildungswünsche von Chemielehrerinnen und Chemielehrern. In: *CHEMKON* 11 (2), S. 79–85.

Diekemper, Dominik; Baltjan, Gudrun; Schwarzer, Stefan (2021a): Luminol-Bubble-Tea – Antioxidantien und das Leuchten der Alginatbällchen. (im Druck). In: *CHEMKON*.

Diekemper, Dominik; Pölloth, Benjamin; Schwarzer, Stefan (2021b): From Agricultural Waste to a Powerful Antioxidant: Hydroxytyrosol as a Sustainable Model Substance for Understanding Antioxidant Capacity (im Druck). In: *J. Chem. Educ.*

Diekemper, Dominik; Schnick, Wolfgang; Schwarzer, Stefan (2019): Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting. In: *J. Chem. Educ.* 96 (12), S. 3018–3024.

Diekemper, Dominik; Schnick, Wolfgang; Schwarzer, Stefan (2020): Aus blau wird weiß – Beitrag der Chemie zu einer nachhaltigen Beleuchtung am Beispiel eines LED-Leuchtstoffs. In: *CHEMKON*.

Göb, Nadine (2018): Wirkungen von Lehrerfortbildung. Eine explorative Betrachtung von Fortbildungstypen und deren Effekte auf die Teilnehmenden am Beispiel des Pädagogischen Landesinstituts Rheinland-Pfalz. 1. Auflage. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.

Grundmann, Diana; Overwien, Bernd (2016): Bildung für nachhaltige Entwicklung in Schulen verankern. Dissertation. Universität Kassel, Kassel.

Hellberg-Rode, Gesine (2011): Aus Bildung und Wissenschaft-Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: *Mathematische und Naturwissenschaftliche Unterricht* 64 (2), S. 68.

Huber, Stephan; Radisch, Falk (2010): Wirksamkeit von Lehrerfort- und -weiterbildung. Ansätze und Überlegungen für ein Rahmenmodell zur theoriegeleiteten empirischen Forschung und Evaluation. In: Wolfgang Böttcher, Jan Nikolas Dicke und Nina Hogrebe (Hg.): Evaluation, Bildung und Gesellschaft. Steuerungsinstrumente zwischen Anspruch und Wirklichkeit. Münster u.a.: Waxmann, S. 337–354.

ISB Bayern: LehrplanPLUS. Hg. v. Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung (ISB). Online verfügbar unter <https://www.lehrplanplus.bayern.de/>, zuletzt geprüft am 27.05.2021.

Koch, Wolfram (2017): Ethische Grundsätze als Leitlinien der Gesellschaft Deutscher Chemiker. In: Marc-Denis Weitze, Joachim Schummer und Thomas Geelhaar (Hg.): Zwischen Faszination und Verteufelung: Chemie in der Gesellschaft. Berlin: Springer Spektrum, S. 121–129.

KMK (2007): Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule. Online verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2007/2007_06_15_Bildung_f_nachh_Entwicklung.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2021.

KMK (2020): Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife. Online verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Chemie.pdf, zuletzt geprüft am 27.05.2021.

Kropp, Ariane (2019): Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung. 1. Auflage 2019. Wiesbaden, Germany: Springer Gabler.

Kultusministerium BW (2016): Bildungsplan Baden-Württemberg. Gymnasium - Chemie. Online verfügbar unter <http://www.bildungsplaene-bw.de/Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/CH>.

- Lipowsky, Frank (2010): Lernen im Beruf–Empirische Befunde zur Wirksamkeit von Lehrerfortbildung. In: Florian H. Müller, Astrid Eichelberger, Manfred Lüders und Johann Mayr (Hg.): Lehrerinnen und Lehrer lernen. Konzepte und Befunde zur Lehrerfortbildung, Bd. 1. Münster u.a.: Waxmann, S. 51–72.
- Lipowsky, Frank; Rzejak, Daniela (2021): Fortbildungen für Lehrpersonen wirksam gestalten. Online verfügbar unter https://www.bertelsmann-stiftung.de/index.php?id=5772&tx_rsmbstpublications_pi2%5bdoi%5d=10.11586/2020080&no_cache=1, zuletzt geprüft am 27.05.2021
- Mühlbauer, Jakob (2020): Die experimentelle Einbindung von Nachhaltigkeit durch gymnasiale Lehrkräfte im Fach Chemie. Eine qualitative Inhaltsanalyse. Zulassungsarbeit zur Ersten Staatsprüfung. Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- Prenzel, Manfred; Allolio-Näcke, Lars (Hg.) (2006): Untersuchungen zur Bildungsqualität von Schule. Abschlussbericht des DFG-Schwerpunktprogramms. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Münster: Waxmann.
- Programm Transfer-21 (2007): Orientierungshilfe Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Sekundarstufe I. Begründungen, Kompetenzen, Lernangebote. Online verfügbar unter <http://www.transfer-21.de/index90dd.html?p=280>, zuletzt geprüft am 18.03.2021.
- pwc (2019): Surviving the Retail Apocalypse. What to learn from “Clicks-to-bricks”. Online verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/human-resources/studie-surviving-the-retail-apocalypse.pdf>, zuletzt geprüft am 28.05.2021.
- Rauin, Udo (2014): Forschung zur Lehrerbildung aus nationaler und internationaler Perspektive. In: Ewald Terhart, Hedda Bennewitz und Martin Rothland (Hg.): Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. Münster, New York: Waxmann, S. 441–447.
- Scheid, Michael; Rusan, Magdalena; Klapötke, Thomas M.; Schwarzer, Stefan (2021): The production of less harmful and less toxic sparklers in an experiment for school students. In: *Chemistry Teacher International*.
- Schreiber, Jörg-Robert (Hg.) (2016): Orientierungsrahmen der Kultusministerkonferenz. Orientierungsrahmen für den Lernbereich globale Entwicklung im Rahmen einer Bildung für nachhaltige Entwicklung. Ein Beitrag zum Weltaktionsprogramm „Bildung für nachhaltige Entwicklung“. Berlin: Cornelsen.
- Weßnigk, Susanne; Euler, Manfred (2014): Wie die Produktion von Eierlöffeln das Image von Chemie und Physik verändern kann. In: *CHEMKON* 21 (3), S. 123–128.
- Wieczorek, Robert R.; Sommer, Katrin (2011): Demonstrating the Antioxidative Capacity of Substances with Lightsticks. In: *J. Chem. Educ.* 88 (4), S. 468–469.

6.4 Motivation zur Teilnahme an Lehrkräftefortbildungen

In Anlehnung an das in Kapitel 4 vorgestellte Angebots-Nutzungsmodell für Fort- und Weiterbildung [69] werden zur Bestimmung von Determinanten für die Fortbildungsmotivation auch personenbezogene Merkmale der Fortbildungsteilnehmenden mit einbezogen, da neben der Qualität der Veranstaltung auch der qualitative Charakter der Motivation zur Teilnahme als bedeutend für den Lernerfolg zu erachten ist [63].

Grundsätzlich lässt sich das Konstrukt Motivation nach Deci und Ryan (1993) [132] in eine extrinsische und eine intrinsische Motivation unterteilen. Diese Unterteilung findet auch im Rahmen des *Education Participation Scale* (E.P.S.) Anwendung, der hier zur Beurteilung der Fortbildungsmotivation adaptiert wurde. Zur Abschätzung der Fortbildungsmotivation wurde auf Items und Instrumente von Rzejak et. al. (2014) [63] zurückgegriffen. Der E.P.S. wird im angloamerikanischen Raum häufig zur Abschätzung der Motivation in der Erwachsenenbildung verwendet und ist, angepasst auf die Gegebenheiten der Lehrkräftefortbildung in Deutschland, in vier Faktoren unterteilt: Soziale Interaktion, Externale Erwartungsanpassung, Karriereorientierung und Entwicklungsorientierung. Die dazugehörigen Skalen und die Mittelwerte und Standardabweichungen der Items für die Stichprobe der hier untersuchten Lehrkräftefortbildungen sind Tabelle 5 in dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Items der einzelnen Faktoren (0 = trifft zu bis 4 = trifft nicht zu)

| <i>Grundsätzlich nehme ich an Fortbildungen teil, weil...</i> | α | M | SD |
|--|----------|------|------|
| Faktor Soziale Interaktion | ,87 | 1,14 | ,840 |
| <i>...ich Kontakte zu Kollegen an anderen Schulen pflegen kann.</i> | | 1,54 | 1,26 |
| <i>...ich den kollegialen Austausch suche.</i> | | ,94 | ,83 |
| <i>...ich Kontakt zu Kollegen mit ähnlichen Interessen knüpfen kann.</i> | | 1,33 | ,98 |
| <i>...ich an den Erfahrungen anderer Kollegen teilhaben will.</i> | | ,72 | ,85 |
| Faktor Externale Erwartungsanpassung | ,59 | 3,42 | 0,74 |
| <i>...ich im Kollegium nicht unangenehm auffallen will.</i> | | 3,94 | ,24 |
| <i>...ich dazu verpflichtet bin.</i> | | 3,42 | 1,05 |
| <i>...ich sonst mit Restriktionen rechnen muss.</i> | | 3,91 | ,28 |
| Faktor Karriereorientierung | ,92 | 3,31 | 1,02 |
| <i>...ich meine Aufstiegschancen erhöhen kann.</i> | | 3,40 | ,98 |
| <i>...ich mich für Leitungsfunktionen/Funktionsstellen qualifizieren will.</i> | | 3,23 | 1,14 |
| Faktor Entwicklungsorientierung | ,67 | 0,57 | 0,42 |
| <i>...ich up-to-date sein möchte über neue Experimente für den Chemieunterricht.</i> | | ,28 | ,51 |
| <i>...ich mich für methodisch-didaktische Innovationen interessiere.</i> | | ,25 | ,50 |
| <i>...ich meinen Unterricht nach dem neusten pädagogischen und didaktischen Forschungsstand ausrichten will.</i> | | ,61 | ,73 |

Auf Basis der Antworten der teilnehmenden Lehrkräfte lassen sich Vermutungen über die Motivation zur Teilnahme aufstellen: So scheinen die vorwiegend extrinsisch orientierten Faktoren Karriereorientierung und Externale Erwartungsanpassung eine vergleichsweise untergeordnete Rolle in dieser Stichprobe zu spielen. Hier lässt sich auch an die bereits getätigten Aussagen über die Entkoppelung von Leistungs- und Laufbahnentwicklung anschließen [56]. Wenngleich alle deutschen Beamten zur Fortbildung verpflichtet sind, hat weder die Teilnahme noch Nichtteilnahme einen bedeutenden Effekt auf die Laufbahnentwicklung.

Insbesondere die Entwicklungsorientierung und Möglichkeit zur sozialen Interaktion scheinen entscheidend für die Teilnahme. Damit zeigt sich auf Grundlage der erhobenen Daten, dass bei den Lehrkräften – wenn sie an der Lehrkräftefortbildung teilnehmen – vorrangig von intrinsischer Motivation ausgegangen werden kann. Allerdings darf hierbei der Einfluss der Pandemie-Lage nicht unbeachtet bleiben: Die teilnehmenden Lehrkräfte haben trotz der massiven Einschränkungen eine Fortbildung besucht, sodass davon ausgegangen werden darf, dass sie insgesamt hauptsächlich intrinsisch motiviert und interessiert an der Thematik waren.

Fraglich ist an dieser Stelle der Einfluss auf den gewünschten Transfer der Experimente und Inhalte in den Schulunterricht und damit eine Abschätzung auf Grundlage der erhobenen Daten. Die Auswertung der Daten zeigt eine kleine bis mittlere Korrelation zwischen der individuellen Entwicklungsorientierung (intrinsische Motivation) der Teilnehmenden und dem Vorhaben, das Experiment auch im Unterricht einzusetzen ($r = ,296$; $p = ,079$; $N=36$). Gleichzeitig zeigt sich aber auch, dass die einfache Erfassung mittels der Erteilung einer Schulnote für die einzelnen Mittel stark mit der Intention zusammenhängt, das Experiment im Schulunterricht einzusetzen ($r = ,567$; $p < ,001$; $N=36$).

Grundsätzlich lässt sich also aus den Werten zur intrinsischen Motivation der Lehrkräfte, ihrer Beurteilung in Schulnoten und der Antworten auf das Vorhaben, die Experimente im Unterricht einzusetzen, schlussfolgern, dass die Wahrscheinlichkeit existiert, dass die Experimente im Schulunterricht Einsatz finden. Die teilnehmenden Lehrkräfte waren alle grundsätzlich interessiert und motiviert an Thema und präsentierten Experimenten, sodass sich dies förderlich auf mögliche verbliebene Hemmnisse (Chemikalienbestand, Vorbereitungs-Aufwand etc.) auswirken könnte.

6.5 Ergebnisse der Evaluation der Experimente

Die in den Fortbildungen präsentierten und erprobten Experimente wurden durch die beteiligten Lehrkräfte jeweils einzeln bewertet. 11 Likert-skalierte Items zielen hier auf die persönliche und thematische Einschätzung zu dem jeweiligen Experiment ab (Tabelle 3).

Die präsentierten Experimente sind im Schnittfeld Modernes Material und Nachhaltigkeit angesiedelt und verbinden den innovativen Charakter mit dem Aspekt der Nachhaltigkeit für den Chemieunterricht. Fraglich war vorab, inwiefern Lehrkräfte über Versuche verfügen, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen.

In der Befragung als Teil der Lehrkräftefortbildung gaben die Lehrkräfte an, dass sie tendenziell zu wenige verfügbare Experimenten haben, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen ($M = 2,67$, $SD = 0,956$ mit $0 =$ trifft zu bis $4 =$ trifft nicht zu) und dass mehr unterrichtsrelevante Experimente gewünscht werden, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen ($M = 0,39$, $SD = 0,728$).

Zudem wurden die Lehrkräfte im Fragebogen gebeten, eine Schulnote für jedes Experiment zu vergeben (Tabelle 6). Insgesamt schnitten alle Experimente mit positiv zu beurteilenden Noten ab, sodass das Ziel der Eignung für die Schule – aus Sicht der Lehrkräfte – grundsätzlich bestätigt werden kann.

Tabelle 6: Durchschnittliche Bewertung der Lehrkräfte zur Schultauglichkeit (Note 1 = sehr gut für die schule geeignet - Note 6 = für die Schule ungeeignet)

| Experiment | Leuchtstoff -synthese | Antioxidans WELL-Plate | Antioxidans Knicklicht | Antioxidans Bubble-Tea | Diclofenac im Abwasser |
|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Durchschnittsnote | 2,06 | 1,94 | 1,53 | 1,33 | 2,03 |
| Std.-Abweichung | ,725 | ,860 | ,609 | ,535 | ,923 |

Das Experiment Leuchtstoffsynthese von YAG:Ce war außerdem Teil der Interviewstudie, in welcher der Versuch den befragten Lehrkräften einzeln vorgestellt wurde, sodass auch auf diese qualitativen Ergebnisse im Folgenden zurückgegriffen wird.

Orientiert an der Forschungsfrage III gilt es aber grundsätzlich zu evaluieren, ob die teilnehmenden Lehrkräfte die Experimente auch in ihrem eigenen Unterricht umsetzen wollen. Wie Abb. 27 für alle fünf entwickelten Experimente zusammenfassend darstellt, zeigen sich hierbei Unterschiede: Besonders Experimente mit eindrucksvollem, visuellem Effekt und einfacher Durchführung ohne Notwendigkeit von Gerätschaften (Mikrowelle, UV-Vis-Gerät) werden von den Lehrkräften im Schulunterricht verwendet. Insgesamt scheint die Wahrscheinlichkeit groß, dass die entwickelten Experimente auch in die

Schulpraxis Einzug finden. Besonders für den Versuch Luminol-Bubble-Tea gilt dies anzunehmen und könnte begründet sein durch den visuellen Effekt des Experiments.

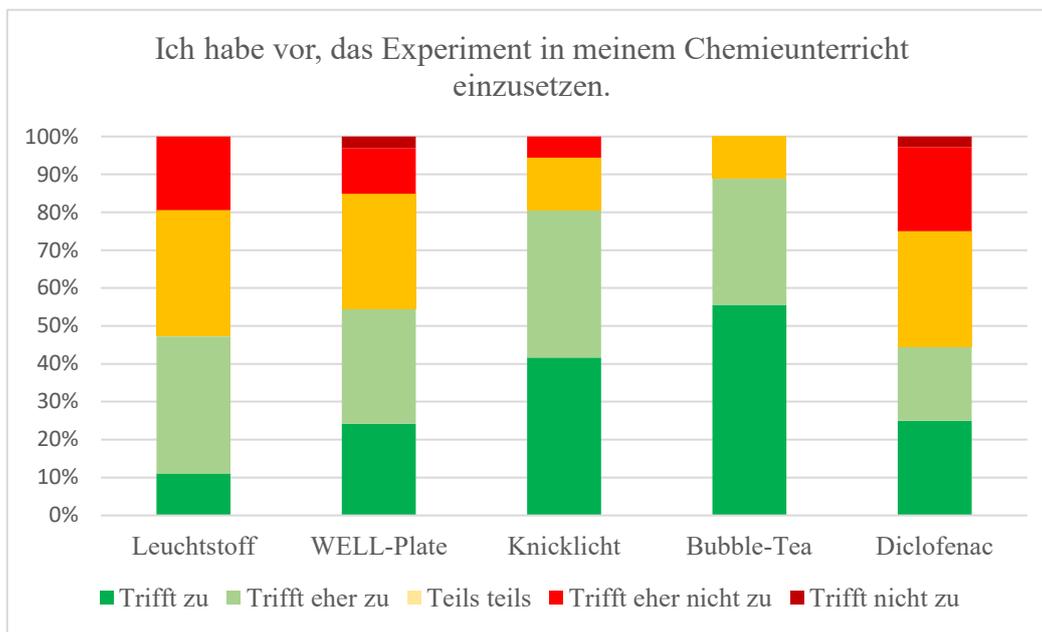


Abb. 27: Einschätzung der Lehrkräfte, das Experiment auch im eigenen Unterricht einsetzen zu wollen

Experiment 1: Mikrowellensynthese des Leuchtstoffs YAG:Ce und Herstellung einer selbstbeschichteten, weißen LED

Das Experiment zur Synthese des LED-Leuchtstoffes YAG:Ce in einer Mikrowelle stellt eine der zentralen Erarbeitungen dieses Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit Festkörperchemikerinnen und Festkörperchemikern der LMU dar. Das Themengebiet ist bisher im schulischen Kontext nicht vertreten. Sowohl festkörperchemische Inhalte als auch die chemiespezifische Komponente der LED-Beleuchtung im Alltag sind in dieser Form im Schulunterricht chemiedidaktisch nicht erschlossen. Unter anderem aus diesem Grund waren das bereitgestellte Begleitmaterial und die didaktische Ausarbeitung vergleichsweise intensiv. Die Versuchsdurchführung nahm ebenso einen großen Teil im Impulsvortrag und der laborpraktischen Erprobung durch die Lehrkräfte ein. Das Interesse der Lehrkräfte an diesem Versuch war groß.

In den vor Konzeption der Fortbildungen durchgeführten Interviews wurde den Lehrkräften in einem Zeitrahmen von circa 20 Minuten das Experiment vorgestellt, die Durchführung erläutert und zentrale Beobachtungen, auch anhand von Bildmaterial, geschildert. Die didaktische Intention und der fachwissenschaftliche Hintergrund wurden ebenfalls vorgestellt. Bereits in den Interviews ließ sich so ein erstes Stimmungsbild festhalten.

Ein Großteil der Lehrkräfte (10 von 13) führte besonders die hohe Alltagsrelevanz für Schülerinnen und Schüler als positiv an:

„Also, ich finde es super, weil es definitiv am Alltag der Schüler dran ist [...]“

Gleichzeitig wurden besonders der hohe Materialaufwand, die geringe Lehrplanrelevanz und die fachlich anspruchsvollen Hintergründe moniert, sodass geäußert wurde, den Versuch im Rahmen von Projekten oder Wahlkursen durchzuführen:

„[...] also, für unseren normalen Schullehrplan -äh – denke ich ist es schwierig das zu – äh – miteinzubauen. Für mich im Laborkurs ist es sehr einfach das miteinzubauen, weil wir da nicht so an den festen Lehrplan gebunden sind [...].“

Ähnliche Befunde ließen sich auch in der Befragung in der Lehrkräftefortbildung feststellen. Die einzelnen Items des Fragebogens, die zur Mikrowellensynthese des Leuchtstoffes gehören, sind zusammenfassend in Abb. 28 dargestellt.

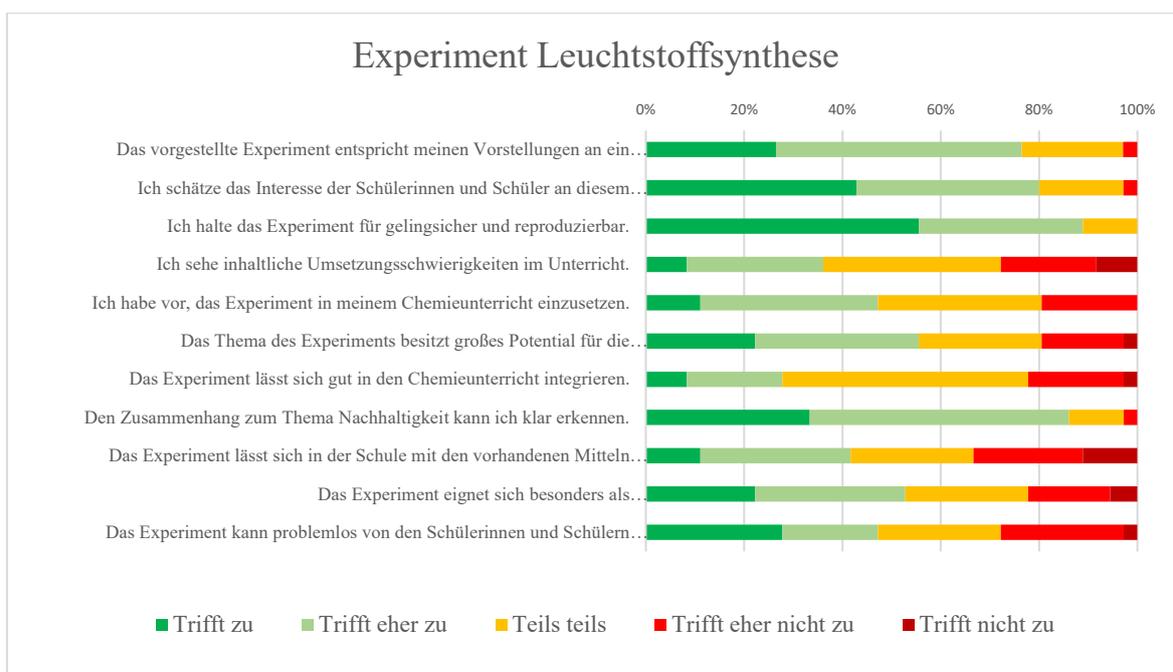


Abb. 28: Ergebnisse der Befragung zu den Fragebogen-Items "Mikrowellensynthese Leuchtstoff" (N = 36)

Die Teilnehmenden der Fortbildung bewerteten das Experiment mit der durchschnittlichen Schulnote 2,06. Damit bildet der Versuch im Vergleich zu den weiteren Experimenten das Schlusslicht. Wie Abb. 28 zeigt, sind hierfür möglicherweise vor allem inhaltliche Bedenken in der Umsetzbarkeit verantwortlich, wenngleich das Interesse der Schülerinnen und Schüler als vergleichsweise hoch eingeschätzt wird. Insgesamt schätzen die Lehrkräfte den Versuch aber als gelingsicher und reproduzierbar ein. Trotzdem haben wenig Lehrkräfte vor, das Experiment auch in ihrem Unterricht einzusetzen.

Im persönlichen Gespräch mit den Lehrkräften wurden außerdem häufig Einwände zum Einsatz der Mikrowelle geäußert. Sowohl das Fehlen einer Mikrowelle in der eigenen Chemiesammlung als auch Sicherheitsbedenken wurden angeführt. Auch der Einsatz der Selten-Erd-Nitrate weckte Skepsis, wobei diese insofern umgangen werden konnten, als dass alle Chemikalien in ausreichender Menge Teil des Experimentiersets waren. Den Bedenken bezüglich der Verwendung einer Mikrowelle wurde Rechnung getragen, indem das Experiment in DEGINTU als Experiment (Nr. 2887) aufgenommen wurde, sodass durch die verantwortliche Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) eine unabhängige Prüfung durchgeführt wurde. Die Verwendung der Datenbank DEGINTU beinhaltet außerdem die Möglichkeit der Erstellung einer Gefährdungsbeurteilung, sofern die Lehrkräfte das Experiment im Schulunterricht verwenden möchten.

Experiment 2: Vom Abwasser zum Functional Food: Antioxidative Wirkung in der WELL-Plate

Auch im Vergleich zu den anderen konzipierten Experimenten besticht der Nachweis der antioxidativen Eigenschaften in einer WELL-Plate durch seine Einfachheit: Für die Durchführung sind nur in einer gewöhnlichen Sammlung vorhandene Chemikalien notwendig. Die WELL-Plate wird zur Verfügung gestellt, kann für Kleinstbeträge erworben werden oder durch eine Tüpfelplatte oder Petrischalen ersetzt werden.

Gleichwohl ist der Versuch fachlich anspruchsvoll, aber phänomenologisch einfach gehalten. Dies schlägt sich auch in der Einschätzung der befragten Lehrkräfte nieder, die dem Experiment mit einer durchschnittlichen Note von 1,94 eine hohe Schultauglichkeit bescheinigten.

Die Vorstellungen an ein Schulexperiment sind insgesamt positiver bewertet als beim aufwändigen Leuchtstoff-Experiment. Dies schlägt sich auch im Vorhaben nieder, das Experiment im Schulunterricht einzusetzen (Abb. 27).

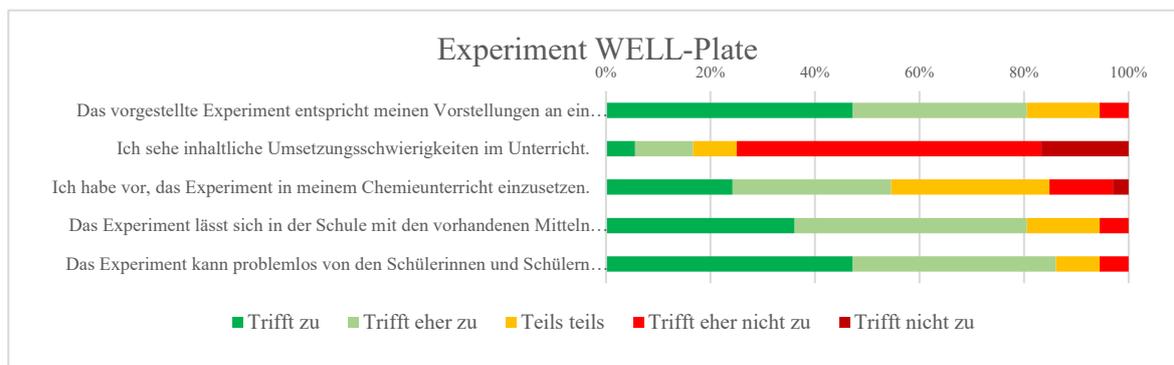


Abb. 29: Ausgewählte Items zum WELL-Plate Experiment

Gleichwohl zeigt sich, dass zwar der Einsatz einfacher Chemikalien und Laborarbeitsmittel sich positiv auswirken, aber die phänomenologisch eindrucksvolleren Versuche bevorzugt werden, sodass das Vorhaben des Einsatzes insgesamt kleiner ausfällt. Schon in der Erprobungsphase wurde durch die Lehrkräfte geäußert, dass das Experiment auch durch die Lernenden selbst durchgeführt werden könne (Abb. 29). Häufig erinnert das Experiment die Lehrkräfte auch an herkömmliche Micro-Scale-Versuche, sodass eine Verbindung zu bereits bekannten Schulexperimenten die Hemmschwelle zum Einsatz möglicherweise verringert.

Experiment 3: Nachweis der antioxidativen Eigenschaften mit Knicklichtern

Bei der Weiterentwicklung des Experiments mit Knicklichtern [133] zeigt sich, dass die Lehrkräfte das Interesse der Schülerinnen und Schüler als sehr hoch einschätzen und das Experiment als gelingsicher und reproduzierbar wahrnehmen. Die Bedenken der Lehrkräfte bezüglich Umsetzungsschwierigkeiten im Chemieunterricht sind gering. Der Versuch schneidet für die Eignung in der Schule mit einer Durchschnittsnote von 1,53 sehr gut ab. 80 % der Lehrkräfte gaben an, den Versuch im Unterricht einzusetzen zu wollen (Trifft zu/trifft eher zu).

Experiment 4: Luminol-Bubble-Tea

Grundsätzlich handelt es sich beim Experiment des Luminol-Bubble-Tea um einen vorbereitungsintensiven Versuch mit beeindruckender Beobachtung. Es liegt die Vermutung nahe, dass besonders die Chemolumineszenz gepaart mit den Alginatbällchen zur Bestnote der Lehrkräfte hinsichtlich Schuleignung von 1,33 führt. Die Lehrerinnen und Lehrer erwarten für diesen Versuch ein hohes Interesse der Lernenden und schätzen das Experiment

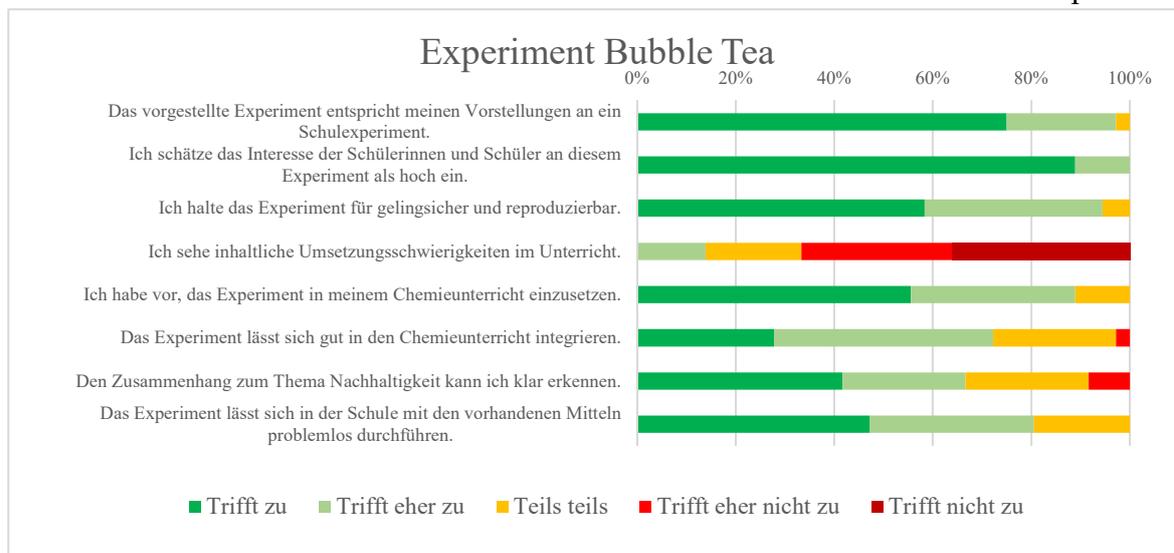


Abb. 30: Ausgewählte Items zum Experiment Luminol-Bubble-Tea

insgesamt – im Vergleich zu den restlichen Entwicklungen – als besonders positiv hinsichtlich ihrer „Vorstellungen an ein Schulexperiment“ ein (Abb. 30).

Gleichzeitig werden kaum inhaltliche Schwierigkeiten gesehen, ähnlich wie beim Versuch mit Knicklichtern. Überraschend ist dieser Sachverhalt vor der zeitintensiven Vorbereitung und Durchführung. Wie Abb. 27 bereits zeigte, ist der Anteil derjenigen Lehrer, die das Experiment im Schulunterricht einsetzen möchten, im Vergleich zu den anderen Experimenten, deutlich höher. Es liegt die Vermutung nahe, dass in diesem Fall die spannende Beobachtung der sich bewegenden, lumineszierenden Alginatbällchen im Standzylinder das ausschlaggebende Kriterium war. Anhand der Daten lässt sich außerdem erkennen, dass das Experiment im Vergleich zu den Experimenten in der WELL-Plate und mit dem Knicklicht, die prinzipiell den gleichen Themenkomplex bearbeiten, insgesamt besser bewertet wurde.

Experiment 5: Spurenstoffe im Abwasser und 4. Reinigungsstufe im Klärwerk: Das Schmerzmittel Diclofenac

Der in der Nachbarwissenschaft Pharmazie angesiedelte Versuch über das Schmerzmittel Diclofenac und die persistente Anreicherung der Substanz in Trinkwasser und Gewässern stieß bei den Lehrkräften auf gemischte Gefühle. Positiv bewertet wurde der für die Lehrkräfte klar erkennbare Bezug zur Nachhaltigkeit (Abb. 31). An diesem Punkt lässt sich erneut vermuten, dass häufig „chemiegemachte Schäden“ als Ausgangspunkt für das Thema Nachhaltigkeit im Chemieunterricht sind, da diese als Ansatzpunkt für eine chemiespezifische Debatte am nächsten liegen. Gleichzeitig weist das Experiment die geringste Zustimmung für die Durchführung im eigenen Unterricht auf. Ein zentraler Grund für diese Einschätzung ist der Einsatz eines schultauglichen UV-Vis-Gerätes, das in den meisten Chemiesammlungen nicht vorhanden ist. Trotz des Angebotes einer nasschemischen Alternative für den Nachweis der Reinigungswirkung der Aktivkohle wird die Versuchsdurchführung als kritisch erachtet. Dies zeigt sich in den Zustimmungswerten für „Vorstellung an ein Schulexperiment“ und der vergebenen, durchschnittlichen Note von 2,03. Die vergleichsweise hohe Streuung lässt sich auch aus der persönlichen Erfahrung und Gesprächen in der Durchführung bestätigen. Während einige Lehrer keinerlei Bedenken bei der Durchführung zeigten, schienen andere allein durch die mögliche Nutzung von instrumenteller Analytik abgeschreckt.

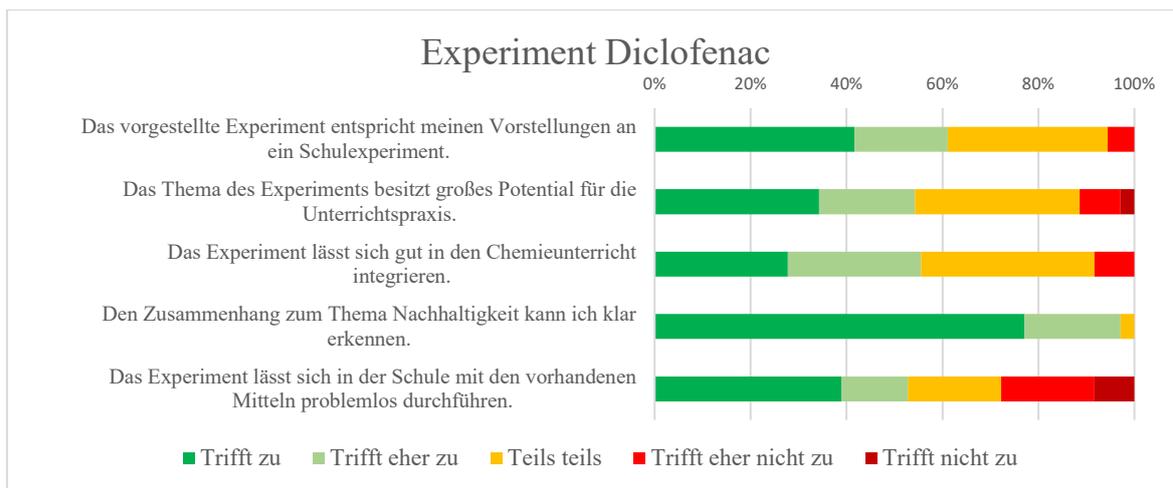


Abb. 31: Ausgewählte Items zum Experiment Diclofenac

Zusammenfassende Beurteilung der Experimente

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Lehrkräfte dem Thema Nachhaltigkeit auch im Chemieunterricht eine hohe Bedeutung beimessen und das Thema auch bei allen Experimenten erkannt werden konnte. Häufig dienen aber vorrangig praktische Gründe bei der Umsetzung im Unterricht als Beurteilungsgrundlage, wie beispielhaft ein Kommentar einer Lehrkraft im Fragebogen zeigt:

„Probleme sehe ich nicht in den Versuchen, sondern in den häufig nicht vorhandenen Chemikalien oder Geräten. Anschaffung aus Kostengründen dann auch nicht möglich.“

Diesem Bedenken wurde unter anderem durch das kostenfreie Überlassen der Experimentierbox Rechnung getragen, aber auch durch das Angebot von Alternativen, sollten Chemikalien nicht oder nicht in ausreichendem Umfang vorhanden sein. Nicht nur in der Bewertung schlägt sich die Anschaulichkeit der Beobachtung vieler Versuche nieder. Dies wurde auch häufig vermerkt bzw. im Plenum nach der Veranstaltung angesprochen:

„[...] besonders auffällig waren die vielen optisch anschaulichen Versuchsergebnisse – diese habe ich im Chemieunterricht bisher selten gesehen“

Das Bemühen bei der Bearbeitung, die Lebenswirklichkeit der Schülerinnen und Schüler bei den Versuchen aufzugreifen und mit modernen Materialien und Nachhaltigkeit zu verknüpfen, wurde ebenfalls häufig positiv hervorgehoben:

„Alle Experimente bieten die Möglichkeit bei der Alltagsrelevanz der Schülerinnen und Schüler anzuknüpfen“

Der Einsatz von zu teuren Chemikalien und Gerätschaften stößt allerdings bei Lehrkräften auf große Skepsis und stellt das vermeintlich größte Hindernis für eine Umsetzung im Schulunterricht dar. Wie aber die Bewertung der Lehrkräfte hinsichtlich des Vorhabens der Umsetzung im eigenen Chemieunterricht zeigt, kann davon ausgegangen werden, dass einige Versuche auch im Chemieunterricht der Gymnasien und damit an der Basis eingesetzt werden. Eine zusammenfassende Darstellung aller Items für die einzelnen Experimente findet sich in Anhang 5.

Die Beurteilung der Experimente mittels Schulnote lieferte insgesamt ein positives Ergebnis. So lagen alle Werte zwischen 1,33 bis 2,06, durchschnittlich bei 1,78 (SD = 0,46). Damit rangieren alle Experimente im Bereich „Sehr gut“ bis „gut“.

Diese Beurteilung der Experimente lässt außerdem Rückschluss auf das Vorhaben der Lehrkräfte zu, die Experimente im Unterricht einzusetzen ($r = ,569$; $p <,001$; $N = 36$). Zusammenfassend lässt sich auf Grundlage der Daten also vermuten, dass die Lehrkräfte gewillt sind, die Experimente im Schulunterricht einzusetzen.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Entwicklung und Evaluation neuartiger Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht wurde im Rahmen dieser Arbeit erreicht. Hierzu zählen eine schultaugliche Festkörpersynthese verschiedener Leuchtstoffe in der Haushaltsmikrowelle, die Entwicklung von Experimenten zum modernen Antioxidans Hydroxytyrosol, Experimenten zum Schmerzmittel Diclofenac als persistentem Schadstoff in Oberflächengewässern und die Verwirklichung einer schulnahen Extraktion von Lignin und Cellulose aus dem nachwachsenden Rohstoff *Miscanthus giganteus*.

Die Experimente wurden im Schülerlabor getestet, in der Lehrkräftefortbildung vorgestellt und evaluiert sowie breit publiziert. Weitergehendes Entwicklungspotential bietet sich bei den Experimenten zu Lignin und Cellulose: Die alltagsnahe Umsetzung und Nutzbarmachung des gewonnenen chemischen Naturstoffes können als Anknüpfungspunkt für weitere konzeptionelle Forschung dienen. Auch das Experiment zum Pharmazeutikum Diclofenac lässt sich, zum Beispiel im Rahmen fächerübergreifender Zusammenarbeit mit Biologie oder Pharmazie, ausbauen.

Wie sich in den Interviews und Fragebögen zeigte, verfügen aktiv im Dienst befindliche Lehrkräfte über nicht ausreichend viele Experimente, die den fortschrittlichen und nachhaltigen Charakter der Chemie unterstreichen. Insofern kann die eingangs getätigte Hypothese, dass hauptsächlich althergebrachte Versuche im Schulunterricht durchgeführt werden, vermutlich zugestimmt werden. Dies stellt auch ein zentrales Problem der didaktischen Rekonstruktionsarbeit dar: Neukonzeptionen und Umstrukturierungen stoßen auf Bedenken bei den Lehrkräften. Die subjektiv empfundene Zeitnot innerhalb des schulischen Unterrichts und das häufige Fehlen flexibler und moderner Themenkomplexe in den Lehr- und Bildungsplänen stehen in Opposition zu chemiedidaktischen Zielen und Vorhaben. Dem Chemieunterricht curricular Spielräume zu schaffen, moderne und nachhaltige Themen ausreichend thematisieren zu können und damit den geforderten Beitrag zur einer BnE leisten zu können, darf somit auch weiterhin ein Bestreben der Novellierung der Lehr- und Bildungspläne bleiben.

Die Motivation der Lehrkräfte war auch bedingt durch die geltenden Limitationen durch die Corona-Pandemie schwer zu erfassen und ließ keine Durchführung von Fortbildungen in normalen Maßstab zu. Nichts desto trotz ließ sich festhalten, dass die Lehrkräfte durchweg motiviert sind, Nachhaltigkeit im Chemieunterricht zu thematisieren und besonders bei

intrinsisch motivierten Teilnehmenden die Transferwahrscheinlichkeit in den Schulunterricht als hoch zu betrachten ist.

Aus den erhobenen Daten wurde deutlich, dass die entwickelten Experimente durchweg positiv hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit und Sinnhaftigkeit im Schulunterricht bewertet wurden. Es war ersichtlich, dass besonders einfache Experimente mit eindrucklichen Effekten besonders positiv bewertet wurden und nach wie vor als „Show-Experimente“ im Schulunterricht einen hohen Stellenwert einnehmen. Gleichwohl stehen Lehrkräfte dem Einsatz von technischen Geräten für die Versuchsdurchführung oder einfacher Analytik kritisch gegenüber.

Zusammenfassend liefert die vorliegende Arbeit aber experimentelle Ansatzpunkte um moderne Werkstoffe, wie von der KMK gefordert, verknüpft mit dem Thema Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung im Schulunterricht Chemie aufzugreifen und experimentell zu bearbeiten. Durch die Fortbildungsangebote, die auch nach Ende der Arbeit angeboten werden, besteht die Hoffnung, dass viele Schülerinnen und Schüler einen Einblick in den fortschrittlichen und zukunftsweisenden Charakter der Chemie erhalten können. Anknüpfend an die vorliegenden Forschungsergebnisse wäre es außerdem möglich, weitergehende Forschung zur Transferwahrscheinlichkeit der Experimente aus der Lehrkräftefortbildung in den Chemieunterricht zu tätigen. Die Fachforschung bietet viele Alltagsnahe und vielversprechende Themengebiete, für die bislang kaum oder keine experimentellen Angebote und Umsetzungsmöglichkeiten existieren. Die didaktische Rekonstruktionsarbeit liegt also auch für weiterführende Forschungsbiete nahe und gehört sicherlich auch in Zukunft zu einem wichtigen Teilbereich der chemiedidaktischen Forschungsarbeit.

Literaturverzeichnis

- [1] Schummer, J. (2017). Einführung. In: Zwischen Faszination und Verteufelung: Chemie in der Gesellschaft. Weitze, M.-D., Schummer, J., Geelhaar, T. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, 1–6.
- [2] Braund, M., Reiss, M. (2006). Towards a More Authentic Science Curriculum: The contribution of out-of-school learning. *Int. J. Sci. Educ.* **28**/12, 1373–1388.
- [3] Weitze, M.-D., Schummer, J., Geelhaar, T. (Hrsg.) (2017). Zwischen Faszination und Verteufelung: Chemie in der Gesellschaft. Springer Spektrum, Berlin.
- [4] Terhart, E. (2016). Personalauswahl, Personaleinsatz und Personalentwicklung an Schulen. In: Handbuch Neue Steuerung im Schulsystem, 2. Aufl. Altrichter, H., Maag Merki, K. (Hrsg.). Springer, Wiesbaden, 279–299.
- [5] Bagoly-Simó, P. (2014). Tracing Sustainability: Education for Sustainable Development in the Lower Secondary Geography Curricula of Germany, Romania, and Mexico. *Int. Res. Geogr. Environ. Educ.* **23**/2, 126–141.
- [6] de Haan, G. (2011). UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ 2005–2014. Nationaler Aktionsplan für Deutschland 2011. UNESCO, Bonn.
- [7] Klieme, E., Pauli, C., Reusser, K. (2009). The Pythagoras Study: Investigating effects of teaching and learning in Swiss and German mathematics classroom. In: The power of video studies in investigating teaching and learning in the classroom. Janik, T., Seidel, T. (Hrsg.). Waxmann, Münster.
- [8] van Vorst, H., Fechner, S., Sumfleth, E. (2018). Unterscheidung von Kontexten für den Chemieunterricht. *ZfDN* **24**/1, 167–181.
- [9] KMK (2020). Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife.
https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2020/2020_06_18-BildungsstandardsAHR_Chemie.pdf (letzter Zugriff am 19.3.2021).
- [10] Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* **3**/3, 3–18.
- [11] Parchmann, I., Schwarzer, S., Wilke, T., Tausch, M., Waitz, T. (2017). Von Innovationen der Chemie zu innovativen Lernanlässen für den Chemieunterricht und darüber hinaus. *CHEMKON* **24**/4, 161–164.
- [12] Schwarzer, S., Rudnik, J., Parchmann, I. (2013). Chemische Schalter als potenzielle Lernschalter. *CHEMKON* **20**/4, 175–181.
- [13] Nerdel, C. (2017). Grundlagen der Naturwissenschaftsdidaktik. Kompetenzorientiert und aufgabenbasiert für Schule und Hochschule. Springer Spektrum, Berlin.
- [14] Tausch, M. (2020). Chemie mit Licht, 1. Aufl. Springer Spektrum, Berlin.
- [15] Kropp, A. (2019). Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Handlungsmöglichkeiten und Strategien zur Umsetzung, 1. Aufl. Springer, Wiesbaden.

- [16] Grober, U. (2010). Die Entdeckung der Nachhaltigkeit. Kulturgeschichte eines Begriffs. Kunstmann, München.
- [17] Gudjons, H., Traub, S. (2020). Pädagogisches Grundwissen. Überblick - Kompendium - Studienbuch, 13. Aufl. Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- [18] Klafki, W. (2019). Kategorien als Leitbegriffe für ein nachhaltig ausgerichtetes Bildungskonzept. In: Allgemeine Erziehungswissenschaft. Systematische und historische Abhandlungen. Klafki, W. (Hrsg.). Springer, Wiesbaden, 103–111.
- [19] Holzbaur, U. (2020). Nachhaltige Entwicklung. Der Weg in eine lebenswerte Zukunft, 1. Aufl. Springer, Wiesbaden.
- [20] Grundmann, D., Overwien, B. (2016). Bildung für nachhaltige Entwicklung in Schulen verankern. Dissertation. Universität Kassel, Kassel.
- [21] Zimmermann, F. M. (Hrsg.) (2016). Nachhaltigkeit wofür? Von Chancen und Herausforderungen für eine nachhaltige Zukunft, 1. Aufl. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [22] Meadows, D. L. (1972). Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit, 17. Aufl. Dt. Verl.-Anst, Stuttgart.
- [23] Hauff, M. v., Kleine, A. (2009). Nachhaltige Entwicklung. Grundlagen und Umsetzung. Oldenbourg, München.
- [24] Hauff, V. (1987). Unsere gemeinsame Zukunft. Eggenkamp Verlag, Greven.
- [25] Kopfmüller, J. (2001). Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Ed. Sigma, Berlin.
- [26] Zimmermann, F. M. (2018). Nachhaltigkeit - eine Frage der Perspektive. Geographische Rundschau 10, 4–9.
- [27] de Haan, G. (2008). Gestaltungskompetenz als Kompetenzkonzept der Bildung für nachhaltige Entwicklung. In: Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung, 1. Aufl. Bormann, I., Haan, G. (Hrsg.). Verlag für Sozialwissenschaften, 23–43.
- [28] Burmeister, M., Jokmin, S., Eilks, I. (2011). Bildung für nachhaltige Entwicklung und Green Chemistry im Chemieunterricht. CHEMKON 18/3, 123–128.
- [29] Rieß, W. (2006). Grundlagen der empirischen Forschung zur Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (BNE). In: Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. Aktuelle Forschungsfelder und -ansätze. Rieß, W., Apel, H. (Hrsg.). Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 9–16.
- [30] Hellberg-Rode, G. (2011). Bildung für nachhaltige Entwicklung. MNU Journal 64/2, 68.
- [31] KMK (2007). Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule. https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2007/2007_06_15_Bildung_f_nachh_Entwicklung.pdf (letzter Zugriff am 5.10.2018).
- [32] Programm Transfer-21 (2007). Orientierungshilfe Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Sekundarstufe I. Begründungen, Kompetenzen, Lernangebote. <http://www.transfer-21.de/index90dd.html?p=280> (letzter Zugriff am 18.3.2021).
- [33] Hemmer, I. (2016). Bildung für nachhaltige Entwicklung. Der Beitrag der Fachdidaktiken. In: Befähigung zu gesellschaftlicher Teilhabe. Beiträge der

- fachdidaktischen Forschung, 1. Aufl. Menthe, J., Höttecke, D., Zabka, T., Hammann, M., Rothgangel, M. (Hrsg.). Waxmann, Münster, 25–40.
- [34] Weßnigk, S., Euler, M. (2014). Wie die Produktion von Eierlöffeln das Image von Chemie und Physik verändern kann. *CHEMKON* **21/3**, 123–128.
- [35] Kessels, U., Hannover, B. (Hrsg.) (2002). Die Auswirkungen von Stereotypen über Schulfächer auf die Berufswahlabsichten Jugendlicher. Dokumentation des 5. Dortmunder Symposions für Pädagogische Psychologie. Kovac, Hamburg.
- [36] Prenzel, M., Allolio-Näcke, L. (Hrsg.) (2006). Untersuchungen zur Bildungsqualität von Schule. Abschlussbericht des DFG-Schwerpunktprogramms. Waxmann, Münster.
- [37] Dierks, P. O., Höffler, T., Parchmann, I. (2014). Interesse von Jugendlichen an Naturwissenschaften. *CHEMKON* **21/3**, 111–116.
- [38] Höft, L., Bernholt, S. (2019). Ich mag, was ich kann oder kann ich, was ich mag? Über das Zusammenspiel von Interesse, Freude und Konzeptwissen im Fach Chemie. *ZfDN* **25/1**, 161–180.
- [39] Kessels, U., Hannover, B. (2006). Zum Einfluss des Image von mathematisch-naturwissenschaftlichen Schulfächern auf die schulische Interessensentwicklung. In: Untersuchungen zur Bildungsqualität von Schule. Abschlussbericht des DFG-Schwerpunktprogramms. Prenzel, M., Allolio-Näcke, L. (Hrsg.). Waxmann, Münster.
- [40] Bertelsmann Stiftung (2009). Jugend und die Zukunft der Welt. Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage in Deutschland und Österreich „Jugend und Nachhaltigkeit“. Wien/Gütersloh.
- [41] Prenzel, M., Artelt, C., Baumert, J., Blum, W., Hammann, M., Klieme, E., Pekrun, R. (2006). PISA 2006 in Deutschland. Die Kompetenzen der Jugendlichen im dritten Ländervergleich. Zusammenfassung. https://archiv.ipn.uni-kiel.de/PISA/Zusfsg_PISA2006_national.pdf (letzter Zugriff am 20.6.2021).
- [42] OECD (2013). PISA 2012 Assessment and Analytical Framework. OECD.
- [43] Burmeister, M., Rauch, F., Eilks, I. (2012). Education for Sustainable Development (ESD) and Chemistry Education. *Chem. Educ. Res. Pract.* **13/2**, 59–68.
- [44] Zowoda, C., Niebert, K., Eilks, I. (2019). Wenn nicht jetzt, wann dann? Nachhaltigkeit im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **30/172**, 2–9.
- [45] KMK (2019). Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht. www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/ (letzter Zugriff am 05.05.2021).
- [46] Burmeister, M., Eilks, I. (2012). Das Verständnis von Lehramtsstudierenden und Referendaren der Chemie über Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. In: Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Oldenburg 2011. Bernholt, S. (Hrsg.). LIT-Verl., Münster, 385–387.
- [47] Burmeister, M., Schmidt-Jacob, S., Eilks, I. (2013). German Chemistry Teachers' Understanding of Sustainability and Education for Sustainable Development—An Interview Case Study. *Chem. Educ. Res. Pract.* **14/2**, 169–176.

- [48] Etzkorn, N., Singer-Brodowski, M. (2018). Verankerung von Bildung für nachhaltige Entwicklung im Bildungsbereich Hochschule. In: Wegmarken zur Transformation. Nationales Monitoring von Bildung für nachhaltige Entwicklung in Deutschland. Brock, A., Haan, G. d., Etzkorn, N., Singer-Brodowski, M. (Hrsg.). Verlag Barbara Budrich, Opladen, Berlin, Toronto, 189–230.
- [49] Mayring, P. (2015). Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken, 12. Aufl. Beltz, Weinheim, Basel.
- [50] Rothland, M., Terhart, E. (2009). Forschung zum Lehrerberuf. In: Handbuch Bildungsforschung. Tippelt, R., Schmidt, B. (Hrsg.). Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 791–810.
- [51] Huber, S., Radisch, F. (2010). Wirksamkeit von Lehrerfort- und -weiterbildung. Ansätze und Überlegungen für ein Rahmenmodell zur theoriegeleiteten empirischen Forschung und Evaluation. In: Evaluation, Bildung und Gesellschaft. Steuerungsinstrumente zwischen Anspruch und Wirklichkeit. Böttcher, W., Dicke, J. N., Hogrebe, N. (Hrsg.). Waxmann, Münster u.a., 337–354.
- [52] Vigerske, S. (2017). Transfer von Lehrerfortbildungsinhalten in die Praxis. Dissertation. Pädagogischen Hochschule Freiburg, Freiburg.
- [53] Nolle, A. (2004). Evaluation der universitären Lehrerinnen- und Lehrerausbildung. Erhebung zur pädagogischen Kompetenz von Studierenden der Lehramtsstudiengänge. Dortmund, Univ., Diss. M-Press, München.
- [54] Terhart, E. (2013). Erziehungswissenschaft und Lehrerbildung. Waxmann, Münster.
- [55] OECD (2004). Anwerbung, berufliche Entwicklung und Verbleib von qualifizierten Lehrerinnen und Lehrern. Länderbericht Deutschland. https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2004/Germany_20Country_20Note_Endfassung_deutsch.pdf.
- [56] Terhart, E. (2001). Lehrerberuf und Lehrerbildung. Forschungsbefunde, Problemanalysen, Reformkonzepte. Beltz Verl., Weinheim.
- [57] Grothus, I., Renz, M., Rzejak, D., Schlamp, K., Daschner, P., Imschweiler, V., Lipowsky, F., Schoof-Wetzig, D., Steffens, U. (2018). Recherchen für eine Bestandsaufnahme der Lehrkräftefortbildung in Deutschland. Ergebnisse des Projekts Qualitätsentwicklung in der Lehrkräftefortbildung. Teil 1. DVLFb, Berlin.
- [58] Lipowsky, F. (2004). Was macht Fortbildungen für Lehrkräfte erfolgreich? Befunde der Forschung und mögliche Konsequenzen für die Praxis. Paralleltitel: What makes in-service teacher training programs successful? Research findings and possible consequences for practice. *Die deutsche Schule* **96/4**, 462–479.
- [59] Kultusministerkonferenz (2019). Standards für die Lehrerbildung. Bildungswissenschaften. https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Standards-Lehrerbildung-Bildungswissenschaften.pdf (letzter Zugriff am 24.2.2021).
- [60] Wilke, T., Engelmann, P., Schwarzer, S., Tepner, O. (2020). Chemiedidaktik. *Nachr. Chem.* **68/12**, 8–16.
- [61] Lipowsky, F. (2014). Theoretische Perspektiven und empirische Befunde zur Wirksamkeit von Lehrerfort- und weiterbildung. In: Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf, 2. Aufl. Terhart, E., Bennewitz, H., Rothland, M. (Hrsg.). Waxmann, Münster, 398–417.

- [62] Lipowsky, F. (2010). Lernen im Beruf–Empirische Befunde zur Wirksamkeit von Lehrerfortbildung. In: Lehrerinnen und Lehrer lernen. Konzepte und Befunde zur Lehrerfortbildung. Müller, F. H., Eichenberger, A., Lüders, M., Mayr, J. (Hrsg.). Waxmann, Münster u.a., 51–72.
- [63] Rzejak, D., Künsting, J., Lipowsky, F., Fischer, E., Dezhgahi, U., Reichardt, A. (2014). Facetten der Lehrerfortbildungsmotivation–eine faktorenanalytische Betrachtung. *Eur. J. Educ. Res.* **6**/1, 139–159.
- [64] Desimone, L. M. (2009). Improving Impact Studies of Teachers’ Professional Development: Toward Better Conceptualizations and Measures. *Educ. Res.* **38**/3, 181–199.
- [65] Desimone, L. M., Garet, M. S. (2017). Best Practices in Teachers’ Professional Development in the United States. *PSYE* **7**/3, 252.
- [66] Göb, N. (2018). Wirkungen von Lehrerfortbildung. Eine explorative Betrachtung von Fortbildungstypen und deren Effekte auf die Teilnehmenden am Beispiel des Pädagogischen Landesinstituts Rheinland-Pfalz, 1. Aufl. Beltz Juventa, Weinheim, Basel.
- [67] Lipowsky, F. (2014). Theoretische perspektiven und empirische Befunde zur Wirksamkeit von Lehrerfort- und weiterbildung. In: Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf, 2. Aufl. Terhart, E., Bennewitz, H., Rothland, M. (Hrsg.). Waxmann, Münster, New York.
- [68] DVLfB (2018). Recherchen für eine Bestandsaufnahme der Lehrkräftefortbildung in Deutschland. Teil 1. Ergebnisse des Projektes Qualitätsentwicklung in der Lehrkräftefortbildung.
https://www.lehrerfortbildung.de/images/phocadownload/Recherchen_fuer_eine_Bestandsaufnahme_der_Lehrkraeftefortbildung_in_Deutschland.pdf (letzter Zugriff am 26.2.2021).
- [69] Lipowsky, F., Rzejak, D. (2021). Fortbildungen für Lehrpersonen wirksam gestalten. https://www.bertelsmann-stiftung.de/index.php?id=5772&tx_rsmbstpublications_pi2%5bdoi%5d=10.11586/20080&no_cache=1 (letzter Zugriff am 27.5.2021).
- [70] Rauin, U. (2014). Forschung zur Lehrerbildung aus nationaler und internationaler Perspektive. In: Handbuch der Forschung zum Lehrerberuf, 2. Aufl. Terhart, E., Bennewitz, H., Rothland, M. (Hrsg.). Waxmann, Münster, 441–447.
- [71] Daus, J., Pietzner, V., Höner, K., Scheuer, R., Melle, I., Neu, C., Schmidt, S., Bader, H. J. (2004). Untersuchung des Fortbildungsverhaltens und der Fortbildungswünsche von Chemielehrerinnen und Chemielehrern. *CHEMKON* **11**/2, 79–85.
- [72] Neu, C., Melle, I. (1998). Die Fortbildung von Chemielehrerinnen und -lehrern Gegenwärtige Situation und Möglichkeiten zur Veränderung. *CHEMKON* **5**/4, 181–186.
- [73] Ropohl, M., Schönau, K., Parchmann, I. (2016). Welche Wünsche und Erwartungen haben Lehrkräfte an aktuelle Forschung als Gegenstand von Fortbildungsveranstaltungen? *CHEMKON* **23**/1, 25–33.
- [74] Ansorge-Grein, K. (2010). Qualität und Qualitätsmanagement in der universitären naturwissenschaftlichen Lehrerfortbildung. Goethe-Universität, Frankfurt am Main.

- [75] Ansorge-Grein, K., Patzke, B., Bader, H. J. (2009). Qualitätsentwicklung in der Lehrerfortbildung. CHEMKON **16/3**, 119–124.
- [76] Krainer, K., Posch, P. (2010). Intensivierung der Nachfrage nach Lehrerfortbildung. Vorschläge für Bildungspraxis und Bildungspolitik. In: Lehrerinnen und Lehrer lernen. Konzepte und Befunde zur Lehrerfortbildung. Müller, F. H., Eichenberger, A., Lüders, M., Mayr, J. (Hrsg.). Waxmann, Münster u.a., 479–495.
- [77] BStMUK 2002. Lehrerfortbildung in Bayern. In: Kultusministerielle Bekanntmachung vom 9. August 2002, 261–263.
- [78] Pasternack, P., Baumgarth, B., Burkhardt, A., Paschke, S., Thielemann, N. (2017). Drei Phasen. Die Debatte zur Qualitätsentwicklung in der LehrerInnenbildung. wbv, Bielefeld.
- [79] Diekemper, D., Schnick, W., Schwarzer, S. (2019). Microwave Synthesis of a Prominent LED Phosphor for School Students: Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting. J. Chem. Educ. **96/12**, 3018–3024.
- [80] Diekemper, D., Schnick, W., Schwarzer, S. (2020). Blue turns white – Chemistry's Contribution to Sustainable Lighting Using the Example of a LED-Phosphor. CHEMKON.
- [81] Diekemper, D., Pölloth, B., Schwarzer, S. (2021). From Agricultural Waste to a Powerful Antioxidant: Hydroxytyrosol as a Sustainable Model Substance for Understanding Antioxidant Capacity. J. Chem. Educ.
- [82] Wieczorek, R. R., Sommer, K. (2011). Demonstrating the Antioxidative Capacity of Substances with Lightsticks. J. Chem. Educ. **88/4**, 468–469.
- [83] Diekemper, D., Baltjan, G., Schwarzer, S. (2021). Luminol-Bubble-Tea – Antioxidantien und das Leuchten der Alginatbällchen. CHEMKON.
- [84] Scheid, M., Rusan, M., Klapötke, T. M., Schwarzer, S. (2021). The production of less harmful and less toxic sparklers in an experiment for school students. Chemistry Teacher International.
- [85] Bethke, C., Adelung, R., Schwarzer, S. (2017). Generierung einer mikro- und nanostrukturierten Kupferoberfläche mit Lotos-Effekt – Ein Versuch für die Sekundarstufen I und II. CHEMKON **24/1**, 31–38.
- [86] Kröger, S., Hock, K., Tausch, M., Anton, M., Bader, A., Zdziebło, J. (2017). CHEM₂DO[®]-Schulversuchskoffer - ein Kooperationsprojekt von Wirtschaft, Fachdidaktik und Lehrerfortbildungszentren. CHEMKON **24/4**, 241–245.
- [87] Tausch, M. W., Anton, M. A. (2015). CHEM₂DO. CHEMKON **22/2**, 82–84.
- [88] WACKER Chemie AG 2017. Hydroxytyrosol. <https://www.wacker.com/cms/de-de/products/product-groups/hydroxytyrosol/hydroxytyrosol.html> (letzter Zugriff am 4.3.2021).
- [89] Bader, H. J., Lühken Arnim (2018). Experiment im Chemieunterricht versus Experiment in der Forschung. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Friedrich Aulis, Seelze, 461–462.
- [90] Kotter, L. (1975). Das Experiment im Chemieunterricht. Strumberger, München.

- [91] ISB Bayern. LehrplanPLUS. <https://www.lehrplanplus.bayern.de/> (letzter Zugriff am 22.6.2020).
- [92] Fritz, M., Formowitz, B. (2009). Miscanthus als nachwachsender Rohstoff: Ergebnisse aus bayerischen Forschungsarbeiten. https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/bericht_18_geschuetzt.pdf (letzter Zugriff am 29.1.2021).
- [93] Bauer, S., Sorek, H., Mitchell, V. D., Ibáñez, A. B., Wemmer, D. E. (2012). Characterization of Miscanthus Giganteus Lignin Isolated by Ethanol Organosolv Process under Reflux Condition. *J. Agric. Food Chem.* **60**/33, 8203–8212.
- [94] Behr, A., Seidensticker, T. (2018). Der „Holzstoff“. In: Einführung in die Chemie nachwachsender Rohstoffe. Behr, A., Seidensticker, T. (Hrsg.). Springer, Berlin, 201–216.
- [95] Sonnewald, U. (2014). Stoffwechselphysiologie. In: Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften. Springer, Berlin, Heidelberg, 337–446.
- [96] Kost, B. (2014). Bau und Feinbau der Zelle. In: Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften. Springer, Berlin, Heidelberg, 3–69.
- [97] Vollhardt, K. P. C., Schore, N. E., Butenschön, H. (2014). Organische Chemie. Wiley-VCH, Weinheim.
- [98] Strassberger, Z., Tanase, S., Rothenberg, G. (2014). The pros and cons of lignin valorisation in an integrated biorefinery. *RSC Adv* **4**/48, 25310–25318.
- [99] Zijlstra, D. S., Lahive, C. W., Analbers, C. A., Figueirêdo, M. B., Wang, Z., Lancefield, C. S., Deuss, P. J. (2020). Mild Organosolv Lignin Extraction with Alcohols: The Importance of Benzylic Alkoxylation. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **8**/13, 5119–5131.
- [100] Fache, M., Boutevin, B., Caillol, S. (2016). Vanillin Production from Lignin and Its Use as a Renewable Chemical. *ACS Sust. Chem. Eng.* **4**/1, 35–46.
- [101] Qian, Y., Qiu, X., Zhu, S. (2015). Lignin: a nature-inspired sun blocker for broad-spectrum sunscreens. *Green Chem.* **17**/1, 320–324.
- [102] Saito, T., Brown, R. H., Hunt, M. A., Pickel, D. L., Pickel, J. M., Messman, J. M., Baker, F. S., Keller, M., Naskar, A. K. (2012). Turning renewable resources into value-added polymer: development of lignin-based thermoplastic. *Green Chem.* **14**/12, 3295.
- [103] Kamm, B., Kamm, M., Schmidt, M., Hirth, T., Schulze, M. (2010). Lignocellulose-based Chemical Products and Product Family Trees. In: Biorefineries - Industrial Processes and Products. Status Quo and Future Directions, 1. Aufl. Kamm, B., Gruber, P., Kamm, M. (Hrsg.). Wiley-VCH, Weinheim, 97–149.
- [104] Horn, S., Gerlach, S., Melle, I., Bader, H. J. (2003). Ein neues Experiment zur Zellstoffgewinnung in Chemieunterricht. Säurekatalysierter Aufschluss mit Wasserstoffperoxid und Ameisensäure. *MNU Journal* **56**/8, 473–479.
- [105] Gerlach, S., Melle, I., Bader, H. J. (1999). Miscanthus - Nutzungsmöglichkeiten als neuer Werkstoff? *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **10**/50, 29–32.
- [106] Sommerfeld, H. (1995). Das Acetosolv-Verfahren zur schadstoffarmen Herstellung von gebleichtem Zellstoff. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **29**/6, 23–25.

- [107] Zhou, H., Zhan, W., Wang, L., Guo, L., Liu, Y. (2018). Making Sustainable Biofuels and Sunscreen from Corncoobs To Introduce Students to Integrated Biorefinery Concepts and Techniques. *J. Chem. Educ.* **95**/8, 1376–1380.
- [108] Hinterstoisser, B. (2014). Was hat Vanillin mit Holz zu tun? *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **25**/141, 38–40.
- [109] Obergfell, M., Ducci, M. (2011). Herstellung eines Klebstoffes auf der Basis von Lignin im Schulvesuch. *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **60**/5, 24–30.
- [110] Diestelkamp, W., Venke, S. (2014). Papier untersuchen. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **25**/141, 41–44.
- [111] Rosenberg, D., Jansen, W. (2021). Strom mit polymeren Naturstoffen. *Nachr. Chem.* **69**/2, 14–19.
- [112] Förg, M., Klüfers, P. (2001). Der Kupferseideprozess. <https://www.cup.lmu.de/ac/kluefers/Zulassungsarbeiten/Kupferseideprozess/> (letzter Zugriff am 8.4.2021).
- [113] Kultusministerium BW (2016). Bildungsplan Baden-Württemberg. Gymnasium - Chemie. <http://www.bildungsplaene-bw.de/Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/CH>.
- [114] Europäisches Arzneibuch (2017). Deutscher Apotheker Verlag, Stuttgart.
- [115] Framm, J., Framm, A., Heydel, E., Mehrwald, A., Schomacker, G., Stranz, D., Lennecke, K. (2018). Arzneimittelprofile für die Kitteltasche. Wirkstoffbezogene Beratungsempfehlungen für die pharmazeutische Betreuung, 6. Aufl. Deutscher Apotheker Verlag, Stuttgart.
- [116] Vieno, N., Sillanpää, M. (2014). Fate of diclofenac in municipal wastewater treatment plant - a review. *Environ. Int.* **69**, 28–39.
- [117] Umweltbundesamt (2017). Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung. Dessau-Roßlau.
- [118] Jewell, K. S., Falås, P., Wick, A., Joss, A., Ternes, T. A. (2016). Transformation of diclofenac in hybrid biofilm-activated sludge processes. *Water Res.* **105**, 559–567.
- [119] Aldekoa, J., Medici, C., Osorio, V., Pérez, S., Marcé, R., Barceló, D., Francés, F. (2013). Modelling the emerging pollutant diclofenac with the GREAT-ER model: application to the Llobregat River Basin. *J. Hazard. Mater.* **263**, 207–213.
- [120] Oaks, J. L., Gilbert, M., Virani, M. Z., Watson, R. T., Meteyer, C. U., Rideout, B. A., Shivaprasad, H. L., Ahmed, S., Chaudhry, M. J. I., Arshad, M., Mahmood, S., Ali, A., Khan, A. A. (2004). Diclofenac residues as the cause of vulture population decline in Pakistan. *Nature* **427**/6975, 630–633.
- [121] Fent, K., Weston, A. A., Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquat. Toxicol.* **76**/2, 122–159.
- [122] Zhang, Y., Geissen, S.-U., Gal, C. (2008). Carbamazepine and diclofenac: removal in wastewater treatment plants and occurrence in water bodies. *Chemosphere* **73**/8, 1151–1161.
- [123] Luo, Y., Guo, W., Ngo, H. H., Nghiem, L. D., Hai, F. I., Zhang, J., Liang, S., Wang, X. C. (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic

environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Sci. Total Environ.* **473-474**, 619–641.

- [124] Schwedt, G. (2018). *Chemie der Arzneimittel. Einfache Experimente mit Medikamenten aus der Apotheke.* Wiley-VCH, Weinheim.
- [125] Berg, J. M., Tymoczko, J. L., Gatto, G. J. (2018). *Stryer Biochemie*, 8. Aufl. Springer Spektrum, Berlin.
- [126] Lipinski, C. A., Lombardo, F., Dominy, B. W., Feeney, P. J. (1997). Experimental and computational approaches to estimate solubility and permeability in drug discovery and development settings. *Adv. Drug Deliv. Rev.* **23**, 3–25.
- [127] Holstermann, N., Bögeholz, S. (2007). Interesse von Jungen und Mädchen an naturwissenschaftlichen Themen am Ende der Sekundarstufe I. *ZfDN* **13**, 71-86.
- [128] Sánchez-Viesca, F., Gómez, R. (2019). On the Mechanism of the Froehde Reaction. *WJOC* **7/1**, 1–4.
- [129] Binnewies, M., Finze, M., Jäckel, M., Schmidt, P., Willner, H., Rayner-Canham, G. (2016). *Allgemeine und Anorganische Chemie*, 3. Aufl. Springer Spektrum, Berlin.
- [130] Flint, A. (2014). Vom didaktischen Konzept zur Unterrichtseinheit. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung.* Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 57–66.
- [131] Burmeister, M. (2012). *Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht- ein Projekt zur Praxisinnovation durch Stärkung der Lehrerexpertise.* Dissertation. Universität Bremen, Bremen.
- [132] Deci, E. L., Ryan, R. M. (1993). Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik* **39/2**, 223–238.
- [133] Wiczorek, R., Sommer, K. (2012). Antioxidantien - Die Opferanoden der Natur? *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **61/4**, 16–23.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Abb. 1: Aufbau des kumulativen Promotionsprojektes | 5 |
| Abb. 2: Didaktische Strukturierung von Fachinhalten in der fachdidaktischen Forschung . | 7 |
| Abb. 3: Ziele für nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030 | 13 |
| Abb. 4: Drei gleichberechtigte Dimensionen der Nachhaltigkeit. Drei-Säulen-Modelle... | 14 |
| Abb. 5: Nennungen und Kategorien "Begriffsverständnis Nachhaltigkeit" | 22 |
| Abb. 6: Mehrfachnennungen von Aspekten, die die Rolle von Nachhaltigkeit in der Bildung aufzeigen..... | 23 |
| Abb. 7: Anknüpfungspunkte zur Nachhaltigkeit im Lehrplan Chemie | 24 |
| Abb. 8: Phasen der Lehrkräftebildung in Deutschland..... | 27 |
| Abb. 9: Verteilung der GDCh-Fortbildungszentren in Deutschland | 29 |
| Abb. 10: Konzeptioneller Rahmen für Lehrkräftefortbildungen nach Desimone (2009)... | 31 |
| Abb. 11: Erweitertes Angebots-Nutzungsmodell nach Lipowsky im Rahmen von Fort- und Weiterbildung | 32 |
| Abb. 12: Experimentiersets zur Lehrkräftefortbildung..... | 39 |
| Abb. 13: <i>Miscanthus giganteus</i> | 84 |
| Abb. 14: Strukturformeln der Monomere (Monolignole) des Lignins. | 85 |
| Abb. 15: Polymerisation von Lignin am Beispiel der Kopplung von zwei Coniferyalkoholen | 85 |
| Abb. 16: Strukturformel der Cellulose..... | 86 |
| Abb. 17: Strukturierung der Einzelexperimente im Projekt <i>Miscanthus giganteus</i> | 88 |
| Abb. 18: Feiner, hellbrauner Niederschlag von Lignin in Wasser und gewonnenes Lignin nach Filtration..... | 91 |
| Abb. 19: Positiver Lignin Nachweis (rechts) und Blindprobe (links). | 92 |
| Abb. 20: UV-blockende Wirkung von Lignin im Experiment: Ethanolische Fluorescein- Lösung (links), mit Sonnencreme (mitte) und mit Lignin (rechts) unter UV- Licht-Bestrahlung. | 93 |
| Abb. 21: Aufroll-Vorrichtung für die Kupferseide über Fällungsbad | 95 |
| Abb. 22: Natrium-Salz von Diclofenac | 97 |
| Abb. 23: UV-Vis-Aufnahme vor und nach der Reinigung durch die im Modellexperiment verwendete Aktivkohle-Spritze | 98 |
| Abb. 24: Unterschiedliche Farbreaktionen nach Zugabe des Froehde-Reagenzes: Aspirin (links) blau-violett, Paracetamol hellblau (mittig), Diclofenac rosa (rechts).... | 102 |
| Abb. 25: Aufbau des Modellexperiments zur Aktivkohlereinigung in Einmalspritze | 103 |
| Abb. 26: Nachweis mittels $K_3[Fe(CN)_6]$. Links ungereinigt, rechts bereinigt im Modellexperiment..... | 104 |
| Abb. 27: Einschätzung der Lehrkräfte, das Experiment auch im eigenen Unterricht einsetzen zu wollen..... | 121 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 28: Ergebnisse der Befragung zu den Fragebogen-Items "Mikrowellensynthese Leuchtstoff" (N = 36). | 122 |
| Abb. 29: Ausgewählte Items zum WELL-Plate Experiment..... | 123 |
| Abb. 30: Ausgewählte Items zum Experiment Luminol-Bubble-Tea | 124 |
| Abb. 31: Ausgewählte Items zum Experiment Diclofenac..... | 126 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tabelle 1: Zehn Merkmale wirksamer Lehrkräftefortbildungen als Symbiose der bisherigen Forschungsergebnisse | 33 |
| Tabelle 2: Programm der konzipierten Fortbildungsveranstaltung | 37 |
| Tabelle 3: Skalen und Items des eingesetzten Fragebogens..... | 106 |
| Tabelle 4: Ergebnisse der Items der einzelnen Faktoren (0 = trifft zu bis 4 = trifft nicht zu). | 118 |
| Tabelle 5: Durchschnittliche Bewertung der Lehrkräfte zur Schultauglichkeit (Note 1 = sehr gut für die schule geeignet - Note 6 = für die Schule ungeeignet). | 120 |

Anhang

Anhang 1: Interviewleitfaden

| Themenbereiche | Hauptfragestellung/inhaltliche Aspekte | mögliche Nachfragen/ Aufrechterhaltungsfragen | alternative Fragen/ konkretisierte Nachfragen |
|--------------------|---|---|---|
| Erfahrungen | Glauben Sie, dass die Fachwissenschaft Chemie einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leistet? | Können Sie noch weitere Beispiele nennen? Können Sie das noch näher erläutern? | Beispiele? |
| | Erzählen Sie bitte, welche Erfahrungen Sie mit dem Thema Nachhaltigkeit im Rahmen Ihrer Unterrichtspraxis bisher gemacht haben. | Wie ging es dann weiter? Wie war das für Sie? | |
| | Stehen Ihnen relevante Experimente für den Chemieunterricht zur Verfügung, die die Nachhaltigkeit der Chemie herausarbeiten? | Können Sie das Experiment näher beschreiben? | Fallen Ihnen Beispiele für relevante Experimente ein? Welche davon haben Sie schon für den Unterricht verwendet? |
| | Welchen Gewinn sehen Sie darin, wenn sich eine Klasse mit Themen im Kontext der Nachhaltigkeit kritisch auseinandersetzt? | Wie kam es zu der Auseinandersetzung? | Haben Sie diese Erfahrung schon gemacht? |
| | Welche Themen sehen Sie als geeignet an, um das Thema Nachhaltigkeit in Ihren Chemieunterricht zu integrieren? | | |

| Themenbereiche | Hauptfragestellung/inhaltliche Aspekte | Mögliche Nachfragen/ Aufrechterhaltungsfragen | Alternative Fragen/ konkretisierte Nachfragen |
|---|---|--|--|
| Verfügbarkeit experimenteller Zugänge? | Beschreiben Sie mir doch bitte Ihren generellen Eindruck von dem Versuch. | Wie war das für Sie? Können Sie das noch genauer beschreiben? | |
| | Welche Inhalte des vorgestellten Versuchs haben aus Ihrer Sicht besonders viel Potenzial für die Unterrichtspraxis? | Können Sie das noch genauer beschreiben? | Weil diese Inhalte vor allem Relevanz für den Lehrplan haben? |
| | Welche Chancen sehen Sie bei der Übertragung des vorgestellten Versuchs zu LED-Leuchtstoffen auf die Unterrichtspraxis? | | Chancen in Bezug auf die Relevanz für den Lehrplan? Chancen in Bezug auf die Materialien? Chancen in Bezug auf den zeitlichen Aufwand? |
| | Welche inhaltlichen Umsetzungsschwierigkeiten sehen Sie? | Können Sie das noch genauer beschreiben? | Weil Sie das denken oder weil das von Ihnen erwartet wird? |

Anhang 2: Arbeits- und Informationsmaterialien der entwickelten Experimente

Aus blau mach weiß – der Beitrag der Chemie zu nachhaltiger Beleuchtung mit LED

Light emitting diodes (kurz: LEDs) gehören seit vielen Jahren zum alltäglichen Leben. Sie verbrauchen wenig Energie und gelten als **umweltschonendes Beleuchtungskonzept**. Für die Entwicklung von den ersten **blauen Leuchtdioden** wurde 2014 an die japanischen Forscher AKASAKI, AMANO und NAKAMURA der **Nobelpreis für Physik** verliehen. Seit dem Verbot der herkömmlichen Glühbirne 2009, finden sich nahezu in jedem Haushalt LED-Leuchtmittel. Aber sie scheinen nicht blau, sondern geben weißes Licht! Genau dafür wurden in der chemischen Forschung **Leuchtstoffe** entwickelt. Wie das funktioniert und was das nun genau ist, erfährst du in diesem Versuch!

↑ Untersuchung verschiedener Leuchtmittel ↑

Etwa 10% der weltweit bereitgestellten elektrischen Energie wird für Beleuchtungszwecke verwendet. Neben der Energieeffizienz der Leuchtmittel, die unter anderem mit dem europäischen Energielabel verdeutlicht werden, sind auch die Qualität des Lichtes und die Lichtfarbe wichtige Kennwerte.

Untersuche die unterschiedlichen Leuchtmittel hinsichtlich ihrer elektrischen Leistung, ihrer Temperatur während des Betriebs, deinem persönlichen Eindruck der Lichtqualität und ihrer Energieeffizienzklasse!

| Leuchtmittel |  Glühbirne |  Energiesparlampe |  LED-Lampe (kaltweiß) |  LED-Lampe (warmweiß) |
|----------------------------------|--|---|--|--|
| Leistung [W] | | | | |
| Temperatur [°C] | | | | |
| Persönlicher Eindruck des Lichts | <input type="radio"/> 😊 <input type="radio"/> 😐 <input type="radio"/> ☹️ | <input type="radio"/> 😊 <input type="radio"/> 😐 <input type="radio"/> ☹️ | <input type="radio"/> 😊 <input type="radio"/> 😐 <input type="radio"/> ☹️ | <input type="radio"/> 😊 <input type="radio"/> 😐 <input type="radio"/> ☹️ |
| Energieeffizienzklasse | | | | |

Begründe unter Zuhilfenahme der ermittelten Werte, weshalb sich die europäische Union 2009 entschlossen hat, die Produktion von herkömmlichen Glühbirnen zu stoppen!

Der Weg von blauem zu weißem Licht aus der LED

Stelle anhand der Abbildung eine Hypothese auf, wie der Leuchtstoff auf der Diode blaues Licht zu weißem konvertiert!

Synthese von YAG:Ce in der Mikrowelle

Schritt 1: Herstellung der Reaktionslösung

- Wiege jeweils in ein Wägeschälchen die folgenden Chemikalien möglichst genau ab und gib zuerst alle Metallsalze in das Becherglas mit dem Rührfisch!

| $Y(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ | $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ | $Ce(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$ | $(NH_2)_2CO$ |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 0,810 g | 3,460 g | 0.020 g | 2,200 g |

- Stelle das Becherglas auf den Magnetrührer, pipettiere **1,0 ml H₂O dest.** hinzu und tauche das Thermometer möglichst weit ein, ohne, dass es den Boden und den Rührfisch berührt!
- Sind die Salze gelöst, gib den **Harnstoff** hinzu!
- Stelle die Temperatur auf **60 °C** ein und lasse diese Lösung mindestens so lange rühren, bis 60 °C erreicht sind und eine **klare, homogene Lösung** entstanden ist!

Schritt 2: Vorbereitung der Mikrowelle

- Für die Synthese des Leuchtstoffes YAG:Ce werden hohe Temperaturen benötigt. In Mikrowellen werden die Dipolmoleküle des Wassers zur Bewegung angeregt, dies erzeugt Wärme.

Glaubst du, dass es egal ist, wo die Reaktion in der Mikrowelle abläuft?

- Um diese Frage zu beantworten stehen die folgenden Materialien zur Verfügung: **Styroporplatte, Thermopapier, Zellstofftücher, Spritzflasche mit Wasser.**
- Überlege dir zusammen mit deinem Betreuer einen geeigneten Versuchsaufbau um den optimalen Ort für die Synthese zu finden! Platziere dort den Gasbetonstein als Unterlage und darauf die sandgefüllte Kristallisierschale.

Begründe die Platzierung der Reaktionsgefäße!

Skizze: Hotspots in der Mikrowelle

Schritt 3: Durchführung der Synthese

- Pipettiere **0,75 ml** der Reaktionslösung in den Porzellantiegel.
- Stelle den Porzellantiegel mit der Tiegelzange vorsichtig in die mit Sand gefüllte Kristallisierschale.
- Schließe die Mikrowellentür, drücke den Startknopf!



Achte auf deine Sicherheit! **Schließe den Abzugschieber vollständig**, während die Reaktion abläuft!

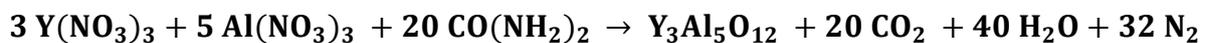
- Aktiviere die Mikrowelle an der Netzschalter-Steckdose! Beobachte die Reaktion! Sobald die Synthese abgelaufen ist, schalte die Mikrowelle über den Netzteil-Schalter ab!



Der Reaktionstiegel erreicht **extrem hohe Temperaturen!** Lass ihn abkühlen und benutze eine **Tiegelzange** um ihn zu entnehmen!

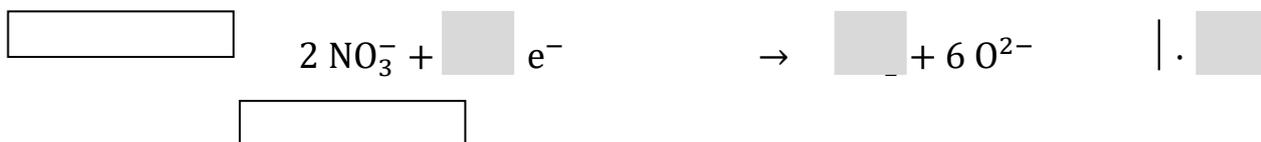
Beobachtung:

Gesamtgleichung:

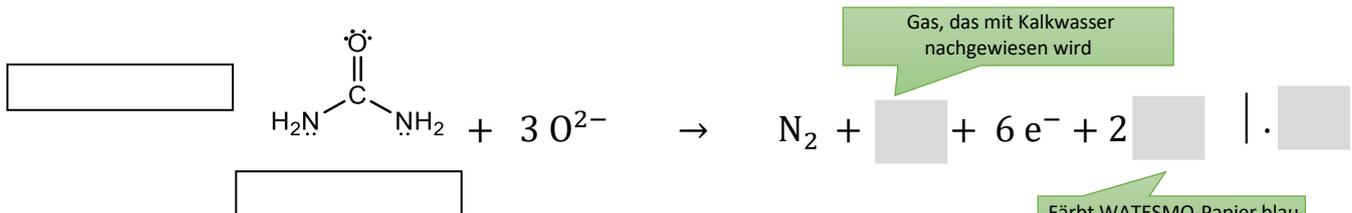


Identifiziere Oxidation und Reduktion und ergänze die Teilgleichungen! Wie lautet die Redoxgesamtgleichung? Was fungiert als Oxidations- was als Reduktionsmittel?

Teilgleichungen:



Gas, das Verbrennung nicht unterhält



Gas, das mit Kalkwasser nachgewiesen wird

Färbt WATESMO-Papier blau

Redox:

Untersuchung des Reaktionsproduktes

Untersuche den entstandenen Stoff im Tiegel mit der UV-Lampe! Was kannst du beobachten?



UV-Licht ist schädlich für die Augen! Nicht direkt in die Lampe sehen!

Vergleiche eine Probe von undotiertem YAG mit YAG:Ce! Erläutere das Prinzip der Dotierung!

Warum wird das Ce^{3+} auch als Aktivator-Ion bezeichnet?



Belasse das Produkt im Tiegel, verschließe den Tiegel mit einem Tiegelerdeckel und nimm den Tiegel mit zur nächsten Station, um ihn zu verarbeiten.

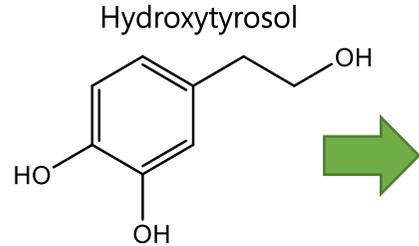
Vom Abwasser zum „*Functional Food*“: Ein Antioxidans aus der Olive

„Erst grün, dann schwarz, man presst mich sacht, bis man zu feinstem Gold mich macht“

Jährlich werden weltweit etwa 20 Mio. Tonnen **Oliven** produziert, fast ausschließlich im mediterranen Raum. Ein besonders begehrtes Produkt ist dabei das **Olivenöl**, das aufgrund seiner wertvollen Inhaltsstoffe oft als „flüssiges Gold“ bezeichnet wird. Das bei der Ölherstellung anfallende **Oliven-Vegetationswasser** fand dabei bisher wenig Beachtung und galt als **Abfallprodukt**, obwohl dieses reich an gesundheitsförderlichen Stoffen ist. Diese sind wasser- und eben nicht fettlöslich. Ein wichtiger Bestandteil mit hoher Konzentration ist der Stoff **Hydroxytyrosol**. Im Folgenden sollst du die allgemeinen Eigenschaften von Antioxidantien aus dem Experiment ableiten!

Die Eigenschaften von Antioxidantien im Experiment

Überführe die Skelettformel in eine Vollstrukturformel!



Benenne zwei dir bekannte Strukturelemente!

1. _____
2. _____

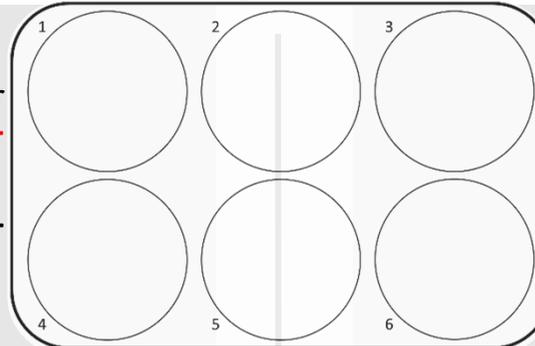
Wie lautet der systematische Name der Substanz?

- 4-(2-hydroxyethyl)benzol-1,3-triol
- 4-(2-hydroxyethyl)benzol-1,2-diol
- 4-(3-carboxyethyl)benzol-1,2-diol

Führe den Versuch anhand der Anleitung durch! Notiere deine Beobachtung und markiere die Farbänderung in der Abbildung!

Versuchsdurchführung 1

- Pipettiere in die beiden Kammern 1 und 4 der WELL-Plate je 2 ml FeCl_3 -Lösung und 2 ml der **Roten-Blutlaugensalz-Lösung!**
- Tropfe in Kammer 4 einen Tropfen der Oliven-Lösung!



Versuchsdurchführung 2

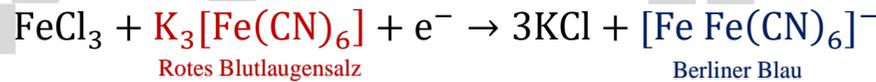
- Pipettiere in die Kammern 3 und 6 je 4 ml der **Fluorescein-Lösung!**
- Tropfe in Kammer 6 einen Tropfen der Oliven-Lösung!
- Pipettiere jeweils 5 Tropfen der Wasserstoffperoxid-Lösung hinzu und beleuchte mit UV-Licht!

Beobachtung:

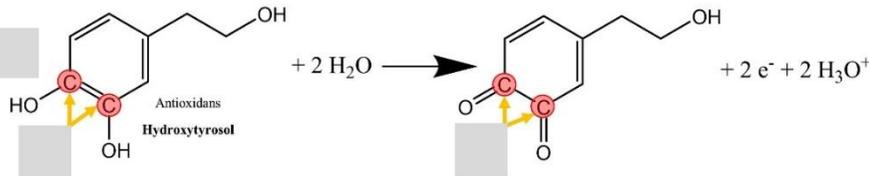
Beobachtung:

Die Reaktion verläuft nach folgendem Prinzip:

- Bestimme die Oxidationszahlen des Eisens!
Beurteile, ob es sich um eine Oxidation oder eine Reduktion handelt!



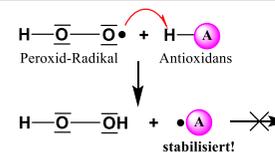
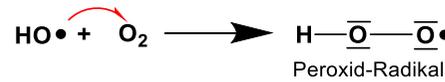
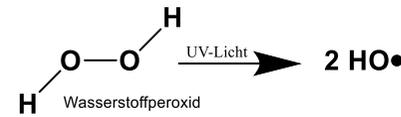
- Oxidation und Reduktion treten stets gemeinsam auf. Zeige anhand der Oxidationszahlen, welche Teilreaktion am Antioxidans abläuft!



In der Reaktion wird das Antioxidans _____.
 Dabei wird ein Teil der Eisen-Ionen aus den Eisensalzen _____.
 Das Antioxidans fungiert also als _____mittel.
 Im Allgemeinen wirken Antioxidantien also _____, da sie stets
vor der zu schützenden Substanz selbst oxidiert werden!

Eigenschaft 1:

- Beschreibe den Reaktionsmechanismus in Stichpunkten!



- Erkläre, wie sich das Antioxidans chemisch verändertert!

- In der Medizin und Ernährung spricht man oft von „*ungesunden freien Radikalen*“. Stelle dir vor, das Fluorescein im Versuch stünde für eine Zellkomponente im Körper. Erkläre die Bedeutung von Antioxidantien im Körper!

Antioxidantien können _____ binden, fungieren also als
 _____ und brechen so Radikalkettenreaktionen ab.
 Diese Fähigkeit beruht auf der Bildung sogenannter _____
 Intermediate, die sehr stabil sind und nicht weiter reagieren.

Eigenschaft 2:

Vom Schmerzmittel zum Spurenstoff im Trinkwasser

Moderne Arzneimittel und insbesondere frei verkäufliche **Schmerzmittel** sind aus unserem alltäglichen Leben kaum wegzudenken. Dank chemisch-pharmazeutischer Forschung werden Wirkstoffe stetig weiterentwickelt, Nebenwirkungen minimiert und Kosten für den Verbraucher gesenkt. Viele der Wirkstoffe aber werden vom menschlichen Körper nicht vollständig aufgenommen. Durch falsche Entsorgung und Ausscheidung gelangen sie in das Abwasser. **Klärwerke** sind größtenteils nicht mit der Technik ausgestattet, sogenannte **Spurenstoffe** herauszufiltern. So reichern sie sich in **Gewässern und Böden** an und können zu weitreichenden Problemen führen!

Schmerzmittel im Vergleich

Die Tabelle zeigt die Skelettformeln von drei weit verbreiteten Schmerzmitteln:

| Aspirin® | Diclofenac | Paracetamol |
|----------|------------|-------------|
| | | |

Die Wirkstoffe müssen vereinfacht **fünf Schritte** durchlaufen:



Betrachte die fünf Schritte und leite daraus Probleme und resultierende Eigenschaften ab, die ein Wirkstoff erfüllen muss, um oral wirksam sein zu können.



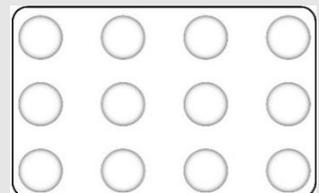
Identifikation der verschiedenen Schmerzmittel

In der Pharmazie existiert eine Reihe von klassischen Nachweisen, um verschiedene pharmazeutische Substanzen zu identifizieren. Bestimme mithilfe des FROEHDE-Reagenzes, welcher Wirkstoff sich in welcher Tablette befindet!

Versuchsdurchführung

- Gib je eine **Spatelspitze** der Pulver 1-3 in jeweils eine Mulde der Tüpfelplatte!
- Tropfe je 1-2 **Tropfen** des Nachweis Reagenzes hinzu!
- Identifiziere anhand der **Farbänderung** die einzelnen Substanzen!

Vorsicht, das Reagenz ist stark ätzend!

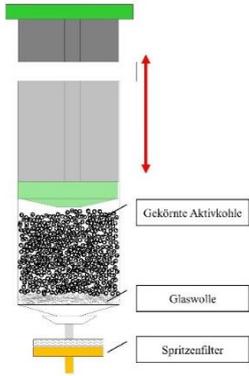


Beobachtung: Medikament 1: _____
 Medikament 2: _____
 Medikament 3: _____

Medikament 1 = _____
 Medikament 2 = _____
 Medikament 3 = _____

Diclofenac: Wenn Schmerzmittel zum Abwasserproblem werden

Moderne, dreistufige Kläranlagen reinigen Abwässer mechanisch, biologisch und chemisch. Nur wenige Anlagen verfügen aber über eine vierte Reinigungsstufe, die Mikroschadstoffe wirksam eliminieren können. Eine Möglichkeit ist die Adsorption (≈Anhaften an Oberfläche) an Aktivkohle, wie der folgende Versuch zeigt.



- ### Versuchsdurchführung
- Löse mithilfe des Magnetrührers eine **Spatelspitze** des **Diclofenac**-Pulvers in **100 mL** destilliertem Wasser. Die Füllstoffe lösen sich nicht.
 - Filtere diese **nichtlöslichen Bestandteile** ab und nimm ein UV/Vis-Spektrum der Lösung auf!
 - Ziehe in die mit Aktivkohle bestückte Spritze möglichst weit mit der Lösung auf, schüttele sie, schraube den Spritzenfilter auf und fülle mit dem Inhalt eine Küvette für eine erneute UV/Vis-Messung!

Skizze der aufgenommenen UV/Vis-Spektren:



Betrachte die Struktur der Aktivkohle anhand einer Aufnahme mit dem Rasterelektronenmikroskop und treffe auf Grundlage deiner Beobachtung eine Aussage über die Funktionsweise!

Nur wenige Kläranlagen in Deutschland besitzen eine 4. Reinigungsstufe. Nimm vor ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten dazu kritisch Stellung!



Anhang 3: Arbeitsmaterialien der Lehrerfortbildung

Experiment 1

LED-LEUCHTSTOFF AUS DER MIKROWELLE



1 Die Reaktionslösung herstellen

- In die Wägeschälchen die folgenden Chemikalien möglichst exakt einwiegen.
 - 0,81 g Yttriumnitrat-6-hydrat**
 - 3,46 g Aluminiumnitrat-9-hydrat**
 - 0,02 g Cernitrat-6-hydrat**
 - 2,20 g Harnstoff**
- Die Nitrats im Becherglas mit Rührfisch vereinen und mit **1 mL H₂O** dest. lösen.
- Anschließend den Harnstoff zugeben.
- Bei **60 °C** rühren, bis eine homogene Lösung entsteht.

Am besten die Reaktionstiegel zum „Vorheizen“ auch auf die Heizplatte stellen.

2 Die Mikrowelle vorbereiten – Hotspot Suche 🔍

- Auf die Styroporunterlage Zellstoff ausbreiten und mit Wasser aus der Spritzflasche anfeuchten. Darauf Thermopapier auslegen.
- In die Mikrowelle legen und diese wenige Minuten in Betrieb nehmen bis schwarze Flecken erscheinen. Anschließend entnehmen.
- An einem der Hotspots den Gasbetonstein (Unterlage) und die sandgefüllte Kristallisierschale positionieren.

HotSpots in der Mikrowelle entstehen durch konstruktive Interferenz der Mikrowellen. Deshalb gibt es den Drehteller!

3 Die Synthese in der Mikrowelle

- **0,75 mL** der hergestellten Lösung in den Reaktionstiegel pipettieren.
- Den Tiegel mittig in die sandgefüllten Kristallisierschale stellen.
- Die Mikrowelle einschalten, **Abzug schließen!**
- Die Reaktion ist nach gelb-grünen Aufleuchten beendet.
- Die Mikrowellentüre öffnen und Dampf abziehen lassen.
- Den Tiegel mit der Tiegelszange entnehmen.
- Mit der UV-Taschenlampe beleuchten.

Am einfachsten kann man die Mikrowelle durch einen Netzschalter außerhalb des Abzuges ein/ausschalten!

4 Vom Leuchtstoff zur weißen LED

- Entstandenen Feststoff mörsern. Das Pulver in einem Wägeschälchen mit UHU-Kleber vermengen.
- Zähle Masse **dünn** auf blaue CoB-LED auftragen.



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

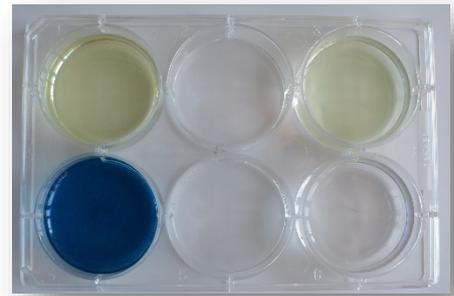


EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Experiment 2

ANTIOXIDATIVE WIRKUNG IN WELL PLATE

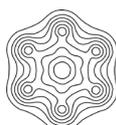


1 Nachweis der reduzierenden Eigenschaften

- Je **2 mL der FeCl_3 -Lösung** und **2 mL der $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ -Lösung** in Kammern 1 und 4 pipettieren.
- In Kammer 4 einen Tropfen der **Antioxidans-Lösung** zugeben.

2 Nachweis der radikalfangenden Eigenschaften

- Je **4 mL der Fluorescein-Lösung** in Kammern 3 und 6 pipettieren.
- In Kammer 6 **einen Tropfen der Antioxidans-Lösung** tropfen.
- Jeweils **5 Tropfen H_2O_2 -Lösung** hinzu pipettieren.
- Mit UV-Licht beleuchten.



Experiment 3

KNICKLICHT VS. ANTIOXIDANS



1

Die Reagenzgläser vorbereiten

- Beide Reagenzgläser zu einem Drittel mit **H₂O dest.** befüllen.
- In ein Reagenzglas **0,2 g Hydroxytyrosol** geben. In das andere als Vergleichssubstanz **0,2 g Maltodextrin**.
- Durch Schütteln lösen.

Das Maltodextrin ist als Füllstoff dem Hydroxytyrosol zugegeben und dient hier als Blindprobe.

2

Die Knicklichter öffnen

- 2 Knicklichter durch mehrfaches **Knicken auf ganzer Länge** aktivieren.
- Knicklichter zu einem Drittel in die durchbohrten Stopfen einführen.
- Mit dem Cutter das untere Ende der Knicklichter schräg anschneiden. Dabei möglichst wenig Druck ausüben!
- Die Knicklichter mit dem Stopfen auf die Reagenzgläser stecken.

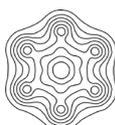
Die Innenliegende Glasphiole sollte in möglichst kleine Stücke zerbrochen werden!

3

Entleeren der Knicklichter

- Mit der Einmalspritze an den Kanülen den Inhalt der Knicklichter in die Reagenzgläser ziehen.

Der Unterdruck im Reagenzglas entleert das Knicklicht. Durch den Versuchsaufbau kommt man mit dem Inhalt nicht in Kontakt.



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN



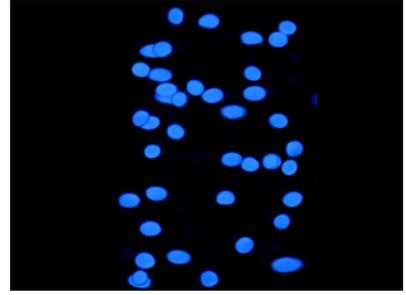
DIDAKTIK DER
CHEMIE
LMU

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Experiment 4

LUMINOL-BUBBLE-TEA



1 Die Bubble-Tea-Lösung herstellen

- In das Becherglas **25 mL** der bereitstehenden Lösung aus NH_4Cl und Na_2CO_3 geben.
- Eine **Spatelspitze Luminol** hinzufügen und auf dem Magnetrührer rühren.
- **1 mL CuSO_4 -Lösung** zugeben.
- **5 g Glucose** und **0,5 g Natriumalginat** hinzufügen.
- Lösung weiterrühren/quellen lassen.

2 Herstellung der Bubbles

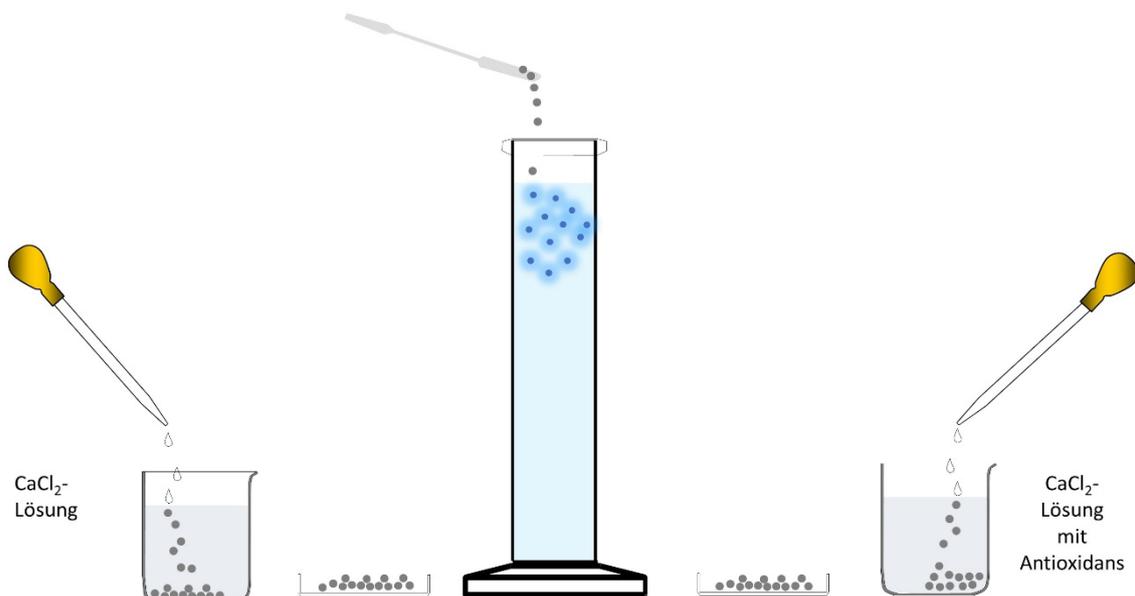
- Zwei Bechergläser mit je **50 mL der CaCl_2 -Lösung** befüllen.
- Eines der Bechergläser mit **0,2 g Hydroxytyrosol** versehen.
- Mithilfe der Pipette die Bubble-Tea-Lösung in die Bechergläser tropfen.
- Mit einem Sieb können die Bällchen entnommen werden.

3 Leuchten der Bubble-Tea-Bällchen

- Den Standzylinder mit **10 %iger H_2O_2 -Lösung** befüllen.
- Die Bubbles mit einem Mikrolöffel eingeben.

Das Alginat und die Glucose klumpen. Beides **langsam einrieseln** lassen! Im Zweifel kann die Lösung leicht erwärmt werden.

Es bietet sich an, die CaCl_2 -Lösung durch ein Sieb einfach in ein weiteres Becherglas umzufüllen, um die Bubbles zu entnehmen.



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN



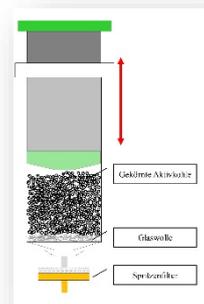
DIDAKTIK DER
CHEMIE
LMU

EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Experiment 5

DICLOFENAC IM ABWASSER



1 Vorversuch: Identifizieren verschiedener Schmerzmittel

- Je eine Spatelspitze der 3 Substanzen in je eine Mulde der Tüpfelplatte geben.
- Je 1-2 Tropfen des Nachweis-Reagenzes hinzugeben.
- Farbänderung identifizieren.

2 Diclofenac aus dem Abwasser entfernen

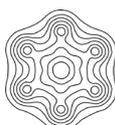
- Nehmen Sie mit dem UV/Vis eine „Backline“ (*F1*) mit dem Lösemittel Wasser auf.
- Befüllen Sie eine Quarzküvette mit der bereitgestellten Diclofenac-Lösung.
- Nehmen Sie ein UV/Vis-Spektrum der Lösung auf.
- Stellen Sie eine Aktivkohlespritze her. Geben Sie dazu wenig Glaswolle in die Spritze, drücken Sie mit dem Stempel fest und befüllen Sie bis zur Hälfte mit Aktivkohle.
- Befüllen Sie die Spritze mit Diclofenac-Lösung
- Schrauben Sie einen Spritzenfilter auf, entleeren Sie den Inhalt in eine Küvette.
- Mit dem Inhalt der Spritze erneut UV/Vis-Spektrum aufnehmen.

Leichtes Schütteln verbessert den Reinigungsvorgang.

Ist kein UV/Vis vorhanden, kann der Nachweis auch mit einer 1 M NaOH Lösung gesättigt mit rotem Blutlaugensalz durchgeführt werden.

Nutzen Sie die zweigeteilte Petrischale

Probieren Sie es aus!



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN



EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Experiment 6

UMWELTFREUNDLICHE WUNDERKERZEN



1 Das Eduktgemisch herstellen

- In die Wägeschälchen die folgenden Chemikalien möglichst exakt einwiegen.
 - 0,85 g Strontiumnitrat**
 - 0,60 g Eisenpulver**
 - 0,10 g Aluminiumstaub**
 - 0,20 g kaltlösliche Stärke**
- Die Edukte in ein Becherglas geben und durch sanftes Schwenken vermischen, bis eine homogene Mischung entstanden ist.

2 Die Wunderkerze formen

- Zu dem Eduktgemisch mit einer Spritze 0,3 mL Wasser zugeben und mit dem Spatel verkneten, bis ein Klumpen entstanden ist.
- Die Masse hat die richtige Konsistenz, wenn sie als ein Klumpen am Spatel kleben bleibt.
- Anschließend mit den Fingern kneten.
- Den Klumpen zu einer etwa 2 cm langen Wulst ausrollen und den Stahldraht eindrücken. Dabei sollte der Stahldraht oben etwa 3 cm überstehen.
- Die Eindruckstelle des Stahldrahtes zudrücken und die Wunderkerze durch weiteres Ausrollen formen.

3 Abbrennen der Wunderkerze

- Die Wunderkerze zwei Stunden im Trockenschrank bei 70 °C oder 24 Stunden bei Raumtemperatur trocknen.
- Zum Abbrennen die Wunderkerze in ein mit Sand gefülltes Tongefäß stellen und oben anzünden.
- Im Vergleich dazu kann eine käufliche Wunderkerze daneben abgebrannt werden.

Zu Beginn erscheinen die 0,3 mL Wasser meist als knapp bemessen. Dies täuscht, mit mehr Wasser wird die Mischung zu klebrig.

Zum Ausrollen und Kneten der Wunderkerzenmasse **Einmalhandschuhe** anziehen.

Experiment 7

LOTOS-EFFEKT AN KUPFEROBERFLÄCHE



1 Vorbereitung des Kupferplättchens

- Kupferplättchen mit Schleifpapier abschmirgeln.
- Oberfläche mit **Isopropanol** reinigen. Trocknen.
- Mit der Pipette einige Tropfen Wasser auf das Plättchen tropfen und das Benetzungsverhalten beobachten.
- Kupferplättchen 10 min in **NaOH/K₂S₂O₈-Lösung** legen, bis sie eine tiefschwarze Farbe angenommen haben.

2 Testen der Oberflächenbeschaffenheit

- Das Plättchen mithilfe der Pinzette entnehmen. Dabei die Oberfläche nicht beschädigen.
- Mit **H₂O dest. abspülen** und an der Luft trocknen lassen.
- Mit einem Tropfen H₂O dest. das Benetzungsverhalten testen.

3 Erzeugung einer superhydrophoben Oberfläche

- Das schwarze Kupferplättchen für ca. 10 min in die **ethanolische Laurinsäure-Lösung** legen.
- Fertiges Plättchen mit **Aceton** abspülen und an der Luft trocknen lassen. Die Oberfläche dabei nicht beschädigen.
- Destilliertes Wasser auf das Kupferplättchen tropfen und Benetzungsverhalten und Selbstreinigungsfunktion testen.

Legen Sie das von Ihnen präparierte Plättchen in die Lösung und entnehmen Sie einfach ein bereits fertiges.



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN



EBERHARD KARLS
UNIVERSITÄT
TÜBINGEN



Anhang 4: Fragebögen



Fragebogen zur Lehrerfortbildung

„Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

im Folgenden bitten wir Sie im Rahmen Ihrer Teilnahme an der Lehrerfortbildung „Experimente zu modernen Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“ einige Fragen zu beantworten.

Dieser Fragebogen ist Teil eines Promotionsprojektes, das sich mit Nachhaltigkeit im Chemieunterricht beschäftigt.

Der Fragebogen ist dabei **anonym**. Für die spätere Zuordnung der Fragebögen, vor und nach der Fortbildung, bitten wir Sie jedoch, einen Code anzugeben:

| | | | | |
|--|---|--|--|--|
| | | | | |
| Erster Buchstabe des Vornamens der <u>Mutter</u> | Zweiter Buchstabe des Vornamens des <u>Vaters</u> | Zweiter Buchstabe des Vornamens der <u>Oma</u> mütterlicherseits | Erster Buchstabe des <u>eigenen</u> Geburtsortes | <u>Eigener</u> Geburtsmonat (zweistellig) z.B. Juni =06 |

Vielen Dank für Ihre Mithilfe und im Anschluss viel Vergnügen bei der heutigen Fortbildungsveranstaltung!

Dominik Diekemper & Prof. Dr. Stefan Schwarzer

Eberhard-Karls-Universität Tübingen
Auf der Morgenstelle 18
72076 Tübingen
Dominik.Diekemper@uni-tuebingen.de

Datenschutzhinweis: Die Erhebung ist anonym, wertefrei und freiwillig. Die Erhebung Ihrer Daten erfolgt vollständig anonymisiert, d. h. an keiner Stelle wird Ihr Name erfragt. Dennoch ist es wichtig, dass die Fragen bei der Auswertung einem Fragebogen eindeutig zugeordnet werden können. Dazu werden die Antworten und Ergebnisse unter einem von Ihnen selbst erstellten Code gespeichert. Ein Rückschluss auf Ihre Person ist ausgeschlossen. Es werden außer den von Ihnen angegebenen keine weiteren Daten erhoben. Ihre Angaben im Fragebogen werden absolut vertraulich behandelt. Sie können jederzeit die Löschung, Berichtigung oder Einschränkung der Verarbeitung Ihrer Daten verlangen. In diesen Fällen wenden Sie sich bitte an (dominik.diekemper@uni-tuebingen.de).

Hinweis: Ihre E-Mail-Adresse wird zum Zweck des Nachweises der Teilnahme an der Befragung aufbewahrt und kann nicht mit dem individuellen Antwortverhalten in Verbindung gebracht werden.



1. Angaben zur Person und Tätigkeit

| | |
|---|---|
| Alter | <input type="checkbox"/> < 30 Jahre <input type="checkbox"/> 30-40 Jahre <input type="checkbox"/> 40-50 Jahre <input type="checkbox"/> 50-60 Jahre <input type="checkbox"/> > 60 Jahre |
| Geschlecht | <input type="checkbox"/> weiblich <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> divers |
| Unterrichtstätigkeit | <input type="checkbox"/> seit einem Jahr <input type="checkbox"/> seit 2-5 Jahren <input type="checkbox"/> seit 6-10 Jahren <input type="checkbox"/> seit 11-20 Jahren <input type="checkbox"/> seit > 20 Jahren |
| Weiteres Unterrichtsfach | <input type="checkbox"/> Biologie <input type="checkbox"/> Geographie <input type="checkbox"/> Mathematik <input type="checkbox"/> _____ |
| Ausbildungs- bzw. Hochschulabschluss | <input type="checkbox"/> 2. Staatsexamen <input type="checkbox"/> Diplom <input type="checkbox"/> Master of Education <input type="checkbox"/> Promotion <input type="checkbox"/> _____ |
| Ort des Hochschulstudiums/Universität | _____ |
| Momentane Stundenverpflichtung | <input type="checkbox"/> Vollzeit <input type="checkbox"/> Teilzeit <input type="checkbox"/> < 50% <input type="checkbox"/> > 50% |
| Jahgangsstufen, die Sie derzeit in Chemie unterrichten | <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> 11 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> 12 <input type="checkbox"/> 10 <input type="checkbox"/> W-Seminar in Chemie <input type="checkbox"/> P-Seminar in Chemie <input type="checkbox"/> Biologisch-chemisches Praktikum |
| Regelmäßige Lektüre fachdidaktischer Zeitschriften | <input type="checkbox"/> MNU Journal <input type="checkbox"/> PdN Chemie (eingestellt) <input type="checkbox"/> Andere: _____ <input type="checkbox"/> Naturw. im Unterricht Ch. <input type="checkbox"/> Chemkon |
| Wie wurden Sie auf die Fortbildung aufmerksam gemacht? | <input type="checkbox"/> FIBS <input type="checkbox"/> E-Mail-Verteiler/Newsletter <input type="checkbox"/> GDCh-Veranstaltungsprogramm des LFBZ <input type="checkbox"/> Fachbetreuer <input type="checkbox"/> Kolleginnen/Kollegen <input type="checkbox"/> andere, und zwar: _____ |



2. Nachhaltigkeit

Definieren Sie bitte möglichst konkret den überfachlichen Begriff „Nachhaltigkeit“!

| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das Konzept hinter dem Begriff „Nachhaltigkeit“ ist mir vertraut. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte Nachhaltigkeit im Allgemeinen für ein wichtiges Thema. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte Nachhaltigkeit für ein Thema, das in Zukunft immer wichtiger wird. | <input type="checkbox"/> |
| Das Konzept „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BnE) ist mir vertraut. | <input type="checkbox"/> |
| Über die Weltdekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ das „UNESCO-Weltaktionsprogramm“ oder „Umweltbildung Bayern“ kam ich in Kontakt mit nachhaltigen Themen und Konzepten. | <input type="checkbox"/> |
| Der Begriff „Gestaltungskompetenz“ ist mir vertraut. | <input type="checkbox"/> |
| Im Rahmen meines Studiums bin ich mit BnE in Berührung gekommen. | <input type="checkbox"/> |
| Im Rahmen meines Referendariats bin ich mit BnE in Berührung gekommen. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit und BnE waren bereits Thema einer Fortbildung, die ich besucht habe. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit ist ein Thema, das aktuell im Chemieunterricht eine Rolle spielt. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit im Chemieunterricht halte ich für einen Aspekt, der die Schülerinnen und Schüler interessiert. | <input type="checkbox"/> |
| Die Fachwissenschaft Chemie leistet einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung. | <input type="checkbox"/> |



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ich kann mir vorstellen, chemierelevante, nachhaltige Themen in meinem eigenen Chemieunterricht zu bearbeiten. | <input type="checkbox"/> |
| Die Themen des Chemieunterrichts bieten geeignete Anknüpfungspunkte, um nachhaltige Entwicklung zu thematisieren. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung spielen eine wichtige Rolle an meiner Schule. | <input type="checkbox"/> |
| Ich verfüge über ausreichend viele Experimente, die nachhaltige Ansätze in der Chemie unterstreichen. | <input type="checkbox"/> |
| Ich wünsche mir mehr unterrichtsrelevante Versuche, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen. | <input type="checkbox"/> |

Besonders wichtig für die Umsetzung einer Bildung für nachhaltige Entwicklung sind die Fächer (Mehrfachnennung möglich):

- | | | |
|--------------------------------------|--|-------------------------------------|
| <input type="radio"/> Religion/Ethik | <input type="radio"/> Deutsch | <input type="radio"/> Fremdsprachen |
| <input type="radio"/> Mathematik | <input type="radio"/> Informatik | <input type="radio"/> Physik |
| <input type="radio"/> Chemie | <input type="radio"/> Biologie | <input type="radio"/> Geschichte |
| <input type="radio"/> Geographie | <input type="radio"/> Wirtschaft & Recht | <input type="radio"/> P-/W-Seminar |

Für wie wichtig halten Sie eine Bildung für nachhaltige Entwicklung im Schulunterricht auf einer **Skala von 0 bis 10** (0 = überhaupt nicht wichtig, 10 = ziemlich wichtig):

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| a) im Allgemeinen | <input type="checkbox"/> |
| b) im Chemieunterricht | <input type="checkbox"/> |

Welche lehrplan-/bildungsplanrelevanten Themen sind Ihrer Meinung nach geeignet, um Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht zu implementieren?



3. Teilnahme an Fortbildungen

| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Grundsätzlich nehme ich an Lehrerfortbildungen teil, weil... | | | | | |
| ...ich Kontakte zu Kollegen an anderen Schulen pflegen kann. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich den kollegialen Austausch suche. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich Kontakt zu Kollegen mit ähnlichen Interessen knüpfen kann. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich an den Erfahrungen anderer Kollegen teilhaben will. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich im Kollegium nicht unangenehm auffallen will. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich dazu verpflichtet bin. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich sonst mit Restriktionen rechnen muss. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich von meinen Kollegen für das Einbringen neuer Ansätze Anerkennung erhalte. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich meine Aufstiegschancen erhöhen kann. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich mich für Leitungsfunktionen/Funktionsstellen qualifizieren will. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich dort Anleitung zur Lösung von Problemen im Schulalltag erwarte. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich up-to-date sein möchte über neue Experimente für den Chemieunterricht. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich mich für methodisch-didaktische Innovationen interessiere. | <input type="checkbox"/> |
| ...ich meinen Unterricht nach dem neusten pädagogischen und didaktischen Forschungsstand ausrichten will. | <input type="checkbox"/> |
| Bitte bewerten Sie folgende Aussagen! | | | | | |
| Ich bin offen für neue Experimente für meinen Chemieunterricht. | <input type="checkbox"/> |
| Das Testen neuartiger Experimente für den Chemieunterricht bereitet mir Freude. | <input type="checkbox"/> |
| Neue Experimente in den Chemieunterricht einzubauen bedeutet für mich einen erheblichen Mehraufwand. | <input type="checkbox"/> |
| Ich bin motiviert, die neuen Experimente in meinem Unterricht durchzuführen. | <input type="checkbox"/> |



Fragebogen zur Lehrerfortbildung

„Moderne Materialien und Nachhaltigkeit im Chemieunterricht“

| | | | | |
|--|---|--|--|---|
| | | | | |
| Erster Buchstabe des Vornamens der <u>Mutter</u> | Zweiter Buchstabe des Vornamens des <u>Vaters</u> | Zweiter Buchstabe des Vornamens der <u>Oma</u> mütterlicherseits | Erster Buchstabe des <u>eigenen</u> Geburtsortes | <u>Eigener</u> Geburts- monat (zweistellig) also Juni =06 |

1. Nachhaltigkeit

Definieren Sie bitte möglichst konkret den überfachlichen Begriff „Nachhaltigkeit“!

| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das Konzept hinter dem Begriff „Nachhaltigkeit“ ist mir vertraut. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte Nachhaltigkeit im Allgemeinen für ein wichtiges Thema. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte Nachhaltigkeit für ein Thema, das in Zukunft immer wichtiger wird. | <input type="checkbox"/> |
| Das Konzept „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ (BnE) ist mir vertraut. | <input type="checkbox"/> |
| Der Begriff Gestaltungskompetenz ist mir vertraut. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit ist ein Thema, das aktuell im Chemieunterricht eine Rolle spielt. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit im Chemieunterricht halte ich für einen Aspekt, der die Schülerinnen und Schüler interessiert. | <input type="checkbox"/> |
| Die Fachwissenschaft Chemie leistet einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung. | <input type="checkbox"/> |
| Ich kann mir vorstellen, chemierelevante, nachhaltige Themen in meinem eigenen Chemieunterricht zu bearbeiten. | <input type="checkbox"/> |



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Die Themen des Chemieunterrichts bieten geeignete Anknüpfungspunkte, um nachhaltige Entwicklung zu thematisieren. | <input type="checkbox"/> |
| Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung spielen eine wichtige Rolle in meiner Schule. | <input type="checkbox"/> |
| Ich verfüge über Experimente, die nachhaltige Ansätze in der Chemie unterstreichen. | <input type="checkbox"/> |
| Ich wünsche mir mehr unterrichtsrelevante Versuche, die die Nachhaltigkeit der Chemie unterstreichen. | <input type="checkbox"/> |

Für wie wichtig halten Sie eine Bildung für nachhaltige Entwicklung im Schulunterricht auf einer **Skala von 0 bis 10** (0 = überhaupt nicht wichtig, 10 = ziemlich wichtig):

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| a) im Allgemeinen | <input type="checkbox"/> |
| b) im Chemieunterricht | <input type="checkbox"/> |

Welche lehrplan-/bildungsplanrelevanten Themen sind Ihrer Meinung nach geeignet, um Bildung für nachhaltige Entwicklung im Chemieunterricht zu implementieren?



2. Evaluation der Experimente

Mikrowellensynthese Leuchtstoff & Selfmade LED

Bitte bewerten Sie das Experiment

Note 1 (sehr gut für die Schule geeignet) – Note 6 (für die Schule ungeeignet)



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das vorgestellte Experiment entspricht meinen Vorstellungen an ein Schulexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Ich schätze das Interesse der Schülerinnen und Schüler an diesem Experiment als hoch ein. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte das Experiment für gelingsicher und reproduzierbar. | <input type="checkbox"/> |
| Ich sehe inhaltliche Umsetzungsschwierigkeiten im Unterricht. | <input type="checkbox"/> |
| Ich habe vor, das Experiment in meinem Chemieunterricht einzusetzen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Thema des Experiments besitzt großes Potential für die Unterrichtspraxis. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich gut in den Chemieunterricht integrieren. | <input type="checkbox"/> |
| Den Zusammenhang zum Thema Nachhaltigkeit kann ich klar erkennen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich in der Schule mit den vorhandenen Mitteln problemlos durchführen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment eignet sich besonders als Lehrerdemonstrationsexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment kann problemlos von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden. | <input type="checkbox"/> |

Vom Abwasser zum „Functional Food“: Hydroxytyrosol; Experiment in der WELL-Plate

Bitte bewerten Sie das Experiment

Note 1 (sehr gut für die Schule geeignet) – Note 6 (für die Schule ungeeignet)



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das vorgestellte Experiment entspricht meinen Vorstellungen an ein Schulexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Ich schätze das Interesse der Schülerinnen und Schüler an diesem Experiment als hoch ein. | <input type="checkbox"/> |



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Ich halte das Experiment für gelingsicher und reproduzierbar. | <input type="checkbox"/> |
| Ich sehe inhaltliche Umsetzungsschwierigkeiten im Unterricht. | <input type="checkbox"/> |
| Ich habe vor, das Experiment in meinem Chemieunterricht einzusetzen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Thema des Experiments besitzt großes Potential für die Unterrichtspraxis. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich gut in den Chemieunterricht integrieren. | <input type="checkbox"/> |
| Den Zusammenhang zum Thema Nachhaltigkeit kann ich klar erkennen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich in der Schule mit den vorhandenen Mitteln problemlos durchführen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment eignet sich besonders als Leherdemonstrationsexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment kann problemlos von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden. | <input type="checkbox"/> |

Vom Abwasser zum „Functional Food“: Antioxidative Eigenschaften mit Knicklicht

Bitte bewerten Sie das Experiment

Note 1 (sehr gut für die Schule geeignet) – Note 6 (für die Schule ungeeignet)



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das vorgestellte Experiment entspricht meinen Vorstellungen an ein Schalexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Ich schätze das Interesse der Schülerinnen und Schüler an diesem Experiment als hoch ein. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte das Experiment für gelingsicher und reproduzierbar. | <input type="checkbox"/> |
| Ich sehe inhaltliche Umsetzungsschwierigkeiten im Unterricht. | <input type="checkbox"/> |
| Ich habe vor, das Experiment in meinem Chemieunterricht einzusetzen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Thema des Experiments besitzt großes Potential für die Unterrichtspraxis. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich gut in den Chemieunterricht integrieren. | <input type="checkbox"/> |
| Den Zusammenhang zum Thema Nachhaltigkeit kann ich klar erkennen. | <input type="checkbox"/> |



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das Experiment lässt sich in der Schule mit den vorhandenen Mitteln problemlos durchführen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment eignet sich besonders als Lehrerdemonstrationsexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment kann problemlos von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden. | <input type="checkbox"/> |

Vom Abwasser zum „Functional Food“: Bubble-Tea

Bitte bewerten Sie das Experiment

Note 1 (sehr gut für die Schule geeignet) – Note 6 (für die Schule ungeeignet)



| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das vorgestellte Experiment entspricht meinen Vorstellungen an ein Schalexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Ich schätze das Interesse der Schülerinnen und Schüler an diesem Experiment als hoch ein. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte das Experiment für gelingsicher und reproduzierbar. | <input type="checkbox"/> |
| Ich sehe inhaltliche Umsetzungsschwierigkeiten im Unterricht. | <input type="checkbox"/> |
| Ich habe vor, das Experiment in meinem Chemieunterricht einzusetzen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Thema des Experiments besitzt großes Potential für die Unterrichtspraxis. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich gut in den Chemieunterricht integrieren. | <input type="checkbox"/> |
| Den Zusammenhang zum Thema Nachhaltigkeit kann ich klar erkennen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich in der Schule mit den vorhandenen Mitteln problemlos durchführen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment eignet sich besonders als Lehrerdemonstrationsexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment kann problemlos von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden. | <input type="checkbox"/> |



Diclofenac im Abwasser

Bitte bewerten Sie das Experiment

Note 1 (sehr gut für die Schule geeignet) – Note 6 (für die Schule ungeeignet)

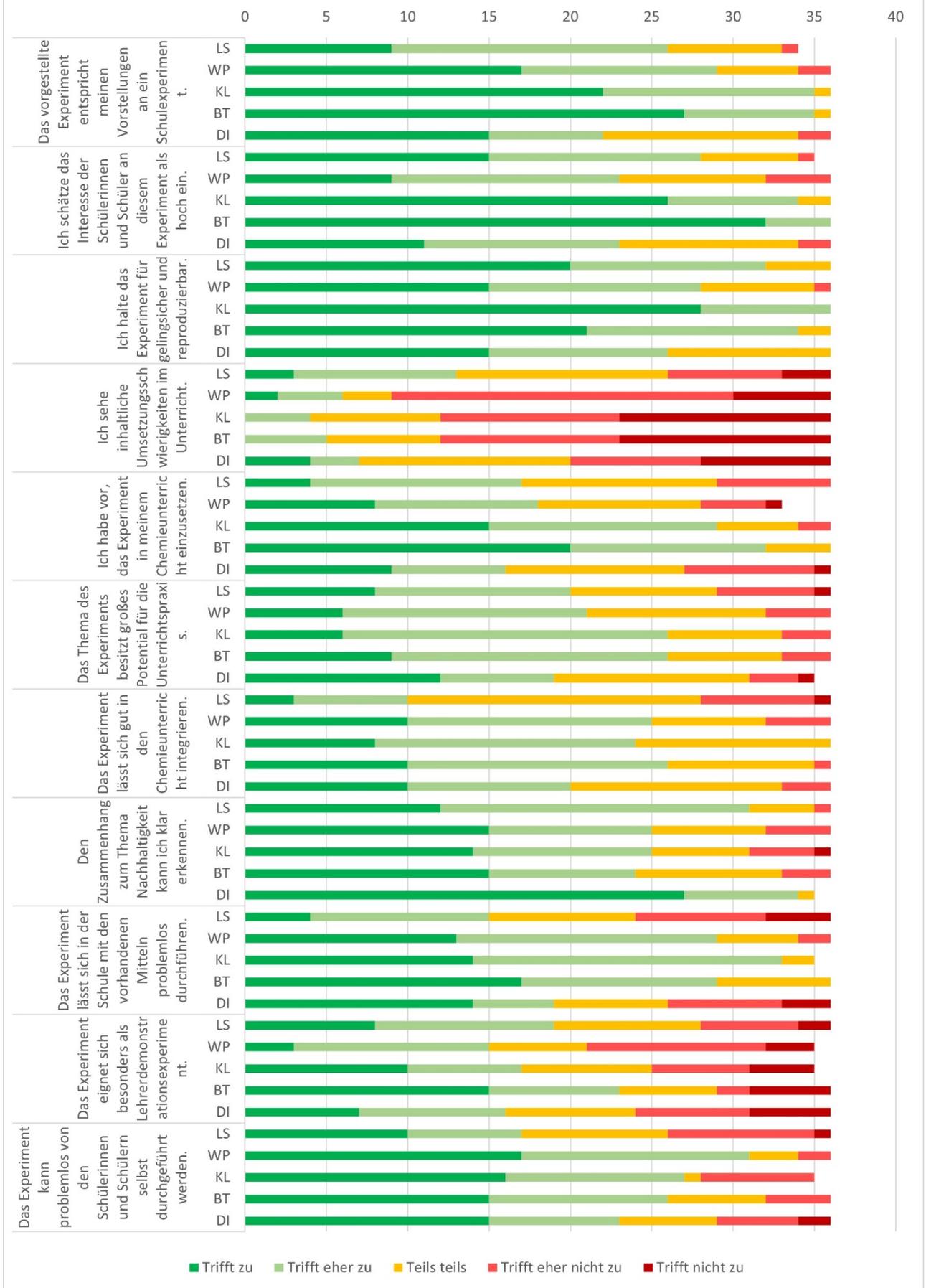


| | Trifft zu | Trifft eher zu | Teils teils | Trifft eher nicht zu | Trifft nicht zu |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Das vorgestellte Experiment entspricht meinen Vorstellungen an ein Schulexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Ich schätze das Interesse der Schülerinnen und Schüler an diesem Experiment als hoch ein. | <input type="checkbox"/> |
| Ich halte das Experiment für gelingsicher und reproduzierbar. | <input type="checkbox"/> |
| Ich sehe inhaltliche Umsetzungsschwierigkeiten im Unterricht. | <input type="checkbox"/> |
| Ich habe vor, das Experiment in meinem Chemieunterricht einzusetzen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Thema des Experiments besitzt großes Potential für die Unterrichtspraxis. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich gut in den Chemieunterricht integrieren. | <input type="checkbox"/> |
| Den Zusammenhang zum Thema Nachhaltigkeit kann ich klar erkennen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment lässt sich in der Schule mit den vorhandenen Mitteln problemlos durchführen. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment eignet sich besonders als Leherdemonstrationsexperiment. | <input type="checkbox"/> |
| Das Experiment kann problemlos von den Schülerinnen und Schülern selbst durchgeführt werden. | <input type="checkbox"/> |

Haben Sie sonst offene **Fragen, Wünsche, Anregungen, Kritik** zu Themen der Fortbildung?

Anhang 5: Zusammenfassende Darstellung der Evaluation der Experimente

Zusammenfassung Auswertung Experimente



LS = Mikrowellensynthese Leuchtstoff; WP = Experiment WELL-Plate; KL = Experiment Knicklicht; BT = Experiment Bubble-Tea; DI = Experiment Diclofenac