

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

Didaktische Erschließung von Schülerexperimentierstationen  
zum Themenfeld moderne Materialien und Konzeption eines  
universitären Seminars zur Förderung digitaler Kompetenzen  
im chemischen Experiment bei Lehramtsstudierenden im Rah-  
men eines Lehr-Lern-Labor-Settings

MICHAEL ALEXANDER MARTENS (geb. SCHEID)

aus

München, Deutschland

2022

# 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, 01.08.2022

---

Michael A. Martens

Dissertation eingereicht am	06.04.2022
1. Gutachter:	Prof. Dr. Stefan Schwarzer
2. Gutachterin:	Prof. Dr. Maike Busker
Mündliche Prüfung am	19.05.2022

*“Stellt nicht die Wissenschaft einen sehr wertvollen Faktor in der Entwicklung des Menschentums dar? Sie erzieht den Menschen zum wunschlosen Streben nach Wahrheit und zur Objektivität, sie lehrt Menschen Tatsachen anzuerkennen, sich wundern und bewundern zu können [...]“*

*- LISE MEITNER -*

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all jenen danken, die mir diese Doktorarbeit ermöglicht und mich während meiner Promotionszeit bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Als Erstes möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich für die hervorragende Betreuung bei meinem Doktorvater *Herrn Professor Stefan Schwarzer* bedanken, der mir durch die Einwerbung eines Drittmittelprojektes die Promotion überhaupt erst ermöglicht hat. Vielen Dank Stefan, dass du mir jederzeit mit einem offenen Ohr zur Seite gestanden hast!

*Frau Professorin Maike Busker* möchte ich für die Ermöglichung meines interessanten und gewinnbringenden Forschungsaufenthalts an der Europa-Universität Flensburg sowie für die Anfertigung des Zweitgutachtens danken.

Darüber hinaus bedanke ich mich ganz herzlich bei *Frau Dr. Kristina Hock*, die mich während meines Lehramtsstudiums stets gefördert und mich über viele Jahre hinweg bis zum Ende meiner Promotionszeit immer mit hilfreichen Ideen und guten Tipps begleitet hat.

*Herrn Professor Thomas M. Klapötke*, *Frau Dr. Magdalena Rusan* und dem gesamten Team der Arbeitsgruppe für hochenergetische Materialien möchte ich für die Unterstützung bei den vielen Testungen der Wunderkerzen danken.

Meinen lieben Kollegen *Dr. Dominik Diekemper*, *Lisa Knie* und *Anja Wallner* möchte ich für die gute Zusammenarbeit und für das Korrekturlesen meiner Arbeit danken. Lieben Dank euch dreien auch für die netten und stets gewinnbringenden Bürogespräche.

Bei *Frau Gudrun Baltjan* und *Frau Edith Karaghiosoff* möchte ich mich ganz herzlich für die vielfältige Unterstützung im Labor bedanken.

Ein weiterer Dank geht an die studentischen Hilfskräfte *Laura Pohl* und *Janina Spitzel*, die zudem ihre Zulassungsarbeiten im Schülerlabor angefertigt haben und somit auch zur Anfertigung dieser Promotion beigetragen haben. Ihr habt mir oft den Rücken freigehalten, wenn es im Schülerlabor wieder mal eng wurde!

Der gesamten Arbeitsgruppe für die Didaktik der Chemie an der LMU München sowie den Arbeitsgruppen für Chemiedidaktik an den Universitäten in Tübingen und Flensburg möchte

ich für die vielfältige und großartige Unterstützung bei der Durchführung des Schülerlabors danken.

Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle allen Schulklassen und Lehrkräften, den Studierenden im Schülerlaborseminar sowie den vielen Hilfskräften und Zulassungskandidatinnen und -kandidaten, die das Schülerlabor LMU*chemlab* mit Leben füllten und mir so meine Arbeit erst ermöglichten.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Familie und ganz besonders bei meiner Frau *Melanie* für die Unterstützung und das unermüdliche Korrekturlesen während meiner Promotion bedanken.

## Zusammenfassung

Die fortschreitende Digitalisierung führt zu einem Wandel in allen Bereichen unserer Gesellschaft. Sie ist inzwischen in alle Facetten des Alltags vorgedrungen. Aus diesem Grund sind digitale Kompetenzen die Voraussetzung für gesellschaftliche Teilhabe sowie Selbstbestimmung. Damit Schüler\*innen auf das Leben in der digitalisierten Welt vorbereitet werden und den digitalen Wandel mitgestalten können, müssen sie sich bereits während ihrer Schullaufbahn digitale Kompetenzen aneignen. Die Kultusministerkonferenz fordert in ihrem Strategiepapier *Bildung in der digitalen Welt*, dass Schüler\*innen digitale Kompetenzen in allen Fächern erlernen sollen. Den Lehrkräften kommt hierdurch eine neue, zusätzliche bildungspolitische Schlüsselrolle zu: Sie müssen den Schüler\*innen fächerübergreifend digitale Kompetenzen sowie Wissen zu rechtlichen Fragen, zur Reflexion, aber auch zur kritischen Betrachtung von digitalen Medien vermitteln. Um diese Aufgabe mit professionellem Wissen und professionellen Kompetenzen fachgerecht zu erfüllen, benötigen Lehrkräfte selbst digitale Medienkompetenzen. Mit der Aneignung dieses Wissens und der Kompetenzen sollten angehende Lehrkräfte bereits in der ersten Phase der Lehrerbildung, dem universitären Studium, beginnen.

Für eben diese Förderung der digitalen Medienkompetenzen wurden Schülerexperimentierstationen zu modernen Materialien für ein Schülerlaborprogramm sowie ein universitäres Seminar für Lehramtsstudierende der Chemie konzipiert. Damit konnten die Studierenden an das Unterrichten mit digitalen Medien im chemischen Experiment herangeführt werden. Die Fusion aus konzeptioneller Arbeit zur Entwicklung neuer Experimente und Schülerlaborstationen sowie die Verbindung zu digitalen Medien stellte das oberste Forschungsziel der vorliegenden Arbeit dar, die im Rahmen des Projekts *DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>* entwickelt, erprobt und evaluiert wurde. Das Projekt wurde von der vom BMBF initiierten Förderlinie *Qualitätsoffensive Lehrerbildung* am *Münchner Zentrum für Lehrerbildung* der LMU München finanziert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eigens ein Schülerlaborprogramm konzipiert, dessen fünf Experimentierstationen alle in Bezug zu modernen Materialien stehen und dabei digitale Medien im chemischen Experiment einbeziehen. Eine dafür neu entwickelte Experimentierstation thematisiert den 3D-Druck sowie die chemischen Eigenschaften der hierbei verwendeten Druckfilamente (Publikationen 1 und 2).

Des Weiteren wurden in Kooperation mit der Fachforschung im Zuge dieser Arbeit neuartige, toxikologisch und ökologisch unbedenklichere Wunderkerzen entwickelt, welche durch die Überprüfung ihres Gefahrenpotentials von Schüler\*innen erstmals selbst hergestellt werden dürfen (Publikation 3). Ein geänderter Herstellungsprozess ermöglicht es den Schüler\*innen zudem, die Wunderkerzen schnell sowie gelingsicher anzufertigen (Publikation 4). Die Herstellung der Wunderkerzen wurde als eine Experimentierstation in das Schülerlaborprogramm implementiert. Darüber hinaus wurde eine Unterrichtseinheit konzipiert, in welcher mit Hilfe eines Modellversuchs die Umweltverträglichkeit von Wunderkerzen diskutiert werden kann (Publikation 5).

Auf Basis des Schülerlaborprogramms wurde ein universitäres Begleitseminar konzipiert, das die teilnehmenden Lehramtsstudierenden zur (Weiter-)Entwicklung ihrer digitalen Kompetenzen befähigt (Publikation 6). Die Evaluation des an den Universitäten in München, Flensburg und Tübingen standortübergreifend durchgeführten Seminars zeigte dessen Wirksamkeit zur (Weiter-)Entwicklung von digitalen Kompetenzen bei den Seminarteilnehmenden (Publikation 7). Hierzu wurden die Veränderungen der *Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien*, der *Werteinstellung gegenüber digitalen Medien im Unterricht* sowie des *Digital* und *Digital Pedagogical Knowledge* vor sowie nach dem Seminar untersucht. Es zeigte sich, dass das Seminar einen positiven Einfluss auf die (Weiter-)Entwicklung digitaler Kompetenzen der Seminarteilnehmer\*innen hatte. Zudem wurde festgestellt, dass sich Lehramtsstudierende, die in Lehr-Lern-Laboren in Microteachingsituationen betreuen, vorab eine Phase des Peerteachings zur Steigerung des Selbstvertrauens wünschen.

## Summary

Advancing digitalization is leading to change in all sectors of our society. It has now penetrated all facets of everyday life. For this reason, digital skills are a prerequisite for social participation and self-determination. In order for school students to be prepared for life in a digitalized world and to be able to shape digital change, they must acquire digital skills during their school time. In its strategy paper *Bildung in der digitalen Welt (Education in the digital world)*, the Standing Conference of the Ministers of Education calls for school students to learn digital skills in all subjects. This gives teachers a new, additional key role in education policy: they have to teach school students interdisciplinary digital skills, impart knowledge about legal issues, facilitate students' reflection, and teach them to take a critical look at digital media. In order to perform these tasks properly with professional knowledge and skills, teachers need digital media skills themselves. Prospective teachers should start acquiring this knowledge and these skills as early as the first phase of teacher training, which takes place during their university studies.

For precisely this encouragement of digital media skills, school student experimental stations were designed with modern materials for a school student laboratory program and a university seminar for chemistry teacher trainees. This enabled the teacher trainees to be introduced to teaching with digital media in chemical experiments. The fusion of conceptual work for the development of new experiments and school student laboratory stations as well as the connection to digital media represented the primary research goal of the present work, which was developed, tested, and evaluated as part of the *DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>* project. The Federal Ministry of Education and Research-initiated funding line financed the project on quality-assurance teacher training at the *Munich Center for Teacher Education* at the LMU Munich.

As part of this work, a school student laboratory program was specially designed. The five experimental stations included in the program are all related to modern materials and include digital media in chemical experiments. A newly developed experimental station focuses on 3D printing and the chemical properties of the printing filaments used (Publications 1 and 2).

Furthermore, in cooperation with specialist research, new, toxicologically and ecologically less harmful sparklers were developed in the course of this work, which, after examining their risk potential, can be produced by schoolchildren for the first time (Publication 3). A modified

manufacturing process also enables the school students to make the sparklers quickly and in a failsafe way (Publication 4). The production of the sparklers was implemented as an experimental station in the school student laboratory program. In addition, a teaching unit was designed in which the environmental compatibility of sparklers can be discussed with the help of a model experiment (Publication 5).

Based on the school student laboratory program, a university seminar was designed to enable the participating prospective teachers to develop their digital skills (Publication 6). The evaluation of the seminar, which was carried out at the universities in Munich, Flensburg, and Tübingen, showed its effectiveness for the development of digital skills among the seminar participants (Publication 7). For this purpose, changes in the *self-efficacy expectation in dealing with digital media*, the *value attitude towards digital media in the classroom*, and the *Digital and Digital Pedagogical Knowledge* were examined before and after the seminar. It was shown that the seminar had a positive influence on the development of the digital skills of the seminar participants. In addition, it was detected that teacher trainees who supervise micro-teaching situations in school student laboratories would like to have a phase of peer teaching beforehand to increase their self-confidence.

## Publikationsverzeichnis

Teile der vorliegenden Dissertation wurden bereits in den nachfolgend aufgeführten Publikationen veröffentlicht bzw. befinden sich in Vorbereitung hierfür.

### Forschungsartikel (peer-review Verfahren)

- MICHAEL SCHEID, KRISTINA HOCK & STEFAN SCHWARZER (2019). **3D printing in chemistry teaching: From a submicroscopic molecule to macroscopic functions – Development of a molecular model set and experimental analysis of the filaments.** *World Journal of Chemical Education*, 7(2), 72–83.
- MICHAEL SCHEID, LAURA POHL, MAGDALENA RUSAN, THOMAS M. KLAPÖTKE & STEFAN SCHWARZER (2020, online first). **Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: Ein bewährter Schulversuch im neuen Licht.** *CHEMKON*, 29(3), 92-101.
- MICHAEL SCHEID, MAGDALENA RUSAN, THOMAS M. KLAPÖTKE & STEFAN SCHWARZER (2021). **The production of less harmful and less toxic sparklers in an experiment for school students.** *Chemistry Teacher International*, 3(3), 285–294.
- MICHAEL A. MARTENS & STEFAN SCHWARZER (2022, online first). **Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors.** *CHEMKON*. DOI: 10.1002/ckon.202100063

### Beiträge in Zeitschriften zur Wissenschaftskommunikation, Unterrichtszwecken und Hochschullehre (Begutachtung durch Herausgeber/Redaktion)

- MICHAEL SCHEID, KRISTINA HOCK & STEFAN SCHWARZER (2018). **Kunststoffe und 3D-Druck – Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaukastens.** *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 29(164), 20–26.
- MICHAEL SCHEID, MAGDALENA RUSAN, THOMAS M. KLAPÖTKE & STEFAN SCHWARZER (2021). **Chemiedidaktik: Funken selbstgemacht.** *Nachrichten aus der Chemie*, 69(9), 27–30.
- MICHAEL A. MARTENS, MAIKE BUSKER & STEFAN SCHWARZER (in Vorbereitung). **Förderung von digitalen Kompetenzen bei angehenden Chemielehrkräften im Lehr-Lern-Labor in Kombination mit einem universitären Seminarsetting.** *Lehrerbildung@LMU*.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	IV
Zusammenfassung .....	VI
Summary.....	VIII
Publikationsverzeichnis .....	X
Inhaltsverzeichnis.....	XI
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung der Arbeit .....	3
1.2 Strukturierung der Dissertation .....	5
<b>2 Digitale Medien im schulischen Kontext.....</b>	<b>7</b>
2.1 Politische Zielsetzung der Nutzung digitaler Medien im Unterricht.....	7
2.2 Digitale Medien im (Chemie-)Unterricht .....	8
2.3 Das TPACK bzw. DPACK-Modell .....	11
2.4 Digitale Medien im chemischen Experiment: Das DiKoLAN-Modell .....	14
2.5 Praxiselemente digitaler Medien in der fachdidaktischen Lehrerbildung an Universitäten.....	16
<b>3 Das Schülerlabor LMUchemlab.....</b>	<b>19</b>
3.1 Klassifizierung von Schülerlaboren .....	20
3.2 Das LMUchemlab .....	22
3.3 Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms.....	24
3.3.1 Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost- Reaktor.....	28
3.3.2 Station 2: Zukunftstechnologie 3D-Druck.....	29
3.3.3 Station 3: Energie in der Chemie .....	32
3.3.4 Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen.....	34
3.3.5 Station 5: Nanowelten .....	36

---

<b>4</b>	<b>Konzeption eines universitären Seminars zur Vermittlung digitaler Kompetenzen .....</b>	<b>38</b>
4.1	Publikationsstand Lehr-Lern-Labore .....	38
4.2	Das Lehr-Lern-Setting <i>Microteaching</i> .....	42
4.3	Videographie in Schülerlaboren für die Lehramtsausbildung .....	43
4.4	Das universitäre Begleitseminar zum LMUchemlab .....	44
4.5	Vermittlung digitaler Kompetenzen an den Experimentierstationen .....	45
<b>5</b>	<b>Publikationsbasierte Umsetzung der Zielsetzung dieser Arbeit .....</b>	<b>48</b>
5.1	Publikation 1: Kunststoffe und 3D-Druck – Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaukastens. ....	49
5.1.1	Einleitung .....	50
5.1.2	3D-Druck und (Chemie-)Unterricht .....	50
5.1.3	Stoffeigenschaften nach Maß .....	51
5.1.4	Vorgehen im Unterricht .....	51
5.1.5	Unterrichtliche Erprobung .....	52
5.2	Publikation 2: 3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions – Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments. ....	57
5.2.1	Abstract .....	58
5.2.2	Introduction .....	58
5.2.3	Principles of 3D Printing .....	59
5.2.4	Teaching Unit .....	62
5.2.5	Practical Evaluation and Outlook .....	63
5.3	Publikation 3: Chemiedidaktik: Funken selbstgemacht .....	70
5.3.1	Einleitung .....	71
5.3.2	Chemische Zusammensetzung .....	71
5.3.3	Funkenflug erzeugen .....	71
5.3.4	Prüfverfahren: explosiv oder nicht? .....	73
5.3.5	Wunderkerzen im Chemieunterricht .....	74
5.3.6	Ein Fazit: Zusammenarbeit mit der Grundlagenforschung .....	74
5.4	Publikation 4: The production of less harmful and less toxic sparklers in an experiment for school students .....	75
5.4.1	Abstract .....	76

---

5.4.2	Introduction .....	76
5.4.3	General information .....	77
5.4.4	Experimental procedure .....	79
5.4.5	Safety benefits of the school experiment.....	82
5.4.6	School use .....	83
5.4.7	Students' experience and comments .....	83
5.5	Publikation 5: Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: ein bewährter Schulversuch im neuen Licht.....	86
5.5.1	Zusammenfassung .....	87
5.5.2	Einleitung .....	87
5.5.3	Chemische Grundlagen der Wunderkerze.....	87
5.5.4	Unterrichtseinheit zu Wunderkerzen .....	90
5.5.5	Sicherheit .....	93
5.5.6	Rückmeldung von Schülerinnen und Schülern .....	94
5.6	Publikation 6: Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors.....	97
5.6.1	Zusammenfassung .....	98
5.6.2	Das LMUchemlab .....	98
5.6.3	Theoretische Grundlage: Das TPACK- bzw. DPACK-Modell.....	99
5.6.4	Experimentelle und digitale Inhalte des LMUchemlabs für die Sekundarstufe I .....	100
5.6.5	Förderung der digitalitätsbezogenen Kompetenzen der Seminarteilnehmenden .....	103
5.6.6	Wissenschaftliche Begleitforschung .....	103
5.6.7	Ausblick .....	104
5.7	Publikation 7 (in Vorbereitung): Förderung von digitalen Kompetenzen bei angehenden Chemielehrkräften. Kombination eines universitätsübergreifenden Lehr-Lern-Labors mit einem universitären Seminarsetting .....	105
5.7.1	Einleitung .....	106
5.7.2	Schülerlaborprogramm .....	107
5.7.3	Seminarsetting und Methodik .....	108
5.7.4	Ergebnisse der Interventionsstudie .....	111

---

5.7.5	Diskussion der Ergebnisse und Befunde .....	117
5.7.6	Fazit und Ausblick .....	118
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	121
6.1	Umgesetzte Zielsetzungen dieser Arbeit .....	121
6.2	Zusammenfassung .....	122
6.3	Ausblick .....	123
7	Abbildungsverzeichnis .....	124
8	Tabellenverzeichnis .....	125
9	Literaturverzeichnis.....	126
10	Anhang .....	136
	Anhang 1: Arbeitsblätter der Schülerlaborstationen .....	136
	Anhang 2: Prä-Fragebogen .....	150
	Anhang 3: Post-Fragebogen .....	158
	Anhang 4: Follow-Up-Fragebogen .....	166
	Anhang 5: Übersicht weiterer Veröffentlichungen .....	174

# 1 Einleitung

Digitale Medien sind in Form von Computern, Tablets, Smartphones, digitalen Messgeräten und vielem mehr aus dem Alltag der Menschen in unserer Gesellschaft nicht mehr wegzudenken – wobei es gerade in den letzten 15 Jahren große Fortschritte in der technischen Entwicklung gegeben hat. Dabei seien besonders Smartphones und Tablets erwähnt, welche durch ihre vielfältigen Ausstattungen und ihre Portabilität eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten besitzen. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel, wie schnell diese Geräte in alle Lebensbereiche vorgedrungen sind, zeigen die letzten beiden Papstwahlen: Während die Gläubigen beim Warten auf die Verkündung des neuen Papstes 2005 nur wenige Handys hatten, leuchtete zum selben Anlass nur acht Jahre später, im Jahr 2013, der Petersplatz und die sich daran anschließende Via Della Conciliazione durch tausende Smartphone- und Tabletdisplays [1].

In dem Strategiepapier „Bildung in der digitalen Welt“, das von der Kultusministerkonferenz im Jahr 2016 beschlossen wurde, stellen die Kultusminister der Länder eine „digitale Revolution“ fest, die alle Lebensbereiche betrifft und so zu einem stetigen Wandel im Alltag der Menschen führt [2]. Damit alle Menschen an diesem steten Wandel teilhaben können, muss der selbstbestimmte, reflektierte und kompetente Umgang mit digitalen Medien von frühester Kindheit an erlernt und eingeübt werden. Zu diesem Zweck formulierte die Kultusministerkonferenz zwei Ziele für die digitale Bildung, die in den Lehrplänen der Länder integriert werden sollen: das Lernen über und das Lernen mit digitalen Medien [2]. In diesem Zusammenhang wird die Digitalisierung von der Kultusministerkonferenz sowohl als Chance als auch als Herausforderung betrachtet, da die Digitalisierung Lernprozesse verändert und gleichzeitig neue Lernumgebungen und Möglichkeiten schafft, deren infrastrukturelle, rechtliche und personelle Rahmenbedingungen es erst noch zu entwickeln gilt [2].

Damit Schüler\*innen im Verlauf ihrer schulischen Laufbahn diese notwendigen digitalen Kompetenzen erwerben können, müssen an Schulen zwei Voraussetzungen erfüllt werden:

- Verfügbarkeit von digitalen Endgeräten inkl. Internetanschluss mit zeitgemäßer Bandbreite.
- Professionelle Kompetenzen der Lehrkräfte in der Wahrnehmung von und im Umgang mit digitalen Medien, um diese didaktisch korrekt und gewinnbringend einsetzen zu können.

Im Dezember 2021 wurde das Strategiepapier um ergänzende Empfehlungen zu *Lehren und Lernen in der digitalen Welt* erweitert und so der Fokus unter anderem auf die technische und didaktische Qualifizierung von Lehrkräften gerichtet [3].

Die im Jahr 2019 vom Bund beschlossene Förderung *DigitalPakt Schule* in Höhe von mindestens 6,5 Milliarden Euro soll eine gute technische Ausstattung der Schulen mit digitalen Medien sicherstellen. Von diesen Geldern wurden bis zum 31. Dezember 2021 erst Anträge von insgesamt etwas über 2,4 Milliarden Euro bewilligt [4]. Demzufolge ist es auch nicht verwunderlich, dass mehr als die Hälfte aller Schüler\*innen in der „Schüler-Studie zur Digitalisierung der Bildung“ aus dem Jahr 2020 noch die schlechte technische Ausstattung als eines der dringlichsten Probleme an ihrer Schule nennen [5].

Neben der technischen Ausstattung an den Schulen kommt den Lehrer\*innen die Schlüsselposition hinsichtlich der Anwendung und der Wissensvermittlung über digitale Medien zu [6], weshalb ein „stark erweitertes Kompetenzprofil der Lehrkräfte“ [2] notwendig ist. So wie durch den *DigitalPakt Schule* die Ausstattung von Schulen mit digitalen Endgeräten gefördert werden soll, ist das Ziel der *Qualitätsoffensive Lehrerbildung* die Förderung der universitären Lehrkräfteausbildung, zu der auch die Entwicklung digitaler Kompetenzen von Lehramtsstudierenden zählt [7]. Um als Mittler für die von den Schüler\*innen zu erwerbenden digitalen Kompetenzen auftreten zu können, müssen Lehrkräfte selbst professionelle Kompetenzen im Umgang mit und in der Wahrnehmung von digitalen Medien besitzen. Obwohl Schüler\*innen ihren Lehrer\*innen zu 79 Prozent zumindest eine positive Einstellung zu digitalen Medien attestieren [5], sehen die Lehrkräfte selbst noch an vielen Stellen Nachholbedarf [8]. Neben der unzureichenden digitalen Ausstattung und Infrastruktur betrifft dies vor allem ihre Aus- und Weiterbildung. So zeigt die Studie *Digitale Schule – vernetztes Lernen* aus dem Jahr 2015, dass sich 82 Prozent der Lehrer\*innen den Ausbau von Weiterbildungsangeboten zu digitalen Medien im Unterricht und 73 Prozent der Lehrer\*innen eine bessere Vorbereitung auf den Einsatz digitaler Medien im Unterricht während des Lehramtsstudiums wünschen [8]. Dabei identifizieren die Lehrkräfte – neben dem Fehlen der technischen Ausstattung – im Wesentlichen drei Hürden auf dem Weg zu einem häufigeren Einsatz digitaler Medien in ihrem Unterricht:

- Bei zehn Prozent der Lehrkräfte reichen nach eigener Einschätzung die technischen Fähigkeiten nicht für den unterrichtlichen Einsatz von digitalen Medien aus [8].

- 24 Prozent der Lehrer\*innen setzen digitale Medien aufgrund der Sorge vor einem Versagen der Technik im Unterricht nicht ein [8].
- Zudem fehlt es den Lehrkräften häufig an didaktisch geeignetem Lehrmaterial und pädagogischen Konzepten für den gewinnbringenden Einsatz digitaler Medien [8].

Die Ergebnisse der Umfrage erstaunen nicht, wenn man sie mit den Vorgaben der Bundesländer zur Implementierung von digitalen Medien im Lehramtsstudium vergleicht: Nur in fünf deutschen Bundesländern müssen im Lehramtsstudium für die Sekundarstufe I und nur in vier Bundesländern für die Sekundarstufe II Lehrveranstaltungen zum Erwerb professioneller Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien angeboten werden [9]. Das Angebot von Lehrveranstaltungen zum Erwerb professioneller Kompetenzen zum methodisch-didaktischen Einsatz digitaler Medien im Unterricht in Lehramtsstudiengängen für die Sekundarstufe I sowie II ist zudem nur in vier Bundesländern verpflichtend vorgeschrieben [9]. In Bayern, und somit in den Lehramtsstudiengängen der *Ludwig-Maximilians-Universität München*, sind Angebote zum Erwerb dieser beiden Kompetenzbereiche nicht verpflichtend [9]. Damit die Lehramtsstudierenden trotz der fehlenden Verpflichtung auf den Einsatz von digitalen Medien im Unterricht vorbereitet werden, wurde vom *Münchner Zentrum für Lehrerbildung* das Projekt *Lehrerbildung@LMU* initiiert, welches als einen von mehreren Schwerpunkten die Digitalisierung fokussiert. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung mit über 7 Millionen Euro gefördert. Das Teilprojekt *DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>* (Digitale Medien im Fachunterricht – Aufbau professioneller Handlungskompetenzen in der Uniklasse Mathematik/Chemie), in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, ist hiervon eines der 22 Teilprojekte.

## 1.1 Zielsetzung der Arbeit

Um den drei oben festgestellten Mängeln entgegenzuwirken, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit und dem damit verbundenen *DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>*-Teilprojekt eine Lehrveranstaltung zu digitalen Medien im Chemieunterricht für Lehramtsstudierende konzipiert. Das Ziel dieser Lehrveranstaltung ist der Aufbau professioneller Kompetenzen im Umgang mit und zum Einsatz von digitalen Medien im Chemieunterricht, wobei der Fokus auf der Implementierung dieser Medien in das chemische Experimentieren liegt. Dazu sollen angehenden Chemielehrer\*innen in der Lehrveranstaltung die für einen erfolgreichen Einsatz von digitalen

Medien im (Chemie-)Unterricht notwendigen technischen Fähigkeiten und Kompetenzen sowie didaktische Konzepte vermittelt werden.

**Das zentrale Anliegen dieses Dissertationsprojekts ist somit die Konzeption eines Schülerlaborprogramms mit einem universitären Begleitseminar zum Aufbau professioneller Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien, der Aufbau professionellen Wissens um das didaktische Potential digitaler Medien im Chemieunterricht sowie die Steigerung der Selbstwirksamkeitserwartung von Medienkompetenzen bei Lehramtsstudierenden.**

Das zu diesem Zweck konzipierte Seminar vermittelt Lehramtsstudierenden des Fachs Chemie diese Kompetenzen in Microteachingsituationen (vgl. Kapitel 4.2) im Schülerlabor *LMUchemlab* mit einem eigens dafür entwickelten Schülerlaborprogramm zu modernen Materialien. Im Mittelpunkt des begleitenden Seminars steht die Selbstreflexion der Studierenden in videographierten Microteachingsituationen. Um die Videographie im *LMUchemlab* zu ermöglichen, wurde das Schülerlabor mitameratechnik (vgl. Kapitel 4.3) ausgestattet. Dem oft in Forschungsergebnissen vorgetragenen Missstand von fehlender praktischer Erprobung und Reflexion der digitalen Medien soll so begegnet werden [9].

Die Überprüfung der Wirksamkeit dieses Programms ist das Ziel der Begleitforschung, welche somit in den Bereich der Lehrerprofessionalisierungsforschung einzugliedern ist. Damit ein umfassender Überblick über die Effekte des Seminars erlangt werden konnte, wurden verschiedene Kompetenzbereiche zum Umgang mit und Einsatz von digitalen Medien sowie persönliche Einstellungen gegenüber dem Einsatz von digitalen Medien im Chemieunterricht mit Hilfe einer quantitativen Studie erhoben.

Um digitale Medien didaktisch gewinnbringend einzusetzen und ihren Einsatz positiv zu bewerten, ist die technische Kompetenz im Umgang mit digitalen Medien Voraussetzung, weswegen sich eingangs die folgende Forschungsfrage stellt:

**(1) Führt die Teilnahme am Seminar „LMUchemlab: Digitale Medien und Schülerbetreuung“ bei den Seminarteilnehmer\*innen zu einer Steigerung des professionellen Wissens über den Umgang mit digitalen Medien im Chemieunterricht (*Digital Knowledge*, kurz DK; vgl. Kapitel 2.3)?**

Der Erwerb technischer und digitaler Kompetenzen (*Digital Knowledge*, vgl. Kapitel 2.3) ist die Voraussetzung für den Einsatz digitaler Medien im Schulunterricht. Der nächste Schritt für einen gewinnbringenden Einsatz von digitalen Medien ist die Entwicklung fachdidaktischer Konzepte. Ob dieses Ziel bei den Seminarteilnehmer\*innen erreicht wird, soll mit Hilfe der zweiten Forschungsfrage überprüft werden:

**(2) Führt die Teilnahme am Seminar „LMUchemlab: Digitale Medien und Schülerbetreuung“ bei den Seminarteilnehmer\*innen zu einer Steigerung des professionellen Wissens über das didaktische Potential von digitalen Medien im Chemieunterricht (*Digital Pedagogical Knowledge*, kurz DPK; vgl. Kapitel 2.3)?**

Es liegt die Vermutung nahe, dass mit einer Steigerung der technischen und didaktischen Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien auch eine Änderung der Einstellung gegenüber dem Einsatz von digitalen Medien im Chemieunterricht einhergeht, was zur dritten Forschungsfrage führt:

**(3) Führt die Teilnahme am Seminar „LMUchemlab: Digitale Medien und Schülerbetreuung“ bei den Seminarteilnehmer\*innen zu einer gesteigerten Selbstwirksamkeitserwartung ihres medienbasierten Fachunterrichts?**

Die drei Forschungsfragen wurden durch quantitative Erhebungen in Form von Fragebögen im Prä-Post-Follow-Up-Design erhoben. Zudem erfolgte ein Abgleich mit einer Kontrollgruppe.

## 1.2 Strukturierung der Dissertation

Die vorliegende Arbeit ist in die Darstellung der zugrundeliegenden bildungspolitischen Forderungen und (medien-)didaktischen Theorien (Kapitel 2-4) sowie der publikationsbasierten Umsetzung (Kapitel 5) der Konzeption der Schülerlaborexperimentierstationen, des Seminars zur Vermittlung digitaler Kompetenzen an Lehramtsstudierende sowie der Darstellung des Forschungsvorhabens und dessen Ergebnisse untergliedert.

Nach dieser Einleitung wird in Kapitel 2 der Status Quo zum Thema digitale Medien im Chemieunterricht dargelegt. Zuerst werden dazu politische Implikationen dargestellt und das der Seminarentwicklung zugrundeliegende TPACK-Modell und seine Weiterentwicklung zum

DPACK-Modell beschrieben. Ein eigenes Unterkapitel widmet sich dem Einsatz von digitalen Medien im chemischen Experiment und dem eigens für den naturwissenschaftlichen Unterricht entwickelten DiKoLAN-Modell. Abschließend werden bereits vorhandene Praxiselemente digitaler Medien in der universitären Lehrerbildung an ausgewählten Universitäten aufgezeigt. Das Kapitel 3 widmet sich der Theorie, Wirkung und dem Nutzen von Schülerlaboren und zeigt dabei auch auf, wie das *LMUchemlab*, in dem das für diese Arbeit entwickelte Seminar durchgeführt wurde, einzuordnen ist. Daran anschließend wird in Kapitel 4 die Konzeption des universitären Seminars zur Vermittlung digitaler Kompetenzen an die Lehramtsstudierenden aufgezeigt und die Theorie von Microteachingsituationen dargestellt.

Kapitel 5 stellt die publikationsbasierte Umsetzung der vorliegenden Arbeit dar. Die ersten fünf Unterkapitel zeigen die Entwicklung und Konzeption von einzelnen Experimentierstationen – teilweise unter Einbezug digitaler Medien – für das Schülerlabor auf. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die in Kooperation mit dem Arbeitskreis für hochenergetische Materialien der LMU München entwickelten neuartigen Wunderkerzen gelegt, welche ökologisch und toxikologisch unbedenklicher als käufliche Wunderkerzen sind, nach der *Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht* [10] von den Schüler\*innen hergestellt werden dürfen und durch einen neu entwickelten und sehr einfachen Herstellungsprozess auch als Schülerexperiment sicher gelingen. Im sechsten Unterkapitel wird die Konzeption des universitären Seminars für Lehramtsstudierende zur Entwicklung professioneller digitaler Kompetenzen beschrieben. Dabei werden sowohl die selbst entwickelten als auch die aus der Literatur adaptierten und mit digitalen Medien erweiterten Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms beschrieben. Zudem wird aufgezeigt, welche Kompetenzen des DPACK-Modells die Seminarteilnehmer\*innen an den einzelnen Experimentierstationen erwerben sollen. Darauf aufbauend werden im letzten Unterkapitel die Ergebnisse der Begleitforschung dargestellt und so die eingangs aufgestellten Forschungsfragen beantwortet, bevor in Kapitel 6 die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben wird.

## 2 Digitale Medien im schulischen Kontext

Fast 50 Jahre nach der ersten Nutzung von digitalen Medien im Unterricht sind diese aus dem heutigen Unterricht kaum mehr wegzudenken. Sie besitzen inzwischen aufgrund ihrer vielfältigen Funktionen diverse Einsatzmöglichkeiten und somit verschiedene didaktische Funktionen (vgl. Kapitel 2.2). Die Bildungspolitik fordert den Einsatz digitaler Medien im Unterricht und unterstützt diesen mit unterschiedlichen Förderprogrammen (vgl. Kapitel 2.1).

### 2.1 Politische Zielsetzung der Nutzung digitaler Medien im Unterricht

Im Zusammenhang mit der fortschreitenden Omnipräsenz von digitalen Medien kommt der Schule aus bildungspolitischer Sicht eine neue Schlüsselrolle zu: Die Schüler\*innen sollen in ihrer Schullaufbahn die benötigten digitalen Kompetenzen erwerben, um an der digitalisierten Gesellschaft teilhaben und zugleich den stetigen Wandel proaktiv mitgestalten zu können [11]. Die Relevanz dieses Themas in der Politik zeigt sich sowohl in dem eingangs erwähnten Strategiepapier zur *Bildung in der digitalen Welt* [2] als auch im *DigitalPakt Schule*, der die Ausstattung der Schulen mit digitalen Endgeräten voranbringen soll [4]. Zur Bewältigung dieser Aufgabe müssen die Lehrer\*innen selbst über umfangreiche digitale Kompetenzen verfügen, wie es auch im Strategiepapier der Kultusministerkonferenz ausführlich erläutert wird [2]. Neben der Fortbildung von bereits im aktiven Dienst stehenden Lehrkräften wird besonders die Entwicklung von digitalen Medienkompetenzen in der praktischen, universitären Ausbildung von Lehramtsstudierenden gefordert [2,11].

Das *Bundesministerium für Bildung und Forschung* hat die *Qualitätsoffensive Lehrerbildung* initiiert, deren Zielsetzung die Förderung der universitären Lehrkräfteausbildung ist, wozu auch die Entwicklung digitaler Kompetenzen von Lehramtsstudierenden zählt [7]. In dem Projekt *Lehrerbildung@LMU*, welches von der *Qualitätsoffensive Lehrerbildung* finanziert wird, werden vielfältige Teilprojekte zur Verbesserung des Lehramtsstudiums an der LMU München gefördert. *DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>*, in dem die vorliegende Arbeit entstanden ist, ist eines der 22 Teilprojekte hiervon.

## 2.2 Digitale Medien im (Chemie-)Unterricht

Das zentrale Anliegen jeder Lehrtätigkeit ist die Vermittlung von Kompetenzen und Wissen. Damit Kompetenzen und Wissen vom Lehrenden an die Lernenden weitergegeben werden können, sind Unterrichtsmittel [vgl. 12] hilfreich. Theoretisch sind auch Unterrichtseinheiten ohne diese Vermittler vorstellbar, in der Praxis kommt aber gerade in den Naturwissenschaften heute keine Unterrichtsstunde mehr ohne sie aus.

Der Begriff *Medium* kommt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie „Mittelpunkt“ oder auch schlicht „Mitte“. So vielfältig wie Medien sein können, so vielfältig sind auch ihre Definitionen, wobei sich aufgrund der zahlreichen Anforderungen für unterschiedliche Bereiche bisher keine Definition letztgültig durchsetzen konnte. Eine sehr weit gefasste und deswegen oft zitierte Definition des Medienbegriffs ist die des Mediendidaktikers DOMINIK PETKO aus dem Jahr 2014:

*„Medien sind einerseits kognitive und andererseits kommunikative Werkzeuge zur Verarbeitung, Speicherung und Übermittlung von zeichenhaften Informationen.“* [13]

Vergleicht man verschiedene Mediendefinitionen, fällt als gemeinsamer Nenner auf, dass Medien immer eine Mittlerfunktion zwischen einem Sender und Empfänger haben. Andere Aspekte wie beispielsweise das Verständnis, wer das eigentliche Medium ist, werden von verschiedenen Autoren unterschiedlich betrachtet. In dieser Arbeit werden Medien deswegen – gleich ob klassische oder digitale Medien – im schulischen Kontext ganz allgemein als

*Mittler zwischen dem Lernenden, dem Lehrenden und dem zu vermittelnden Lerninhalt*

verstanden (Abb. 1).

Neben dem Einsatz von traditionellen bzw. klassischen Medien, wie beispielsweise dem Schulbuch oder dem Tafelanschrieb, gab es bereits in den 1970er-Jahren erste didaktische Konzepte zur Nutzung von Computern im Unterricht, damals noch unter dem Begriff *Neue Medien* [14]. Da sich die Auffassung von *neu* aber fortwährend ändert, setzte sich mit der Zeit der Begriff *Digitale Medien* durch.

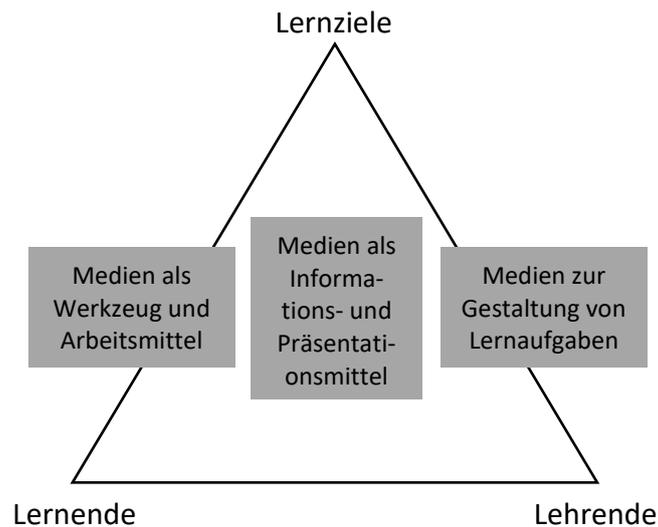


Abb. 1: Medien als Mittler zwischen Lernenden, Lehrenden und dem zu vermittelnden Stoff nach HÄRTIG ET AL. [15] (eigene Darstellung, verändert).

Digitale Medien lassen sich nach ihren didaktischen Funktionen kategorisieren (Abb. 2). Im Bereich des Lernens mit digitalen Medien können diese als Experimentalwerkzeuge, als Lernwerkzeuge oder als Lernbegleiter dienen [16]. Werden digitale Medien als Lerngegenstand betrachtet, so steht das Lernen über digitale Medien im Fokus [16].

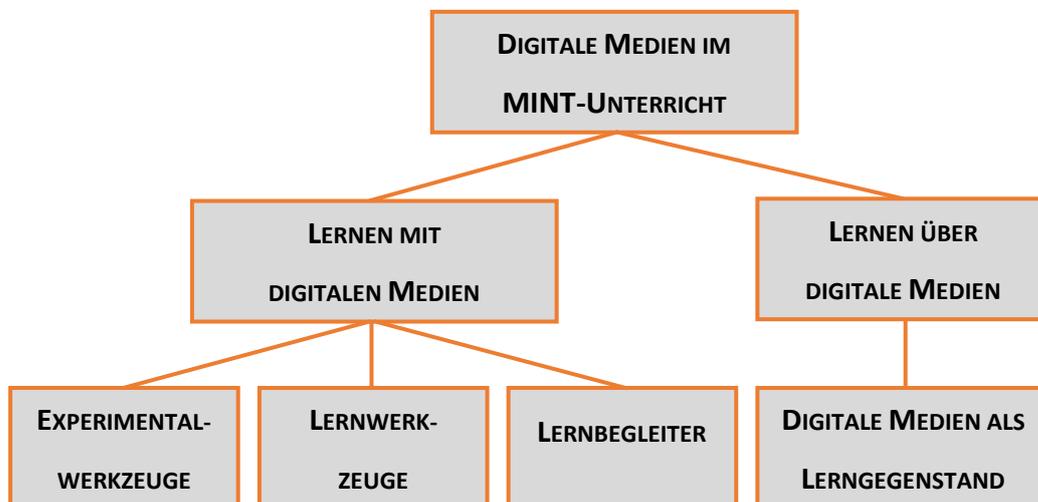


Abb. 2: Kategorisierung digitaler Medien nach ihrer didaktischen Funktion nach HUWER ET AL. [16] (eigene Darstellung).

Der Einsatz digitaler Medien im Chemieunterricht ist in zwei große Teilbereiche untergliedert: Auf der einen Seite steht die Verwendung von digitalen Medien im nicht-experimentellen Unterricht. Diese Form des digitalen Medieneinsatzes findet sich in allen MINT-Fächern (kurz für Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) wie auch allgemein in anderen

Unterrichtsfächern wieder. Dazu gehören sowohl Präsentationsmedien wie beispielsweise der Einsatz digitaler Präsentationen mittels Beamer, interaktive Whiteboards oder Dokumentenkameras als auch der Einsatz von Schülerwerkzeugen wie digitale Schulbücher oder Lern- und Simulationsprogramme [17]. Auf der anderen Seite steht die Integration digitaler Medien in das Experiment. Diese Form des digitalen Medieneinsatzes ist eine Besonderheit des MINT-Unterrichts im Allgemeinen und des Chemie- wie Physikunterrichts im Speziellen. Hierbei können etwa Smartphones als digitale Messwerkzeuge eingesetzt werden [18,19] und Tablets mit Hilfe von Augmented Reality das praktische Experimentieren unterstützen [20] oder Virtual-Reality-Experimente ermöglichen [21]. Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht der Einsatz digitaler Medien im chemischen Experiment sowie als Schülerwerkzeug.

Bei der Entwicklung von pädagogischen und didaktischen Konzepten zum Erwerb von digitalen Medienkompetenzen bei Schüler\*innen ist zu berücksichtigen, dass die allgegenwärtige Zugänglichkeit von Informationen durch digitale Medien die Anforderungen an das lebenslange Lernen maßgeblich vom Erwerb von Wissen (know what) zum Gewusst-wie (know how) und Gewusst-wo (know where) verlagert [22]. Während früher die Lehrkraft die wesentliche Wissensquelle von Schüler\*innen darstellte, ist sie heute mehr Lernbegleiter, die Schüler\*innen die für die Suche und Bewertung von Wissensquellen notwendigen Kompetenzen vermitteln muss. Diese Kompetenzen sind in neuen Lehrplänen wie dem bayerischen *LehrplanPLUS* als fachübergreifende Lernziele enthalten [23]. Der *Aktionsrat Bildung* subsummiert diese Kompetenzen, mit denen Digitalisierung produktiv aufgenommen, mitgestaltet und kritisch verarbeitet werden kann, unter dem Terminus *digitale Souveränität* [24]. Damit Schüler\*innen diese digitale Souveränität erlangen, gibt das Expertengremium *Aktionsrat Bildung* der Politik mehrere Handlungsempfehlungen, darunter auch die systematische Implementierung von ICT-Medien (engl.: *Information and Communication Technology*, zu Deutsch *Informations- und Kommunikationstechnologie*) in Studium und Fortbildung des Lehrpersonals [24]. Dabei sollen die Lehramtsstudierenden ICT-angereicherte Lernumgebungen an den Hochschulen erleben und deren Möglichkeiten und Grenzen selbst aus Sicht der Lernenden erfahren. Darüber hinaus sollen den Lehramtsanwärter\*innen pädagogische und didaktische Fachkonzepte für den ICT-Einsatz vermittelt werden und Gelegenheiten zum Ausprobieren und trainieren dieser Konzepte geschaffen werden [24]. Es gilt nun, in großer Vielfalt konkrete universitäre Konzepte zur Umsetzung dieser Handlungsempfehlungen zu entwickeln, zu erforschen und zu

evaluieren, um diese anschließend flächendeckend in die universitäre Ausbildung von Lehrkräften zu implementieren.

### 2.3 Das TPACK bzw. DPACK-Modell

Um die benötigten Kompetenzen von Lehrer\*innen für ein Unterrichten mit digitalen Medien identifizieren und klassifizieren zu können, wird ein Kompetenzrahmen benötigt. Ein in der medienpädagogischen Forschung hierfür häufig verwendetes Konzept ist das *Technological Pedagogical and Content Knowledge*-Modell von MISHRA & KOEHLER [25] aus dem Jahr 2006, das die Weiterentwicklung des *Pedagogical Content Knowledge*-Konzepts von SHULMAN [26] aus dem Jahr 1986 darstellt. Sowohl das ursprüngliche Konzept von SHULMAN als auch die Erweiterung dieses Konzepts um die Wissensdimension des *Technological Knowledge* sollen in ihrer praktischen Ausführung zu gutem Unterricht führen [25,27]. Das TPACK-Modell besteht aus den drei Wissensdimensionen *Technological Knowledge* (TK), *Pedagogical Knowledge* (PK) sowie *Content Knowledge* (CK). Dazu kommen die Schnittmengen aus jeweils zwei bzw. allen drei Wissensdimensionen: *Technological Pedagogical Knowledge* (TPK), *Technological Content Knowledge* (TCK), *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) und *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) [25]. Mit diesem Modell lassen sich somit die Wissensarten des Professionswissens von Lehrkräften darstellen.

Betrachtet man die Lehre historisch, so waren es zu Beginn die Gelehrten, die ihr Fachwissen aus den verschiedenen Disziplinen an Lernende weitergaben. Zu Beginn stand also das *Content Knowledge* im Zentrum, zu welchem auch fachspezifische Theorien, Arbeitsweisen und Methoden zu zählen sind [25]. Im Laufe der Zeit setzte sich die Erkenntnis durch, dass für eine gute Lehre nicht nur Fachwissen, sondern auch pädagogisches Wissen notwendig oder zumindest hilfreich ist [26]. Das *Content Knowledge* wurde deswegen um die Wissensdimension des *Pedagogical Knowledge* ergänzt, welches die professionelle Kompetenz beschreibt, Fachwissen und Fähigkeiten unabhängig vom Inhalt zu unterrichten. Zudem wird zum pädagogischen Wissen auch das Wissen um klassische pädagogische Theorien, Erziehungsstile und Klassenführung gezählt [26]. MISHRA & KOEHLER ergänzten dieses Modell im Jahr 2006 um eine dritte Wissensdimension, dem *Technological Knowledge*, das sowohl klassische Medien wie Tafelanschrieb und Schulbuch als auch digitale Medien umfasst [25], wobei die digitalen Medien

im Fokus ihrer Arbeit stehen. Damit das TPACK-Modell der ständigen Weiterentwicklung von digitalen Medien Rechnung trägt, wird die Konzeptualisierung des *Technological Knowledge* als nicht abgeschlossen angesehen [25]. Damit wird das PCK-Modell an die Anforderungen der heutigen Zeit durch die Entwicklung von digitalen Medien angepasst. Wie bereits SHULMAN in seinem PCK-Modell, betonen auch MISHRA & KOEHLER im TPACK-Modell die zentrale Rolle der Schnittmengen aus den verschiedenen Wissensdimensionen für guten Unterricht [27].

In der fachdidaktischen Forschung von MINT-Fächern reicht die Definition des *Technological Knowledge* im TPACK-Modell inzwischen nicht mehr aus, um alle Aspekte der Kompetenzen zum Umgang mit und Einsatz von digitalen Medien zu umfassen. Es ist deswegen inzwischen üblich, das *Technological Knowledge* gegen das *Digital Knowledge* (DK, zu Deutsch *Digitalitätsbezogenes Wissen*) zu substituieren, wodurch das DPACK-Modell (Abb. 3) als Weiterentwicklung des TPACK-Modells für den MINT-Unterricht entsteht [28].

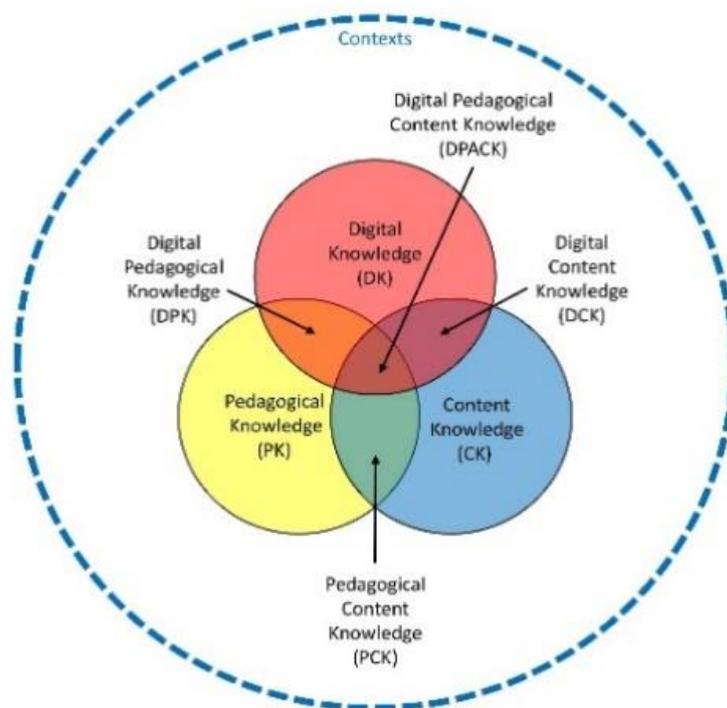


Abb. 3: Graphische Darstellung des DPACK-Modells nach HUWER ET AL. [28] (aus [29]).

Das *Digitalitätsbezogene Wissen* (DK) enthält neben dem im *Technological Knowledge* (TK) enthaltenen Wissen zum Umgang und Einsatz von Technologien auch Aspekte der Digitalität [28]. Dabei wird die Digitalität als die Vernetzung von digitaler und analoger Wirklichkeit

verstanden und beinhaltet auch das Wissen und die Kompetenzen, um Nutzen im Umgang mit digitalen Geräten auf den Unterricht einschätzen und auf dieser Grundlage Entscheidungen treffen zu können [28].

Das DPACK-Konzept ist somit ein Modell, das die Voraussetzungen und das Professionswissen von MINT-Lehrkräften in den Bereichen Digitalität, Pädagogik und Fachwissenschaft miteinander verknüpft [28]. Durch die Weiterentwicklung des Wissensbereichs *Technologisches Wissen zu Digitalitätsbezogenem Wissen* werden bereits zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen integriert. Im Sinne der Kompetenzorientierung sollen Lehrer\*innen nicht den Umgang mit einem oder mehreren bestimmten digitalen Medien erlernen, sondern sich das Wissen und die digitalen Kompetenzen aneignen, um auch zukünftige digitale Medien anzuwenden und didaktisch korrekt in den Unterricht integrieren zu können. Dies soll zu einer nachhaltigeren Ausbildung von Lehrkräften führen, da die digitale Kompetenz so unabhängig vom konkreten digitalen Medium erlernt wird. Da guter Unterricht aber nicht inhaltsleer durchgeführt werden kann, müssen die didaktischen Prinzipien an aktuellen, aber in ihrer Bedeutung nur exemplarisch ausgesuchten, digitalen Medien gelehrt werden. Hierdurch erhalten die Lehrkräfte *Technologisches Wissen* über den Umgang mit diesen exemplarisch ausgewählten digitalen Medien. Zugleich können Lehrer\*innen durch das Erlernen von *Digital Pedagogical Knowledge* didaktische Prinzipien leicht auf zukünftige digitale Medien übertragen. Die Forschungsgruppe *Lehrerbildung Digitaler Campus Bayern* hat dazu in Anlehnung an das TPACK- bzw. DPACK-Modell ein Rahmenmodell entwickelt, welches die für das Unterrichten mit digitalen Medien notwendigen Kompetenzen von Lehrer\*innen identifiziert und systematisiert [30]. Dabei werden von den Autor\*innen zwei Kompetenzbereiche im Umgang mit digitalen Medien bei Lehrkräften identifiziert:

- Auf der einen Seite stehen die digitalen Lehrkompetenzen, welche die medienbezogenen pädagogisch-didaktischen Kompetenzen umfassen [30]. Die Lehrkompetenzen enthalten das Wissen der Lehrkräfte über die fachspezifischen Leistungen von digitalen Medien im Fachunterricht [22] und umfassen somit die Bereiche des *Digital Pedagogical Knowledge* (DPK) sowie das *Digital Pedagogical and Content Knowledge* (DPACK) des DPACK-Modells.

- Auf der anderen Seite stehen die digitalen Kernkompetenzen, welche direkten Einfluss auf den Einsatz von digitalen Medien im Unterricht haben und somit maßgeblich für den Lernerfolg der Schüler\*innen relevant sind [30]. Diese Kernkompetenzen zeigen inhaltlich große Schnittmengen mit dem Wissen, das für das Unterrichten mit digitalen Medien notwendig ist und umfassen darüber hinaus auch das Wissen über den methodengerechten Umgang mit und den abwechslungsreichen Einsatz von digitalen Medien [22]. Unter digitalen Kernkompetenzen werden somit eigene Medienkompetenzen der Lehrkräfte sowie medienerzieherische und mediendidaktische Kompetenzen subsummiert [30]. Auf das DPACK-Modell bezogen umfassen die Kernkompetenzen das *Digital Knowledge* (DK) sowie das *Digital Content Knowledge* (DCK).

## 2.4 Digitale Medien im chemischen Experiment: Das DiKoLAN-Modell

Ein besonders herausragendes Alleinstellungsmerkmal von MINT-Unterricht im Allgemeinen und von Chemieunterricht im Speziellen ist das Experiment, welches die Basis naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung in der Fachwissenschaft Chemie darstellt [31]. Unter dem Begriff Experiment sollen im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit, wie in der Chemiedidaktik üblich, sowohl Versuche bzw. Schulexperimente zu Lern- und Demonstrationszwecken als auch Forschungsexperimente zur Hypothesengenerierung und -bestätigung subsummiert werden [31].

Der Einsatz von digitalen Medien im schulischen Kontext ist inzwischen in allen Unterrichtsfächern zu beobachten, der Einsatz von digitalen Medien im Experiment stellt dabei eine Besonderheit des MINT-Unterrichts dar. Um eine Einordnung der unterrichtlichen Implementierung digitaler Medien in die allgemeinere oder fachspezifischere Anwendung vorzunehmen, ist das DPACK-Modell nicht differenziert genug. Zudem werden in diesem Modell nur die verschiedenen Professionswissensarten und deren Schnittmengen für guten Unterricht aufgeführt, nicht aber die dafür von Lehrkräften benötigten Kompetenzen mit den dazugehörigen Operatoren. Für eine detaillierte Betrachtung der für das Unterrichten in der digitalisierten Welt benötigten Kompetenzen von Lehrer\*innen ist somit ein ausdifferenzierteres Modell notwendig. Als Erweiterung des DPACK-Modells eignet sich hierfür der Orientierungsrahmen *Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKoLAN* [32].

In diesem Orientierungsrahmen werden sieben digitale Basiskompetenzen identifiziert, welche nochmals in die allgemeineren und fachspezifischeren Kompetenzen unterteilt sind (Abb. 4) [32].

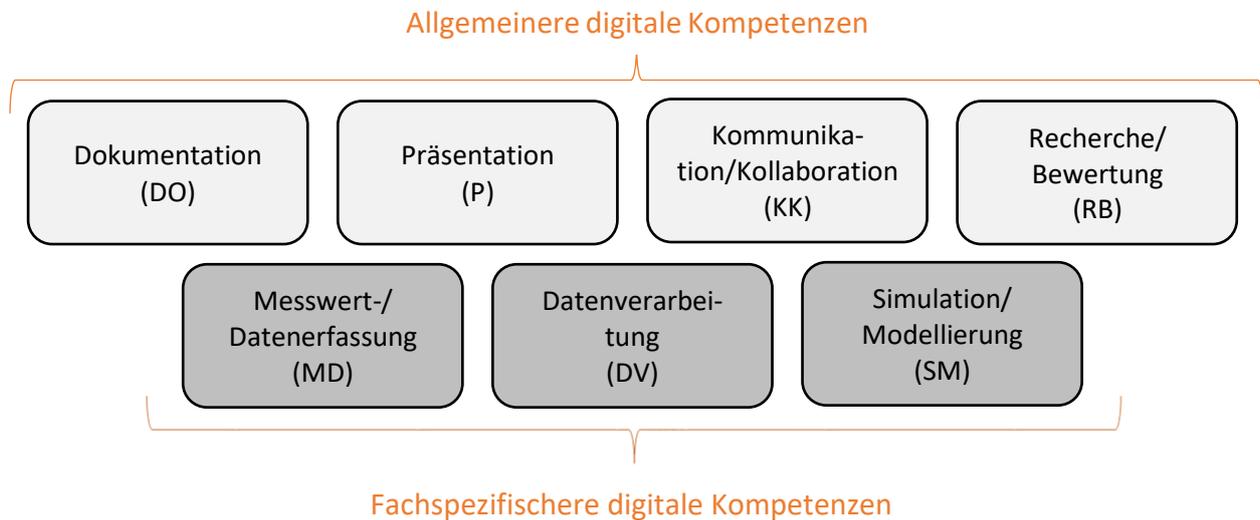


Abb. 4: Graphische Darstellung des Orientierungsrahmens DiKoLAN nach BECKER ET AL. [32] (eigene Darstellung).

In Anlehnung an das TPACK- [25] bzw. DPACK-Modell [28] werden im Orientierungsrahmen DiKoLAN für jede der sieben digitalen Basiskompetenzen vier Schwerpunkte identifiziert und dafür Kompetenzen auf verschiedenen Kompetenzniveaus ausformuliert [32]. Die Schwerpunkte sind:

- Spezielle Technik (T)
- Fachwissenschaftlicher Kontext (F)
- Methodik und Digitalität (M)
- Unterrichtliche Planung und Umsetzung (U)

Der Orientierungsrahmen sowie die ausformulierten Kompetenzen sind explizit für die erste Phase der Lehrerbildung an den Universitäten erstellt und orientieren sich an den daraus resultierenden praktischen Implikationen. Durch die verschiedenen Kompetenzniveaus in DiKoLAN können Ziele sowie Voraussetzungen allgemeinverbindlich definiert werden. Die Kategorisierung der im Schülerlaborprogramm eingesetzten Medien nach den dazu zu erlernenden Kompetenzen erfolgt in Kapitel 4.5.

## 2.5 Praxiselemente digitaler Medien in der fachdidaktischen Lehrerbildung an Universitäten

Medienpädagogische Angebote der universitären Lehrerbildung sind meist im Bereich der Erziehungswissenschaften oder Psychologie im Lehramtsstudium verankert [33,34]. Hierdurch werden die Lehramtsstudierenden aller Schularten und Fachrichtungen angesprochen und in die Grundlagen der Medienpädagogik eingeführt. Zudem wird inzwischen deutschlandweit an vielen Universitäten das Studium der *Medienpädagogik* als Erweiterungsfach für das Lehramtsstudium angeboten [35–38].

Da die einzelnen Unterrichtsfächer jeweils spezifische Anforderungen an den Einsatz digitaler Medien stellen (vgl. Kap. 2.4), ist die forschungsbasierte Implementierung von digitalen Medien auch in der fachdidaktischen universitären Ausbildung notwendig. In den meisten fachdidaktischen Bereichen der Lehramtsstudiengänge werden inzwischen Seminare zum praktischen Einsatz digitaler Medien angeboten [9]. In der Sonderpublikation *Lehramtsstudium in der digitalen Welt* des Projekts »Monitor Lehrerbildung« aus dem Jahr 2018 zeigt sich aber deutlich, dass die fachdidaktischen Angebote zu digitalen Medien im Unterricht an deutschen Hochschulen oftmals in den Bereich der Wahlpflichtfächer fallen, da Studieninhalte zu digitalen Medien nur in fünf Bundesländern durch landesweite Regelungen vorgeschrieben sind [9]. Nachfolgend werden exemplarisch die Studienpläne für das Lehramt Chemie an Realschule und Gymnasium der drei Universitäten, an denen das LMUchemlab mitsamt seinem Begleitseminar angeboten wurde, hieraufhin analysiert:

- **Ludwig-Maximilians-Universität München:** An der LMU München wird das Studium des Fachs Chemie für das Lehramt an allen Schularten außer für Berufsschulen angeboten. Abgeschlossen werden alle Studiengänge mit dem ersten Staatsexamen. Für die Betrachtung des Angebots von Seminaren und Praktika zum Umgang mit digitalen Medien im Chemieunterricht wird an dieser Stelle nur der vertiefte Studiengang Lehramt Chemie für das Unterrichten an Gymnasien sowie der nicht vertiefte Studiengang Lehramt Chemie für das Unterrichten an Realschulen betrachtet.

In beiden Studiengängen gibt es keine verpflichtenden fachdidaktischen Veranstaltungen, die den Einsatz von digitalen Medien im Chemieunterricht als Lernziel haben. In den verpflichtenden Veranstaltungen *Übungen im Demonstrieren und Vortragen* (ein

Seminar für das Lehramt an Realschulen bzw. drei Seminare für das Lehramt an Gymnasien) werden allerdings digitale Medien zur Messwerterfassung sowie zur Präsentation von chemischen Experimenten eingesetzt. In diesen Veranstaltungen erproben somit alle Studierenden in kleinem Rahmen bei Peer-Teaching-Vorträgen selbst den Einsatz digitaler Medien im chemischen Lehrereperiment. Darüber hinaus müssen die Studierenden in beiden Studiengängen des Lehramts Chemie in dem Wahlpflichtmodul *Fachdidaktisches Erforschen, Urteilen und Weiterentwickeln von Praxis* zwei Veranstaltungen besuchen, wobei die Studierenden die Veranstaltungen selbst auswählen. Zwei der insgesamt fünf angebotenen Veranstaltungen stellen digitale Medien in den Fokus:

- *Einsatz von Medien im Chemieunterricht, Verwendung und Gestaltung herkömmlicher und neuer Medien, Computereinsatz und Rhetorik*
- *Einsatz des Computers in der Unterrichtspraxis für alle Lehramtsstudierenden*

Unter der Bezeichnung *Fachspezifische Erweiterungen: Freier Bereich* werden weitere Veranstaltungen aus dem Fach Chemie, aus weiteren MINT-Fächern sowie aus dem jeweiligen Zweitfach angeboten. Die Studierenden müssen in diesem Bereich zwei Veranstaltungen belegen, wobei sie dies wahlweise aus dem Angebot der Chemie und/oder aus dem Angebot ihres Zweitfachs tun können. In der Chemie werden in diesem Bereich bis zu acht Veranstaltungen angeboten, wovon das Seminar

- *Messwerterfassung am Beispiel geeigneter Schulversuche*

digitale Medien im chemischen Experiment thematisiert. Darüber hinaus wird auch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Seminar *LMUchemlab: Digitale Medien und Schülerbetreuung* in diesem Bereich den Studierenden angeboten [39,40].

- **Europa-Universität Flensburg:** An der Universität Flensburg wird das Studium des Fachs Chemie für das Lehramt nur für das Unterrichten in der Sekundarstufe I angeboten. Die Absolvent\*innen des Studienganges können nach Abschluss ihrer Ausbildung somit an Gesamtschulen bis zum Ende der Sekundarstufe I unterrichten. Das Studium wird in Bachelor- und Masterstudium aufgeteilt angeboten, wobei erst der Abschluss des Masterstudienganges zum Eintritt in das Referendariat berechtigt.

Die Universität legt im Studienplan der Studierenden für das Lehramt Chemie großen Wert auf den Einsatz digitaler Medien. Dies zeigt sich daran, dass die Nutzung digitaler Medien in acht der insgesamt 13 Module des Bachelorstudiums sowie in fünf der sechs Module des Masterstudiengangs als Ziel implementiert ist [41,42]. Anzumerken ist dabei, dass der Einsatz von digitalen Medien und chemiespezifischen digitalen Medien sowohl in fachdidaktischen als auch fachwissenschaftlichen Modulen zur Dokumentation, Protokollerstellung und Präsentation von Studienbeginn an als zu erlernende Fach- bzw. Medienkompetenz aufgeführt ist [41,42].

- **Eberhard Karls Universität Tübingen:** In Baden-Württemberg erfolgt das Lehramtsstudium für die Sekundarstufe I an Pädagogischen Hochschulen, während das Lehramtsstudium für die Sekundarstufe II an Universitäten angeboten wird. Demzufolge bietet die Universität in Tübingen nur das Studium für das Lehramt an Gymnasien an. Wie auch an der Universität in Flensburg ist das Lehramtsstudium Chemie in Bachelor- und Masterstudium aufgeteilt, wobei nur der Abschluss des Masterstudienganges den Eintritt in das Referendariat ermöglicht.

Im Modulhandbuch des *Bachelor of Education* für das Unterrichtsfach Chemie wird der Einsatz digitaler Medien in unterrichtlichen Kontexten in keinem Modul als Qualifikationsziel aufgeführt [43]. Im Masterstudium wird für das verpflichtende Modul *Fachdidaktik Chemie Master* als Modulinhalt unter anderem der Einsatz von „Medien im und für den Chemieunterricht unter besonderer Berücksichtigung des Experiments“ aufgeführt [44]. Dies beinhaltet den Einsatz sowohl von klassischen als auch digitalen Medien, wobei auf die Besonderheiten des Experiments im Fachunterricht Chemie eingegangen wird.

An zwei der drei beispielhaft aufgeführten Universitäten gibt es somit kein zu dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Seminar vergleichbares Studienangebot für die Studierenden des Lehramts Chemie, in dem sie den Einsatz von digitalen Medien praktisch erlernen müssen. Zudem bestätigen diese drei exemplarisch ausgewählten Universitäten den Befund der Sonderpublikation *Lehramtsstudium in der digitalen Welt*, dass die universitären Lehrangebote der Fachdidaktik zu digitalen Medien im (Chemie-)Unterricht bisher noch häufig im Wahlpflichtbereich angesiedelt sind und Lehramtsstudierende in diesen Fällen ohne den Erwerb digitaler Kompetenzen ihr Studium abschließen können [9].

### 3 Das Schülerlabor LMUchemlab

Schülerlabore sind außerschulische MINT-Lernorte, die Schüler\*innen eine besondere Form des Lernens ermöglichen. Ihre Bedeutung zeigt sich in der stetig wachsenden Anzahl an Schülerlaboren in Deutschland [45] sowie in der Existenz der Dachorganisation *LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore*, die Anfang 2022 insgesamt 445 Schülerlabore im deutschsprachigen Raum zählte, wovon 432 Schülerlabore in Deutschland waren [45]. Da der Begriff *Schülerlabor* nicht geschützt ist, versammelt sich unter diesem Begriff eine große Bandbreite verschiedener außerschulischer Lernangebote. Um nach der Definition von *LernortLabor* als Schülerlabor geführt zu werden, müssen in einem Schülerlabor an mindestens 20 Tagen im Jahr Schüler\*innen empfangen und zum selbstständigen Experimentieren angeleitet werden [46]. Ein Tag der offenen Tür an Universitäten oder eine Betriebsbesichtigung mit praktischen Anteilen werden somit nicht als Angebot eines Schülerlabors gezählt. Die Einhaltung von gewissen Mindestanforderungen weisen Schülerlabore durch ihre Mitgliedschaft bei *LernortLabor* nach, wodurch sie sich von der Masse an selbsternannten Schülerlaboren abheben und für Lehrkräfte bei der Exkursionsplanung in den Vordergrund rücken [46].

Schülerlabore, die nicht von Bildungswissenschaftler\*innen oder -politiker\*innen initiiert wurden, sind nicht an curriculare Vorgaben von Lehrplänen gebunden. Neben ihren unterschiedlichen Ausgestaltungen zeigt sich die Heterogenität von Schülerlaboren auch an den vielfältigen Betreibern aus Wirtschaft und Wissenschaft: Schülerlabore werden von Museen, Universitäten, Firmen oder von Vereinen betrieben und bieten in der Regel ein vom jeweiligen Betreiber abhängiges Angebot an. Dies können sowohl spezielle Experimente zu Fachgebieten von einzelnen Industrieunternehmen als auch die Vermittlung aktueller Forschungsinhalte an einer Universität sein. Neben den Inhalten unterscheiden sich auch die Zielsetzungen der Schülerlaborangebote voneinander. Während alle Schülerlabore als Primärziel die Förderung von Interesse und Verständnis für MINT-Fächer und Berufe mit MINT-Bezug aufweisen und so Nachwuchsförderung für diese Bereiche betrieben werden soll, unterscheiden sich die Sekundärziele deutlich [46]. Universitäten versuchen beispielsweise in Schülerlaboren die Qualität der praktischen Lehrerausbildung durch Microteachingsituationen zu verbessern und gleichzeitig Nachwuchs für die MINT-Studiengänge zu generieren. Industrieunternehmen hingegen nutzen Schülerlabore zur Öffentlichkeitsarbeit, um neue Auszubildende anzuwerben und ein

positives Firmenimage zu generieren. Betreiben Kommunen Schülerlabore, so sollen den Schüler\*innen kurz vor deren Schulabschluss meist technische Ausbildungsberufe näher gebracht werden, um die Zahl der Auszubildenden in diesem Bereich zu erhöhen [46].

### 3.1 Klassifizierung von Schülerlaboren

Obwohl es bei Schülerlaboren große Unterschiede gibt, wurden im Verlauf ihrer Entwicklung verschiedene Kategorien erarbeitet, die eine Klassifizierung der verschiedenen Schülerlabore nach einheitlichen Kriterien ermöglicht. Während sich die ersten Kategorisierungen noch stark an den Betreibern von Schülerlaboren orientierten [47], hat sich inzwischen die Klassifizierung nach dem jeweiligen Angebot des Schülerlabors von HAUPT ET AL. [46] durchgesetzt. Dabei dienen bestimmte Erkennungsmerkmale zur Einordnung der Schülerlabore, wobei auch Mischformen aus zwei Kategorien oder Mehrfachzuordnungen möglich sind. Die sechs von HAUPT ET AL. [46] ursprünglich definierten Kategorien wurden inzwischen vom Dachverband [48] um drei weitere Kategorien ergänzt. Die nun neun gebräuchlichen Schülerlaborkategorien sind:

- **Schülerlabor<sup>K</sup>**: Das *klassische Schülerlabor* wird von ganzen Klassen bzw. Kursgruppen besucht. Die durchgeführten Experimente haben dabei einen Lehrplan-Bezug, sodass sie eine Ergänzung des Schulunterrichts darstellen. Diese Art von Schülerlaboren werden in der Regel von Universitäten betrieben und können sowohl eintägige als auch mehrtägige Programme anbieten [46].
- **Schülerlabor<sup>F</sup>**: Das *Schülerforschungszentrum* ist meist ein niederschwellig und längerfristig angelegtes Angebot an interessierte Schüler\*innen. Diese können dort in ihrer Freizeit eigene Projekte und kleine Forschungsvorhaben mit MINT-Bezug durchführen. Für Anregungen, vor allem aber für den wissenschaftlichen Austausch, stehen Expert\*innen zur Verfügung, die die Experimentierenden allerdings nicht wie in klassischen Schülerlaboren anleiten [46].
- **Schülerlabor<sup>L</sup>**: *Lehr-Lern-Labore* helfen in der Lehrerausbildung zur Entwicklung professioneller Lehrkompetenzen. Diese Form von Schülerlaboren werden von ganzen Klassen besucht und dabei von Lehramtsstudierenden betreut. *Lehr-Lern-Labore* werden deswegen meist von fachdidaktischen Abteilungen der Lehrerausbildung betrieben [46].

- **Schülerlabor<sup>W</sup>**: In *Schülerlaboren zur Wissenschaftskommunikation* steht der Einblick in die aktuelle Forschung des Betreibers und in das wissenschaftliche Arbeiten im Mittelpunkt. Diese Form von Schülerlaboren findet sich meist an Universitäten oder Forschungszentren [46].
- **Schülerlabor<sup>U</sup>**: Das *Schülerlabor mit Bezug zum Unternehmertum* wird meist von forschungsintensiven Unternehmen der Großindustrie angeboten. Die Schüler\*innen sollen vor Ort sowohl eine Einsicht in die Forschung als auch in die Fertigung erhalten. Oftmals werden dabei auch Einblicke in weitere betriebliche Fachbereiche aus dem Unternehmen ohne direkten MINT-Bezug wie Design, Marketing oder betriebswirtschaftliche Grundlagen gegeben. Diese Form des Schülerlabors vermittelt eine Übersicht über die Berufsmöglichkeiten und soll mehr Nachwuchs – gerade auch in nicht-akademischen Berufen – generieren [46].
- **Schülerlabor<sup>B</sup>**: Das *Schülerlabor mit Berufsorientierung* legt den Fokus explizit auf die Nachwuchsförderung durch Vorstellung von Berufen und Einblicke in die Tätigkeitsbereiche, während bei den anderen Schülerlaborarten die möglichen Berufe den Schüler\*innen lediglich implizit aufgezeigt werden [46].
- **Schülerlabor<sup>E</sup>**: Das *Schülerlabor zum Engineering/Entwicklung und Produktion* setzt den Fokus auf das eigenständige Arbeiten der Schüler\*innen. Im Gegensatz zu *Schülerforschungszentren* kann diese Form von Schülerlaboren nicht nur von Schüler\*innen, sondern auch von Eltern sowie Senior\*innen besucht werden [48].
- **Schülerlabor<sup>G</sup>**: Das *geisteswissenschaftliche Schülerlabor* wird in Abgrenzung zu den acht MINT-Schülerlaborkategorien inzwischen als eigenständige Form von Schülerlaboren betrachtet. In diesen Schülerlaboren werden Themen aus Geschichte und Gesellschaft in größeren Kontexten betrachtet und die Auswirkung von menschlichem Handeln diskutiert [48].
- **Schülerlabor<sup>M</sup>**: Das *mobile Schülerlabor* ist, im Gegensatz zu den anderen acht Schülerlaborkategorien, nicht ortsgebunden und wird in der Bildungsstätte der Lernenden oder an anderen zentralen Orten angeboten. Beim Experimentieren werden die Lernenden von Expert\*innen des Schülerlabors betreut [48].

Schülerforschungszentren sowie Schülerlabore zum Engineering/Entwicklung und Produktion werden individuell von Schüler\*innen besucht. Die anderen sieben Schülerlaborkategorien richten ihr Angebot vor allem an ganze Klassen oder Kursgruppen.

### 3.2 Das LMUchemlab

Das LMUchemlab (Abb. 5) ist das Schülerlabor der Fakultät für Chemie und Pharmazie an der *Ludwig-Maximilians-Universität München*, welches von der Abteilung *Didaktik der Chemie* betrieben wird.

Nach der oben beschriebenen Klassifizierung von Schülerlaboren nach HAUPT ET AL. [46] ist das LMUchemlab ein *Lehr-Lern-Labor* – ein *Schülerlabor*<sup>L</sup> – zur *Wissenschaftskommunikation*, da im LMUchemlab seit seiner Eröffnung im März 2018 die Schüler\*innen beim Experimentieren in Microteachingsituationen von Lehramtsstudierenden im Rahmen eines universitären Seminars betreut werden. Zudem ist es auch als *Schülerlabor zur Wissenschaftskommunikation* zu bezeichnen, da die angebotenen Inhalte und Experimente aus

der aktuellen fachchemischen Forschung entnommen sind oder in Zusammenarbeit mit Fachchemiker\*innen entwickelt wurden. Im LMUchemlab wurden im Laufe der Zeit unterschiedliche Schülerlaborprogramme für die Sekundarstufen I und II angeboten. Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte Schülerlaborprogramm zu *modernen Materialien* ist nach den Programmen *Nanotechnologie* und *bilinguales Schülerlabor* das dritte Programm im LMUchemlab und wird seit dem Sommer 2019 durchgeführt.

Um eine authentische Vermittlung von Wissenschaft, welche in der naturwissenschaftlichen Bildung eine wichtige Rolle spielt [49], zu gewährleisten, wurden die Räumlichkeiten des LMUchemlabs in die Praktikumsräume der anorganischen Chemie integriert. Die Schülerlabore sind voll ausgestattete Labore, in denen auch chemische Praktika für Studierende des Faches Chemie und von Lehramtsstudierenden durchgeführt werden. Durch verschließbare

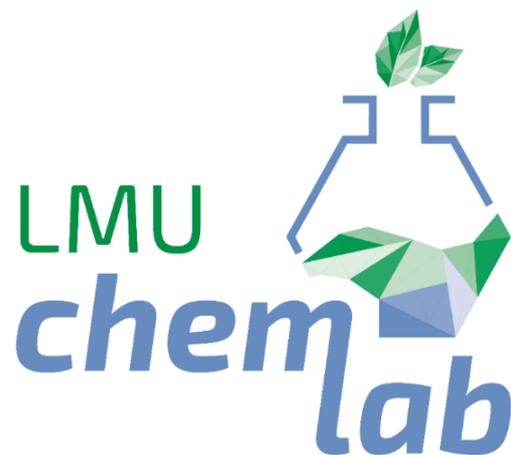


Abb. 5: Das Logo des LMUchemlab (Quelle: LMU).

Apothekerschränke können zudem weitere, nicht für die Experimente des Schülerlaborprogramms benötigte Chemikalien in den Räumlichkeiten sicher und zugleich für die Schüler\*innen demonstrativ sichtbar aufbewahrt werden.

Das LMUchemlab bietet, sofern aufgrund der COVID-19-Pandemie keine Abstandsregeln oder Kontaktbeschränkungen vorgeschrieben sind, Platz zum chemischen Experimentieren für bis zu 36 Schüler\*innen sowie sechs betreuende Lehramtsstudierende und wird von ganzen Klassen im Klassenverbund oder ausgewählten Kursen besucht. Das Programm zu *modernen Materialien* aus der Fachwissenschaft Chemie richtet sich an alle Schüler\*innen mit Chemieunterricht bis zum Ende der Sekundarstufe I. Dies sind in Bayern die Klassen 8 bis 10 aus Mittel- und Realschulen sowie Gymnasien. Die Klassen kommen meist aus dem Umkreis von München, vereinzelt besuchen zudem Klassen auf Klassenfahrten aus anderen Bundesländern das Schülerlabor.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schülerlaborprogramm zu *modernen Materialien* enthält fünf Experimentierstationen mit je 45 Minuten Dauer, die die Schüler\*innen in Kleingruppen zu etwa vier bis sechs Schüler\*innen absolvieren. Dazu kommen Einführung, Mittagspause und Abschlussbesprechung, sodass ein Schülerlaborbesuch etwa 5½ Stunden dauert. Die Schulklassen treffen meist gegen 9 Uhr morgens am *HighTechCampus* der LMU München ein und durchlaufen das Schülerlaborprogramm bis 14:30 Uhr. Der zeitliche Ablauf eines Schülerlabortages wird in Tabelle 1 dargestellt [vgl. 50].

Tabelle 1: Ablauf eines Schülerlabortages.

Zeit	Aktivität
9:00 – 9:30	Ankunft an der Fakultät für Chemie und Pharmazie der LMU München
30 Minuten	Begrüßung, Einführungsvortrag & Sicherheitsbelehrung
9:30 – 11:45	Experimentierphase I:
135 Minuten	3 Experimentierstationen á 45 Minuten
11:45 – 12:30	Mittagspause mit Mensabesuch
45 Minuten	
12:30 – 14:15	Experimentierphase II:
90 Minuten	2 Experimentierstationen á 45 Minuten und
15 Minuten	Abbrennen der selbst hergestellten Wunderkerzen
14:15 – 14:30	Abschlussbesprechung
15 Minuten	

### 3.3 Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms

Bei der Konzeption der Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms wurden sowohl die eingangs aufgeführten Zielsetzungen des Forschungsvorhabens als auch die äußeren Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Der Aufbau von professionellen Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien im chemischen Experiment bei Lehramtsstudierenden ist das übergeordnete Ziel des Schülerlaborprogramms. Dementsprechend werden für die praktischen Anteile des universitären Seminars chemische Experimente benötigt, welche durch digitale Medien lernförderlich unterstützt oder durch Messwerterfassung überhaupt erst für die Schüler\*innen zugänglich gemacht werden können.

Bei den äußeren Rahmenbedingungen spielt vor allem das Schülerlabor selbst sowie seine grundsätzliche Strukturierung eine maßgebliche Rolle: Die Schüler\*innen kommen für einen Tag und sollen in der vorgegebenen Zeit mehrere Experimente selbstständig durchführen können. Folglich müssen die Experimente nach der *Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht* [10] als Schülerexperimente durchgeführt werden dürfen und in ihrem zeitlichen Umfang im Laufe

eines Tages machbar sein. Die Herstellung von Wunderkerzen im Schülerlabor ist ein Beispiel für eine praktische als auch organisatorische Herausforderung: Die Trockenzeit von 24 Stunden konnte durch den Einsatz eines Trockenschanks auf zwei Stunden verkürzt werden. Gleichzeitig muss dadurch aber der Ablauf der Stationen im Schülerlabor so festgelegt werden, dass alle Wunderkerzen vor der Mittagspause hergestellt werden. Dies hat zur Folge, dass eine einfache Rotation der Schülergruppen an den Experimentierstationen nicht möglich ist, sondern ein Ablaufplan erstellt und einige Stationen zeitweise doppelt angeboten werden müssen.

Als konzeptionelle Vorarbeit für dieses Experimentierprogramm diente das von MARIA REIMANN am *Leibniz-Institut für Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik* in Kiel entwickelte Programm für Nanotechnologie im Schülerlabor [51], welches 2018 und 2019 auch im LMUchemlab in München für die Sekundarstufe I angeboten wurde. Zwei der Schülerlaborstationen aus diesem Programm wurden übernommen, mit digitalen Medien erweitert und in das Schülerlaborprogramm zu *modernen Materialien* integriert. Die anderen drei Experimentierstationen wurden neu konzipiert oder aus eigenen Vorarbeiten adaptiert. Angeboten werden dabei Experimente zu den Themen (1) *Nanotechnologie* [52], (2) *Methoden & Verfahren* sowie (3) *Pyrotechnik*. Eine Übersicht der fünf Experimentierstationen, der dabei behandelten Themengebiete sowie der eingesetzten digitalen Medien wird in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht der Experimentierstationen im LMUchemlab.

<b>Nr.</b>	<b>Stationsname</b>	<b>Schwerpunkt &amp; Inhalt</b>	<b>Digitales Medium</b>
1	Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor	Nanotechnologie Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor	Augmented Reality, Animation
2	Zukunftstechnologie 3D-Druck	Methoden & Verfahren Erstellung und Druck eines dreidimensionalen Molekülmodells	CAD-Software, 3D-Drucker
3	Energie in der Chemie	Methoden & Verfahren Visualisierung von Energieumsätzen in physikalischen und chemischen Vorgängen	Infrarotkamera
4	„Grüne“ Wunderkerzen	Methoden & Verfahren Entwicklung einer funktionierenden Wunderkerzenmischung mit Hilfe einer Simulation Pyrotechnik Herstellung einer ökologisch und toxikologisch unbedenklicheren Wunderkerze	Simulation
5	Nanowelten	Methoden & Verfahren Vermessung der Oberfläche eines menschlichen Haares und Darstellung mittels Falschfarbenbild	Rasterkraftmikroskop, Animation

Schülerlabore verfolgen als didaktisch angestrebtes Konzept oftmals das *Forschende Lernen* (inquiry-based learning) [50], wobei es sich um die didaktische Transformation von *Forschen* und *Lernen* durch die Bereitstellung von Lernarrangements handelt [53]. Um dem explorativen Charakter eines Schülerlabors gerecht zu werden, liegt der problemorientierte Ansatz des forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens [54] auch den fünf für dieses Schülerlaborprogramm entwickelten bzw. adaptierten Schülerexperimentierstationen zu Grunde.

Die Schüler\*innen erhalten beim Durchlaufen des forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens einen Einblick, mit welchen Methoden und Verfahren und somit wie in der Fachwissenschaft Chemie Erkenntnisse gewonnen werden, weshalb das Unterrichtsverfahren den

prozessorientierten Unterrichtskonzeptionen zuzurechnen ist [54]. Die Schüler\*innen gewinnen dabei selbst forschend – auch unter Einbezug experimenteller Phasen – neue Erkenntnisse, während die Lehrenden vordergründig als Lernbegleiter\*innen agieren und die Schüler\*innen zur fachgerechten Auseinandersetzung mit einer Thematik anleiten [54]. Da das Experiment in diesem Unterrichtsverfahren eine besonders hervorgehobene Stellung innehat, eignet es sich als Konzeptionsgrundlage für Schülerexperimentierstationen in Schülerlaborstationen ganz besonders.

Eine zentrales Merkmal des *Forschenden Lernens* ist der *Forschungszyklus* [53], wie er in digitaler Form auch in Station 4 „Grüne Wunderkerzen“ zur Anwendung kommt (vgl. Kapitel 3.3.4). Dem Forschungszyklus liegt die Annahme zugrunde, dass die wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung durch das Durchlaufen von typischen Zyklen an Forschungshandlungen erfolgt, welche im Sinne der prozessorientierten Unterrichtskonzeption didaktisch transformiert in den Unterricht integriert wird [53]. Der typische Ablauf eines Forschungszyklus wird in Abb. 6 dargestellt.

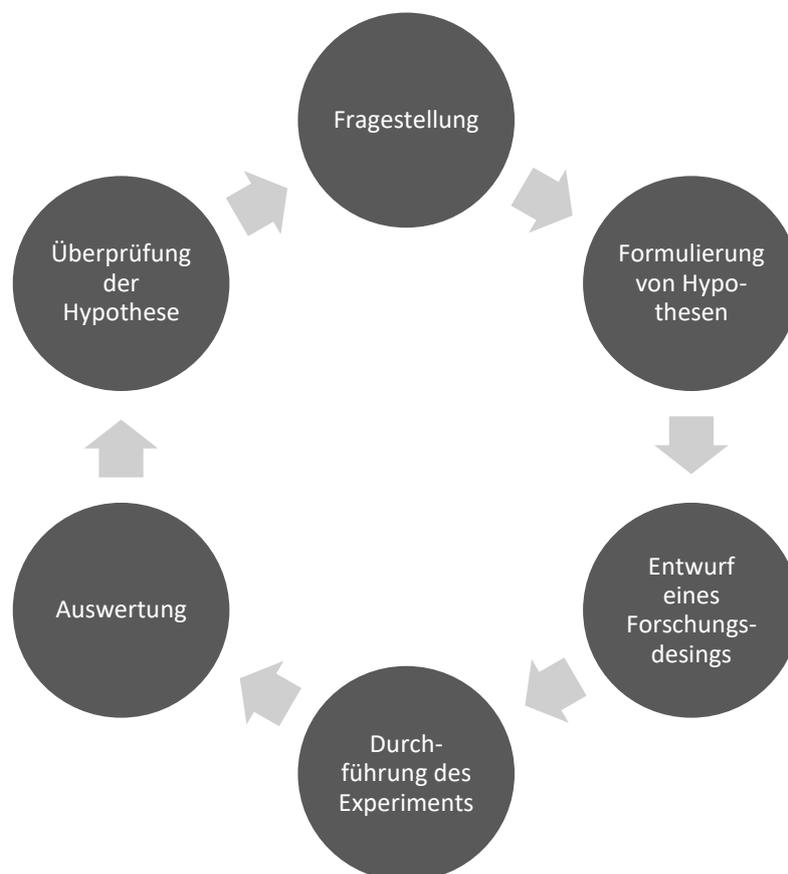


Abb. 6: Forschungszyklus nach WILDT [53] (eigene Darstellung, verändert).

In der nachfolgenden Beschreibung der fünf Experimentierstationen wird das Hauptaugenmerk auf die chemischen Experimente sowie auf die dabei eingesetzten digitalen Medien gelegt. Die an den einzelnen Experimentierstationen intendierten Lernerfahrungen im Umgang mit digitalen Medien auf Seiten der Studierenden werden später in den Kapiteln 4.5 sowie 5.6.5 ausführlich dargestellt. Die an den Experimentierstationen eingesetzten Arbeitsblätter sind im Anhang 1 der Arbeit zu finden.

### 3.3.1 Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor

An Experimentierstation 1 stellen Schüler\*innen Silbernanopartikel her, womit der Schwerpunkt dieser Station bei der wissenschaftlich bedeutsamen und hochaktuellen *Nanotechnologie* liegt [52]. Dazu werden die besonderen Bedingungen im Leidenfrost-Tropfen genutzt. Die Vorlage zu dieser Station stammt von MARIA WEISERMANN ET AL. [55], wobei hier auf die Vorarbeiten zur Synthese von Goldnanopartikeln von STEFAN SCHWARZER ET AL. [56] zurückgegriffen wurde. In den beiden erwähnten Quellen werden auch die zugrundeliegenden physikalischen Vorgänge und chemischen Reaktionen detailliert beschrieben. Die Herstellung von Gold- und Silbernanopartikeln ist darüber hinaus ein lang erprobtes und häufig eingesetztes Experiment im Schülerlabor. Während das ursprüngliche Experiment zur Synthese von Goldnanopartikeln im Leidenfrostreaktor für ältere Schüler\*innen aus der Sekundarstufe II konzipiert war, richtet sich die Experimentieranleitung für die Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrostreaktor an Schüler\*innen aus der Sekundarstufe I.

Für die Schüler\*innen aus der Sekundarstufe I sind die chemischen Reaktionen in diesem Experiment nicht einfach nachzuvollziehen, da verschiedene chemische und physikalische Konzepte miteinander in Bezug gebracht werden müssen, die sie zudem teilweise noch nicht im Schulunterricht kennen gelernt haben: Auf der einen Seite ist dies das physikalische Phänomen des Leidenfrost-Tropfens und die in ihm ablaufende chemische Reaktion der Autoprotolyse von Wasser. Auf der anderen Seite ist es die Reduktion der Silberkationen und das dazugehörige kolloidale Wachstum dieser über Silbernanopartikel hin zu elementarem Silber. Um den Schüler\*innen diese vielfältigen Themengebiete aus dem MINT-Unterricht auf einfache Weise zu erläutern, sodass sie diese in Bezug setzen und so die Synthese von Silbernanoparti-

keln verstehen können, eignet sich das digitale Medium *Augmented Reality*. Mit dieser virtuellen Erweiterung der Realität können Konzepte einfach vermittelt werden. Darüber hinaus ermöglicht der Einsatz einer Augmented Reality-App den Schüler\*innen, im Sinne einer Individualisierung, sich die verschiedenen MINT-Themenbereiche selbstständig zu erarbeiten [57]. Im LMUchemlab wird dies mit der AR-App *Zappar* auf Tablets umgesetzt, wobei für je zwei Schüler\*innen ein Tablet zur Verfügung steht.

Dabei kommen zwei Animationen (Abb. 7), ein Podcast sowie ein Bild mit den Lösungen der Aufgaben des Arbeitsblattes als appspezifische Overlays zum Einsatz.



Abb. 7: Blick durch das Tablet mit der AR-App *Zappar* auf eine Spritzflasche. Als Overlay wird hier eine Animation der Autoprotolyse von Wasser gezeigt (eigene Aufnahme).

### 3.3.2 Station 2: Zukunftstechnologie 3D-Druck

Diese Schülerexperimentierstation ist eine für das Schülerlaborprogramm auf 45 Minuten reduzierte Version der Unterrichtseinheit zu 3D-Druckern und deren Filamente, die in Kapitel 5.1 und 5.2 ausführlich dargestellt wird und publiziert wurde [58,59]. Bei der zweiten Station steht die Technologie des 3D-Drucks im Mittelpunkt. Zuerst erarbeiten die Schüler\*innen mit der kostenlosen Online-CAD-Software *tinkercad* ([www.tinkercad.com](http://www.tinkercad.com)) ein Molekülmodell.

Dies ist bei Schüler\*innen aus dem Anfangsunterricht in der Regel das einfache Modell eines Wassermoleküls [58,59]. Haben die Schüler\*innen im Schulunterricht bereits das VSEPR-Modell besprochen, fertigen sie neben dem Wassermolekülmodell häufig weitere Molekülmodelle mit unterschiedlichen räumlichen Strukturen wie Kohlenstoffdioxid, Methan (Abb. 8) oder Bortrifluorid an [60]. Dabei sollen die Schüler\*innen sowohl ihr räumliches Vorstellungsvermögen als auch den praktischen Einsatz der VSEPR-Theorie trainieren. Durch das Fehlen von vorgegebenen Molekülbauteilen müssen sich die Schüler\*innen zudem in besonderem Maße mit den zugrundeliegenden geometrischen Formen sowie den Bindungswinkeln und dem Einfluss von freien Elektronenpaaren auf diese beschäftigen.

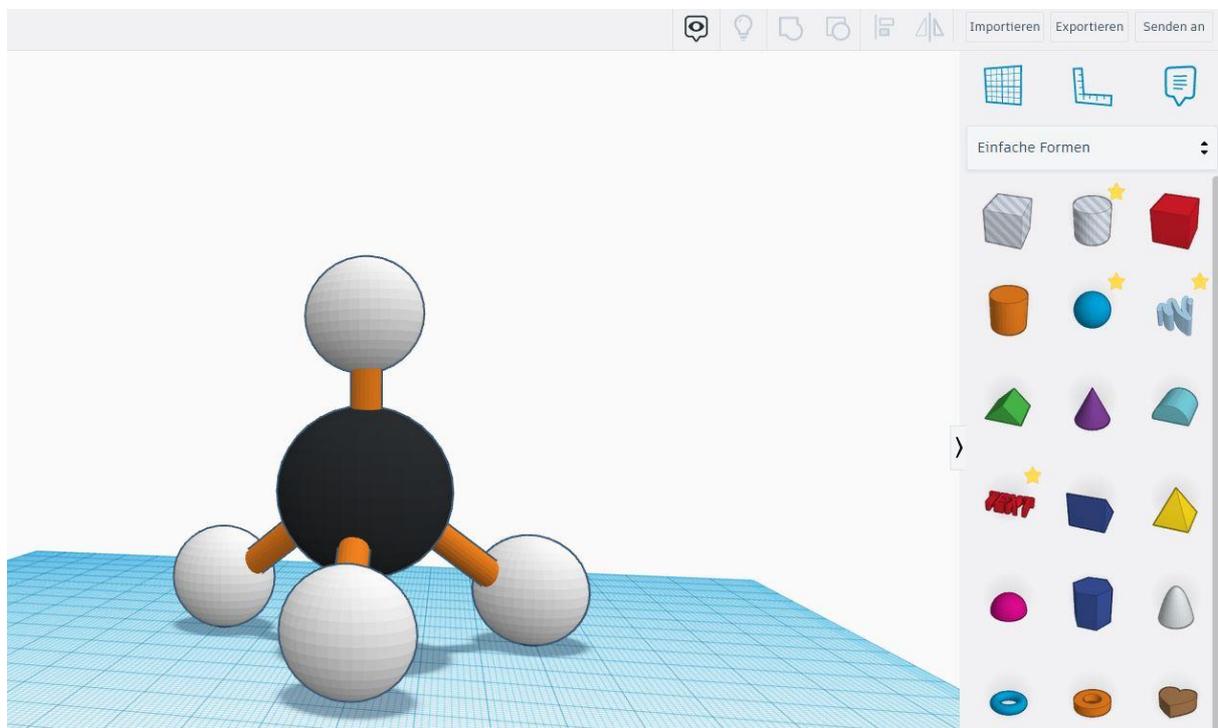


Abb. 8: Ein mit der CAD-Software *tinkercad* selbst erstelltes Methanmolekülmodell (eigene Aufnahme).

Während im Anschluss daran das von den Schüler\*innen selbst erstellte Molekülmodell mit einem 3D-Drucker gedruckt wird, widmen sie sich den Grundlagen des 3D-Drucks sowie den Druckfilamenten und somit dem Anteil der Fachwissenschaft Chemie am 3D-Druck.

Die Betreuenden befragen die Schüler\*innen meist nach den 3D-Druckern zugrunde liegenden Wissenschaften. Während die Informatik und Ingenieurwissenschaften zur Konstruktion und Programmierung eines 3D-Druckers von den Schüler\*innen meist genannt werden, fehlt die Chemie zur Herstellung eines passenden Kunststoffdruckfilaments in dieser Aufzählung

oft. Nachdem der Beitrag der Chemie zur 3D-Drucktechnologie den Schüler\*innen aufgezeigt wurde, wird diese Leistung der Fachwissenschaft Chemie näher betrachtet.

Die Schüler\*innen aus der Sekundarstufe I haben noch keine Fachkenntnis von den unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffe, von Polymeren oder gar von den chemischen Reaktionen zu deren Synthese, da dieser Themenkomplex in den meisten deutschen Lehrplänen erst in der Sekundarstufe II thematisiert wird [61,62]. Dementsprechend kommen die Schüler\*innen oftmals mit einem eigenen Präkonzept von *Plastik* an diese Experimentierstation, das es zuerst zu ergründen gilt. Das Ziel dieser Experimentierstation ist somit die Vermittlung des Wissens, dass es verschiedene Kunststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften gibt. Hierzu führen die Schüler\*innen selbst ein Experiment durch, bei dem die unterschiedlichen Drucktemperaturen der drei Kunststoffe Polymilchsäure (PLA), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und Polyvinylalkohol (PVA) auf einfache Weise aufgezeigt werden [59]. Dazu werden die drei Kunststoffe mit einem Heißluftföhn erhitzt und die Zeit bis zum Erreichen eines zähflüssigen Zustandes, der Drucktemperatur, gemessen und verglichen (Abb. 9).

In der anschließenden Diskussion wird festgestellt, dass es verschiedene Kunststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften wie Schmelzbereichen gibt, die unterschiedliche chemische Zusammensetzungen besitzen. So wird auch ohne die Darstellung von konkreten chemischen Strukturen den Schüler\*innen das Struktur-Eigenschafts-Konzept nähergebracht.

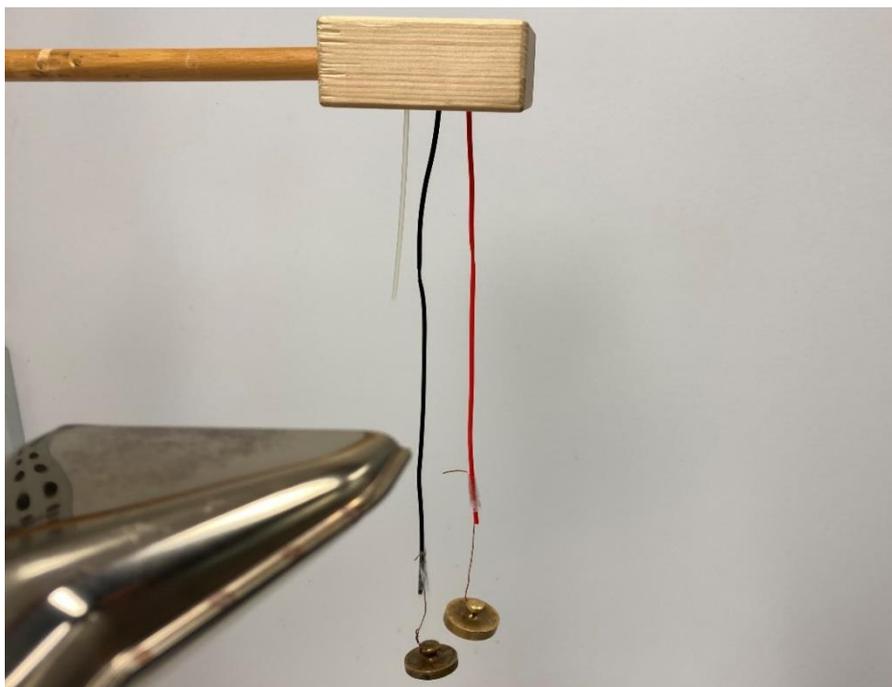


Abb. 9: Erhitzen der drei Druckfilamente PVA, PLA und ABS (v. l. n. r., eigene Aufnahme).

### 3.3.3 Station 3: Energie in der Chemie

An Station 3 steht die Visualisierung des Energieumsatzes von chemischen Reaktionen im Mittelpunkt. Dazu werden unterschiedliche physikalische Vorgänge und chemische Reaktionen betrachtet und deren Energieumsatz in Form von Wärmeenergie mit Hilfe einer Wärmebildkamera visualisiert.

Schüler\*innen haben besonders beim Energiekonzept vielfältige und häufig falsche Präkonzepte [63,64]. Dies ist nicht verwunderlich, da Energie meist nicht sichtbar und somit nicht anschaulich ist [64]. Zudem wird in der Schule das Gesetz der Energieerhaltung unterrichtet, während gleichzeitig sowohl in schulischen als auch in privaten Kontexten vom Energieverbrauch oder sogar von Energieverlust gesprochen wird. Ein Beispiel hierfür ist, wenn eine Batterie umgangssprachlich als „leer“ bezeichnet wird. Um diese vermeintlichen Gegensätze bzw. diese in der alltäglichen Kommunikation nicht fachgerecht dargestellten Zusammenhänge den Schüler\*innen verständlich zugänglich zu machen, sind Wärmebildkameras geeignet. Sie ermöglichen es, den hohen Abstraktionsgrad von Energieumwandlungen in chemischen Reaktionen und physikalischen Vorgängen nachzuvollziehen. Dies wird vor dem Hintergrund, dass das Energie-Konzept eine Schnittstelle zwischen den verschiedenen Naturwissenschaften Biologie, Chemie und Physik darstellt, umso wichtiger [63]. Aus diesem Grund werden an dieser Experimentierstation auch physikalische Vorgänge betrachtet, wobei hier zusätzlich bei den Schüler\*innen die Fähigkeit zur Unterscheidung von physikalischen Vorgängen und chemischen Reaktionen aus dem Anfangsunterricht gefestigt wird. Im LMUchemlab wird zur Visualisierung der energetischen Zusammenhänge die Wärmebildkamera *FLIROne Pro* in Kombination mit der für das Gerät notwendigen App auf einem iPad eingesetzt.

Um die Schüler\*innen mit dem digitalen Medium Infrarotbild, der Wärmebildkamera selbst sowie der Theorie von Falschfarbenbildern vertraut zu machen, wird ein einfacher Phasenübergang beobachtet. Dazu wird etwas Ethanol auf den Handrücken eines\*r Schüler\*in gegeben. Während das Ethanol vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht, kann an dieser Stelle eine Abkühlung der Haut beobachtet werden, da das Ethanol für den Phasenübergang der Umgebung Energie entzieht. Die verwendete Wärmebildkamera *FLIROne Pro* verfügt sowohl über eine Infrarotkamera als auch über eine optische Kamera, woraus ein kombiniertes Bild erzeugt werden kann. Dies ermöglicht den Schüler\*innen eine schnelle Orientierung vor

Versuchsbeginn, wenn die Edukte bei Zimmertemperatur vorliegen und in einem Infrarotbild somit noch keine Strukturen zu erkennen sind (vgl. Kapitel 5.6.4).

Nach diesem einführenden Versuch führen die Schüler\*innen selbstständig zwei weitere Experimente durch. Beim ersten Experiment betrachten die Schüler\*innen die Funktionsweise eines Taschenwärmers näher. Dazu wird Natriumthiosulfat durch Erhitzen in einem Reagenzglas über dem Bunsenbrenner vom festen in den flüssigen Aggregatzustand überführt. Beim Abkühlen entsteht der metastabile Zustand der unterkühlten Schmelze, was am fehlenden Kristallisationsansatz liegt. Durch eine Impulsübertragung oder durch einen Impfkristall kann im Anschluss die Erstarrung der unterkühlten Schmelze ausgelöst werden (Abb. 10).

Dabei wird die Energiemenge in Form von Wärmeenergie freigegeben, die zur Überführung vom festen in den flüssigen Zustand notwendig war. Theoretisch kann sich das Natriumthiosulfat so wieder auf  $48,3\text{ °C}$ , seiner Schmelztemperatur, erhitzen. In der Praxis werden aber meist nur etwa  $46,0\text{ °C}$  erreicht, da an die Umgebung Energie abgegeben wird.



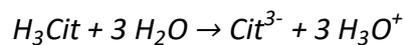
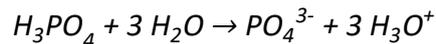
Abb. 10: Nach Zugabe eines Impfkristalls erstarrt die unterkühlte Schmelze unter Wärmeentwicklung (eigene Aufnahme).

Beim zweiten Versuch werden Zitronensäure und Natriumhydrogencarbonat in einer Petrischale vermischt und die Temperatur vor und nach der Zugabe von einigen Tropfen Wasser gemessen. Die Schüler\*innen erkennen meist ohne Probleme, dass erst durch die Zugabe von Wasser die Ionen der beiden Salze in hydratisierter Form vorliegen und somit die chemische Reaktion beginnt.

Dabei läuft die nachfolgende, nach dem Prinzip der didaktischen Reduktion aufbereitete, Säure-Base Reaktion ab:



Das „Cit“ in der Gleichung steht dabei für das Citrat-Anion ( $C_6H_5O_7^{3-}$ ). Da die das Schülerlabor besuchenden Schüler\*innen oftmals noch nicht mit dem Aufbau organischer Säuren vertraut sind, empfiehlt es sich, den Säurerest in dieser verkürzten Form darzustellen:



#### 3.3.4 Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen

Bei dieser Station stellen die Schüler\*innen selbst neuartige Wunderkerzen her. Die Wunderkerzen wurden in Zusammenarbeit mit der Abteilung für hochenergetische Materialien der LMU München entwickelt und konnten durch diese Kooperation energetisch charakterisiert werden. Die energetische Charakterisierung und der erst dadurch ermöglichte Ausschluss der Explosionsfähigkeit sowie der Explosionsgefährlichkeit ist die Voraussetzung für den schulischen Einsatz [10]. Die Theorie der Wunderkerzen sowie die Durchführung als Schülerlaborexperiment wurden entsprechend publiziert [65–67] und können den Kapiteln 5.3 bis 5.5 entnommen werden. Zudem ist der Herstellungsprozess online als Video-Tutorial abrufbar [68].

Bevor die Schüler\*innen die Wunderkerzen selbst herstellen, entwickeln sie mit Hilfe einer digitalen Simulation im Sinne eines forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens [54] die passende Reaktionsmischung. Dazu werden den Schüler\*innen die Edukte sowie das angestrebte Gesamtgewicht der Mischung von 1,5 g bis 2 g vorgegeben. Die Schüler\*innen durchlaufen einen digitalen Forschungszyklus [53], indem sie in der Simulation verschiedene Mischungen erproben und aufgestellte Hypothesen digital testen. Dabei erfahren sie auch die Funktion der einzelnen Edukte im Wunderkerzenreaktionsgemisch, wodurch erste Ideen über die ablaufenden chemischen Reaktionen seitens der Schüler\*innen generiert werden können. Bei der Besprechung der Theorie am Ende der Station erfolgt der Rückbezug hierauf. Die Simulation ist so programmiert, dass die Ergebnisse auch in der Realität beobachtet werden

können, sofern die Wunderkerze handwerklich gut hergestellt wird. Dies führt bei den Schüler\*innen oftmals lange Zeit zu keinem Ergebnis in der Simulation, da die Mischungen nur bei bestimmten Zusammensetzungsverhältnissen überhaupt einen Funkenflug zeigen (Abb. 11).

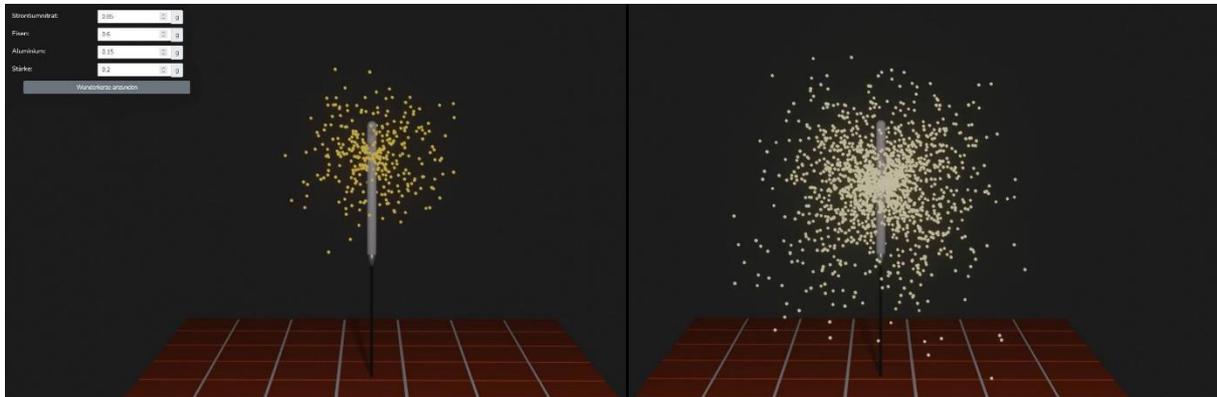


Abb. 11: Simulation einer idealen Wunderkerze (links) sowie einer zu reaktiven Wunderkerze aufgrund eines zu hohen Aluminiumanteils (rechts, eigene Aufnahmen).

So soll mit Hilfe des digitalen Forschungszyklus authentisches Lernen ermöglicht werden. Die Simulation ermöglicht zudem die digitale Erprobung von Mischungen, die aufgrund ihrer Reaktivität nach den Vorgaben der *RiSU* nicht als Schülerexperiment durchgeführt werden dürfen (Abb. 11).

Die beschriebene Simulation wurde eigens für die Experimentierstation des LMUchemlabs angefertigt. Die inhaltliche Grundlage der Visualisierung stellen sieben verschiedene Videos mit unterschiedlichen Abbrenneigenschaften der Wunderkerze, die mit Hilfe der 3D-Grafiksoftware *Blender* produziert wurden, dar. Auf einer mit PHP 7 erstellten Eingabemaske werden die Eduktverhältnisse der von den Schüler\*innen eingegebenen Wunderkerzenmischungen berechnet und anhand dieser eines der Videos ausgewählt und abgespielt. Auf diese Weise kann die Simulation ohne vorherige Installation einer Software eingesetzt werden, sofern das eingesetzte Endgerät über Internetzugang verfügt. Darüber hinaus ist die Simulation vom Endgerät unabhängig und kann sowohl mit einem Smartphone oder Tablet als auch am Computer verwendet werden. Im LMUchemlab wird die Simulation auf Tablets eingesetzt.

Nachdem die Schüler\*innen mit Hilfe der Simulation eine nicht gefährliche, aber funktionierende Wunderkerzenmischung entwickelt haben, stellen sie diese selbst her. Am Ende eines jeden Schülerlabortages werden die in dieser Weise produzierten Wunderkerzen abgebrannt

und der Funkenflug der von den verschiedenen Schülergruppen hergestellten Wunderkerzen verglichen.

### 3.3.5 Station 5: Nanowelten

An der fünften Experimentierstation untersuchen die Schüler\*innen die Oberfläche eines menschlichen Haars im Nanometerbereich, wobei der inhaltliche Schwerpunkt *Methoden & Verfahren* [52] an dieser Station abgedeckt wird.

Im Sinne des forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens [54] untersuchen die Schüler\*innen das Haar zuerst mit dem bloßen Auge. Anschließend betrachten sie es unter einem Lichtmikroskop, wobei bereits deutliche Unterschiede gegenüber der ersten Betrachtung ersichtlich werden. Um das Haar noch genauer betrachten zu können, vermessen die Schüler\*innen die Haaroberfläche mit einem Rasterkraftmikroskop. Hierzu ist zunächst eine ausführliche Einführung sowie die Erläuterung von der Funktionsweise des Rasterkraftmikroskops erforderlich [69]. Mit seiner Hilfe kann ein Bereich von etwa 50  $\mu\text{m}$  der Haaroberfläche auf wenige Nanometer genau abgebildet werden. Während die Messung am Rasterkraftmikroskop erfolgt, erarbeiten sich die Schüler\*innen mit Hilfe der Betreuenden, die ihnen als Expert\*innen an dieser Station unterstützend zur Seite stehen, die Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskops. Dafür steht sowohl ein klassisches, analoges Modell als auch eine Animation (Abb. 12) zur Verfügung.

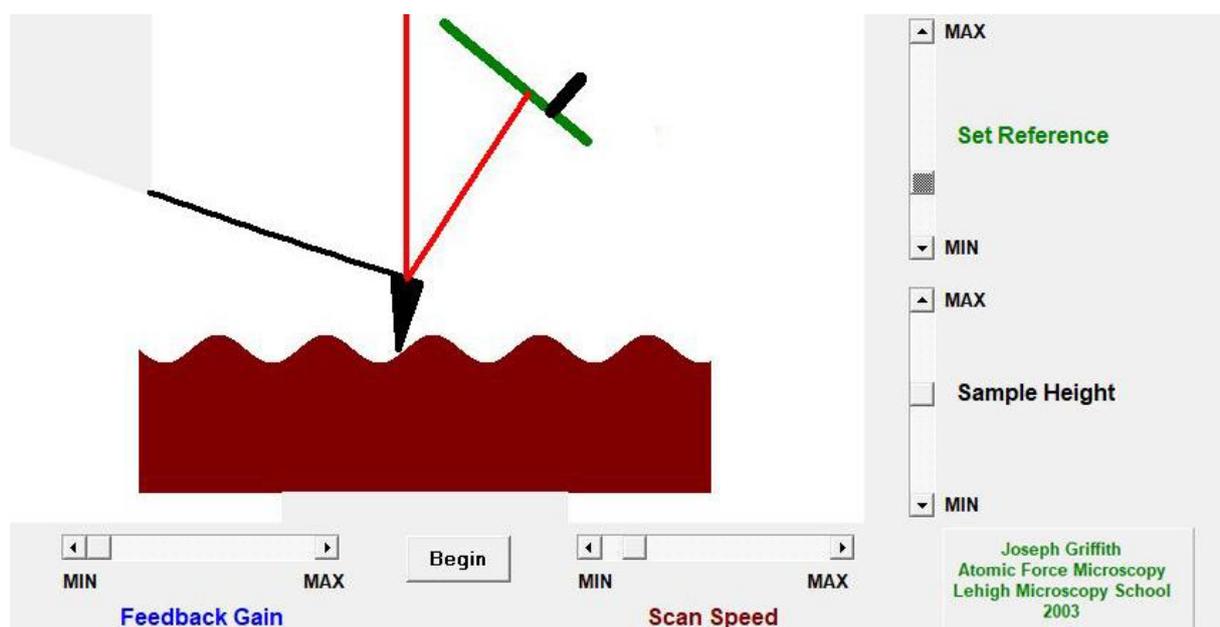


Abb. 12: Programm zur Animation des Lichtzeigerprinzips eines Rasterkraftmikroskops [70] (eigene Aufnahme).

Die Schüler\*innen sollen dabei erkennen, dass die Darstellung der Oberfläche beim Rasterkraftmikroskop nicht durch eine optische Vergrößerung wie beim Lichtmikroskop, sondern durch die Umwandlung von Messergebnissen in ein Falschfarbenbild – ähnlich einem mit einer Wärmebildkamera aufgenommenen Infrarotbild – erzeugt wird. Hierzu wird das Lichtzeigerprinzip angewandt, bei dem die Spitze des Rasterkraftmikroskops, dem sogenannten Cantilever, die Oberfläche der präparierten Probe abrastert. Dabei bewegt sich der Cantilever bei Unebenheiten der Oberfläche aufgrund der zwischenmolekularen Van-der-Waals-Kräfte auf und ab, was wiederum über die Ablenkung eines Laserstrahls mittels Photodiode detektiert und aufgezeichnet wird. Durch eine Fourier-Transformation wird aus diesen Aufzeichnungen ein Bild errechnet und so die Oberfläche des Haares dargestellt.

## 4 Konzeption eines universitären Seminars zur Vermittlung digitaler Kompetenzen

In Lehr-Lern-Laboren sammeln angehende Lehrer\*innen erste praktische Unterrichtserfahrungen in einem überschaubaren und komplexitätsreduzierten Rahmen [71]. Bausteine der studentischen Aktivität können, neben der Betreuung von Schüler\*innen beim Experimentieren im Schülerlabor, dabei das theoriegeleitete Vorbereiten von Labor-Lernumgebungen, das Beobachten und Analysieren von Lernerfahrungen der Schüler\*innen sowie die Reflexion des eigenen Handelns sein [71]. Hierfür werden meist begleitende, universitäre Seminare angeboten.

### 4.1 Publikationsstand Lehr-Lern-Labore

Die praktische, universitäre Ausbildung von Lehramtsstudierenden in *Schülerlaboren*<sup>L</sup> wird auf unterschiedliche Weise empirisch untersucht sowie evaluiert [72]. Da Lehr-Lern-Labore noch nicht lange im Fokus der fachdidaktischen Forschung stehen, haben viele Publikationen über die Wirksamkeit von Lehr-Lern-Laboren in der Studentenausbildung einen explorativen Charakter [73]. Viele der bisher veröffentlichten Studien haben kleine Stichproben, sodass keine empirisch gesicherten Aussagen über ihre Wirkung in der ersten Phase der Lehramtsausbildung möglich sind [73]. Darüber hinaus sind die organisatorischen Rahmenbedingungen für die Studierenden in den verschiedenen Lehr-Lern-Labor-Settings bzgl. Instruktion, Betreuungshäufigkeit und Reflexionstätigkeit sehr unterschiedlich, weswegen ein Vergleich der Studien und somit eine Vorhersage über die Wirkung nicht möglich ist. Die nachfolgende Übersicht von ausgewählten Publikationen zur MINT-Lehrerausbildung in Schülerlaboren gibt einen ersten Eindruck über die aktuelle Forschungslage. Die Auflistung ist wertungsfrei, in alphabetischer Reihenfolge nach den Erstautor\*innen geordnet.

- DOHRMANN, R. & NORDMEIER, V. (2020): *Die Verknüpfung von Theorie und Praxis im Lehr-Lern-Labor-Blockseminar als Unterstützung der Professionalisierung angehender Lehrpersonen* [74].

Die Autoren zeigen in der Veröffentlichung auf, welche standortbezogenen, empirischen Ergebnisse die einzelnen Teilprojekte des Verbundprojekts *Schülerlabore zu*

*Lehr-Lern-Laboren* aufweisen. Die Daten der Teilstudien wurden in Fragebogenstudien im Pre-Post-Design oder mit Hilfe von leitfadengestützten Interviews erhoben. Im Rahmen der Studien wird aufgezeigt, dass Lehr-Lern-Labore auf Lehramtsstudierende moderate bis mittlere Effektstärken auf die Entwicklung von fachdidaktischem Wissen, Fähigkeit zur Reflexion sowie auf die Entwicklung von Selbstwirksamkeitserwartungen und Kompetenzselbsteinschätzungen haben [74].

- ERNST, G.; PRIEMER, B. & SCHULZ, J. (2020): *Frühe Praxiserfahrungen in einem Lehr-Lern-Labor* [75].

An der Humboldt-Universität zu Berlin sammeln Lehramtsstudierende des Faches Physik im Bachelorstudium im 2. Semester – und somit bereits sehr früh – Unterrichtserfahrungen in kurzen Unterrichtssequenzen in dem Lehr-Lern-Labor *UniLab Adlershof*. Neben einem praxisnahen Einstieg in die Fachdidaktik sowie der Steigerung der Studienmotivation führt diese frühe Implementierung von Unterrichtspraxis bei den Studierenden zu einer hohen Bereitschaft, sich mit der Fachdidaktik tiefgehend zu beschäftigen. Darüber hinaus erfahren sie bereits früh in ihrer Ausbildung, welchen Nutzen fachdidaktische Konzepte aufgrund der großen Komplexität von Unterricht haben [75].

- NEUMANN, I.; SORGE, S.; NEUMANN, K., PARACHMANN, I. & SCHWANNEWEDEL, J. (2020): *Die Kieler Forschungswerkstatt – ein Lehr-Lern-Labor mit Fokus auf aktuelle Forschungsthemen* [76].

An der Christian-Albrechts-Universität Kiel wurde für das dort ansässige Schülerlabor *Kieler Forschungswerkstatt* ein fächerübergreifendes Experimentierprogramm für die drei MINT-Fächer Biologie, Physik und Chemie entwickelt. Die Inhalte der Stationen sind interdisziplinär angelegt und an aktuelle Forschungsgebiete der Universität angelehnt. Lehramtsstudierende der drei MINT-Fächer bekommen dabei in Form eines fachübergreifenden Seminars die Möglichkeit, ihr theoretisches Professionswissen der Fachwissenschaft, Fachdidaktik und Pädagogik im Umgang mit Schüler\*innen in Microteachingsituationen (vgl. Kapitel 4.1) anzuwenden und zu reflektieren. Erwähnenswert ist, dass das Seminar im Lehramts-Masterstudiengang aller drei Fächer ver-

pflichtend ist. Es zeigte sich, dass das Seminar ein wichtiger Baustein im Lehramtsstudium ist, um den sogenannten „Praxisschock“ [vgl. 77] zu Beginn des Referendariats zu vermeiden [76].

- PRIEMER, B. (2020): *Ein kurzer Überblick über den Stand der fachdidaktischen Forschung der MINT-Fächer an Lehr-Lern-Laboren* [73].

Der Autor hat für das Buchkapitel rund 70 Publikationen gesichtet, die bis 2018 erschienen sind und die Ergebnisse aus der Interventionsforschung von Lehr-Lern-Laboren veröffentlicht. Damit gibt er einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand in der ersten Phase der Lehramtsausbildung in deutschen Lehr-Lern-Laboren, wobei der Buchbeitrag – aufgrund des noch jungen Forschungszweigs – explizit keine Metaanalyse darstellt. Der Autor identifiziert im Rahmen der Sichtung der Publikationen sieben Zielkonstrukte, auf die sich die didaktische Forschung konzentriert:

- Professionelle Unterrichtswahrnehmung
- Handlungskompetenz
- Diagnosekompetenz
- Reflexionskompetenz
- Fachdidaktisches Wissen
- Selbstwirksamkeitserwartung
- Wahrnehmung der Lehr-Lern-Labore durch Studierende

Abschließend wird das Fazit gezogen, dass Lehr-Lern-Labore einen positiven Einfluss auf die sieben genannten Zielkonstrukte bei Lehramtsstudierenden haben können. Zudem wird festgestellt, dass in Lehr-Lern-Laboren nicht zu viele Kompetenzen adressiert werden sollten, um eine beobachtbare Wirkung bei den Studierenden hervorzurufen. Aufgrund der unterschiedlichen Settings ist eine allgemeine Aussage über die Gelin- gungsbedingungen von Lehr-Lern-Laboren in der Lehramtsausbildung aber noch nicht möglich [73].

- SIMON, M. & WOEST, V. (2020): *Die Ausbildung professioneller Handlungskompetenzen von Chemielehramtsstudierenden im Lehr-Lern-Labor* [78].

In der Veröffentlichung werden die Gründe dargestellt, weshalb das Schülerlabor der Universität Jena von einem klassischen Schülerlabor zu einem Lehr-Lern-Labor weiterentwickelt wurde. Die Förderung professioneller Handlungskompetenzen bei den Lehramtsstudierenden des Faches Chemie ist dabei sowohl die Zielstellung bei der Umstrukturierung des Schülerlabors als auch das Zielkonstrukt der Intervention. In einer ersten Evaluation des begleitenden Seminars bzgl. der Theorie-Praxis-Verzahnung zeigt sich, dass die Seminarteilnehmenden den Praxisbezug des Lehr-Lern-Laborsettings als positiv und gewinnbringend bewerten [78].

- SIMON, M. & WOEST, V. (2021): *Lehr-Lern-Labore als Orte der Professionalisierung in der Ausbildung von Chemielehrkräften* [79].

Die Autoren können im Rahmen ihrer an dem Schülerlabor der Universität Jena durchgeführten Pilotstudie zeigen, dass das Lehr-Lern-Labor von den Studierenden positiv wahrgenommen wird, sie zu ersten reflexiven Auseinandersetzungen anregt und dadurch den Perspektivenwechsel von der Schüler\*innen- zu Lehrer\*innenperspektive ermöglicht [79].

- SORGE, S.; NEUMANN, I.; NEUMANN, K.; PARCHMANN, I. & SCHWANENWEDEL, J. (2020): *Lehr-Lern-Labore als Vorbereitung auf den Lehrberuf – die Perspektive der Studierenden* [80].

Die Autor\*innen stellen eine Interview-Studie vor, die der Frage nachgeht, ob Studierende die komplexitätsreduzierten Praxiserfahrungen im Lehr-Lern-Labor der Kieler Forschungswerkstatt als Bereicherung für ihre Vorbereitung auf die spätere berufliche Praxis erleben. Die befragten Seminarteilnehmenden befanden sich zur Zeit der Befragung bereits im Referendariat. Sie gaben an, dass die Unterrichtsversuche in Lehr-Lern-Laboren zwar aufgrund des Microteachingsettings in der Komplexität reduziert sind und sie diese somit nicht mit dem späteren Unterrichten als vergleichbar empfinden. Dennoch wurde das Unterrichten im Schülerlabor von den Befragten als sinnvoller Beitrag auf das Referendariat angesehen [80].

- STENDER, A. (2021): *Lehr-Lern-Labor BinEx: Konzeption und Evaluation eines Lehr-Lern-Labor-Seminars zum binnendifferenzierenden Experimentieren* [81].

Zur Erlangung von professionellen Unterrichtskompetenzen nach dem *PCK-Modell* [26] betreuen Lehramtsstudierende Schüler\*innen in einem Lern-Lern-Labor und besuchen darüber hinaus ein begleitendes Seminar. Die Wirkung der Intervention wird mit Hilfe eines Online-Fragebogens erfasst, Ergebnisse wurden bislang noch nicht publiziert [81].

#### 4.2 Das Lehr-Lern-Setting *Microteaching*

Microteaching ist eine spezifische Methode in der praktischen, universitären Ausbildung von Lehramtsstudierenden, bei der die Studierenden ihre Lehrkompetenzen in kleinen Unterrichtseinheiten mit einer Kleingruppe von Lernenden, welche meistens zwischen drei und sechs Schüler\*innen umfasst, trainieren [82]. Oftmals werden diese Unterrichtssequenzen videographiert, um später gemeinsam mit dem Seminarleitenden und anderen Seminarteilnehmer\*innen analysiert zu werden und damit die Aneignung von gewünschten verbalen oder nonverbalen Verhaltensmustern weiter zu fördern [82]. Deshalb bietet sich diese Methode aufgrund ihrer positiven Effekte auf die Aneignung von erlernten Verhaltensmustern sowie deren Integration in das eigene Verhaltensrepertoire an, um neue Unterrichtskonzepte und -methoden zu trainieren [82] und so die didaktisch gewinnbringende Verwendung von digitalen Medien im chemischen Experiment zu erlernen.

Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens der praktischen Lehrerausbildung liegt in dessen organisatorischer Umsetzung: Da jede\*r Seminarteilnehmende in Microteachingsituationen nur zwei bis fünf Schüler\*innen unterrichtet, können bis zu sechs Seminarteilnehmer\*innen gleichzeitig im Schülerlabor bei der Anwesenheit von einer Schulkasse aktiv ihre Lehrkompetenzen trainieren. So ist es möglich, mit vergleichsweise geringem Aufwand und nur wenigen Schulklassen, im Schülerlabor einer großen Anzahl an Studierenden die Seminarteilnahme zu ermöglichen. Darüber hinaus ist das Microteachingkonzept dadurch gut geeignet, eine große Probandenanzahl, welche die am Seminar teilnehmenden Lehramtsstudierenden darstellen, für die begleitende Interventionsstudie, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, zu generieren und so eine empirisch signifikante Aussage über die Wirkung des Seminars zu erhalten.

Während Microteaching und dessen Effektivität seit inzwischen mehr als 35 Jahren im Fokus von Studien steht [82] und dessen positive Wirkung auf die Unterrichtskompetenzen der Seminarteilnehmenden in verschiedenen Studien nachgewiesen wurde [82–84], konnte inzwischen auch bewiesen werden, dass Microteaching zudem einen positiven Einfluss auf die Selbstwirksamkeitserwartung der Seminarteilnehmer\*innen hat [84].

#### 4.3 Videographie in Schülerlaboren für die Lehramtsausbildung

*UNI-Klassen* wurden vom Lehrstuhl für Grundschulpädagogik und -didaktik an der LMU München entwickelt und sind Räume, in denen die Begegnung zwischen Lernenden und Lehrenden in besonderem Fokus steht. Mit Hilfe von Videographie werden Lehr-Lern-Situationen aufgezeichnet und können so auf vielfältige Weise für Lehre und Forschung nutzbar gemacht werden. Lehramtsstudierende können *Unterricht entwickeln, erproben oder evaluieren*, im Zusammenhang mit *UNI-Klassen* wird dieses Konzept *Unterricht e<sup>3</sup>* genannt [85], und Forschende können Unterricht analysieren, ohne die Unterrichtssituation durch ihre Anwesenheit als Beobachtungspersonen zu stören. *UNI-Klassen* sind dadurch eine besondere Form der praxisnahen Unterrichtsforschung mit standardisierten Forschungsmöglichkeiten. Die Fakultät für Psychologie und Pädagogik hat seit 2010 mehrere Projekte und Studien in *UNI-Klassen* durchgeführt. Darunter befinden sich auch einige Studien zur Wirksamkeitsforschung von ausgewählten Methoden und Medien [86].

Beobachtungen können in *UNI-Klassen* zu vielfältigen Zielsetzungen durchgeführt werden: Für die Lehr-Lern-Forschung, für die Evaluation und Bewertung von Lehrkräften sowie für die Weiterentwicklung der eigenen Kompetenzen [87]. Im Rahmen des universitären Begleitseminars des *LMUchemlabs* für die Lehramtsstudierenden werden in der *UNI-Klasse* Beobachtungen für die Weiterentwicklung der eigenen Kompetenzen der Studierenden gemäß *Unterricht e<sup>3</sup>* durchgeführt. Dabei kann die Selbstreflexion aufgrund der Videographie zeitversetzt und ortsunabhängig stattfinden.

In einer Studie über Effekte von Reflexion und Feedback nach dem Durchlaufen einer Trainingseinheit in einer *UNI-Klasse* wurde deutlich, dass Studierende danach ihre Beobachtungsgenauigkeit höher einschätzen und Beobachtungen besser für die Reflexion nutzen können [88].

#### 4.4 Das universitäre Begleitseminar zum LMUchemlab

Die Vermittlung professioneller Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien im Chemieunterricht an Lehramtsstudierende im LMUchemlab erfolgt in erster Linie in praktischen Unterrichtseinheiten. Aus diesem Grund wurde ein universitäres Seminar für die Lehramtsstudierenden konzipiert, das die praktische Erprobung des Einsatzes digitaler Medien in chemischen Experimenten im Schülerlabor auf Grundlage von medien-didaktischen Theorien rahmt und zusätzlich die Studierenden zur Selbstreflexion anregt (Abb. 13).

Das hier vorgestellte Seminar wurde im Rahmen dieser Arbeit erstellt und durchgeführt. Es wurde für die Student\*innen des Unterrichtsfachs Chemie aller Schularten konzipiert und besteht aus drei Kernelementen:

- (1) Theoretische und praktische Einführung in den Einsatz von digitalen Medien in chemischen Experimenten
- (2) Praktische Erprobung des Einsatzes von digitalen Medien in chemischen Experimenten in Microteachingsituationen
- (3) Selbstreflexion des Einsatzes digitaler Medien an den Experimentierstationen des Schülerlabors

Die Phase (1) besteht aus je zwei Seminarsitzungen von 90 Minuten. In der ersten, theoretischen Einführung erhalten die Studierenden einen Einblick in den Mikrokosmos Schülerlabor, einen Überblick über die im Schülerlabor angebotenen Experimente sowie deren fachwissenschaftliche Hintergründe und über die Theorie des Einsatzes digitaler Medien im Unterricht. In der zweiten Seminarsitzung erproben die Studierenden praktisch die Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms sowie den Umgang und den Einsatz der zugeordneten digitalen Medien.

Darauffolgend betreuen die Studierenden in der Phase (2) des Seminars zwei der fünf Experimentierstationen an vier Schülerlabortagen. Da jede Schülerlaborstation an einem Experimentiertag fünfmal durchgeführt wird, betreut jede\*r Seminarteilnehmer\*in insgesamt 20 Microteachingsituationen während der Phase (2). Dabei werden im Verlauf dieser Phase drei ausgewählte Microteachingsituationen – eine zu Beginn, eine in der Mitte und eine am Ende

der Phase (2) – mit Hilfe von zwei Kameras videographiert. Die Videographie umfasst die gesamte Microteachingsituation und wird aus zwei unterschiedlichen Perspektiven aufgezeichnet, um alle Interaktionen zwischen den Lehrenden und den Lernenden abbilden zu können.

In der Phase (3) reflektieren die Studierenden ihren Einsatz der digitalen Medien. Hierzu analysieren die Seminarteilnehmer\*innen ihre videographierten Microteachingsituationen und zeigen so ihren persönlichen Entwicklungsverlauf auf. Dabei fertigen sie im Rahmen dieser Selbstreflexion abschließend eine Seminararbeit an.

Da das Seminar für Lehramtsstudierende mit dem Fach Chemie aller Schularten ab dem 4. Fachsemester bis zum Ende des Studiums angeboten wird, ist das Vorwissen der Seminarteilnehmer\*innen sehr heterogen und muss in der Seminarkonzeption berücksichtigt werden. Der schematische Ablauf des Seminars ist in Abbildung 13 dargestellt.



Abb. 13: Schematische Darstellung des Seminarverlaufs (eigene Darstellung).

#### 4.5 Vermittlung digitaler Kompetenzen an den Experimentierstationen

Wie bereits in Kapitel 3.3 dargestellt, kommen an den fünf Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms unterschiedliche digitale Medien zum Einsatz. Aufgrund dessen werden bei den Seminarteilnehmer\*innen verschiedene digitale Kompetenzen gefördert. Eine Übersicht der intendierten Kompetenzen an den Experimentierstationen ist in Tabelle 3 zu finden. Die digitalen Kompetenzen wurden dabei nach dem DiKoLAN-Modell [32] (vgl. Kapitel 2.4) kategorisiert und die Tabelle 2 entsprechend erweitert.

In Tabelle 3 werden für den Einsatz der digitalen Medien an den Experimentierstationen jeweils ein oder mehrere Kompetenzschlüssel angegeben. Die dazu ausformulierten Kompetenzen können mit Hilfe des Kompetenzschlüssels aus dem Artikel von BECKER ET AL. [32] entnommen werden. Die Kompetenzschlüssel setzen sich wie folgt zusammen [32]:

- In der Zuordnung der ausformulierten Kompetenzen wird als erstes einer der sieben Kompetenzbereiche *Dokumentation (DO)*, *Präsentation (P)*, *Kommunikation und Kollaboration (KK)*, *Recherche und Bewertung (RB)*, *Messwert- und Datenerfassung (MD)*, *Datenverarbeitung (DV)* oder *Simulation und Modellierung (SM)* des DiKoLAN-Modells genannt.
- Als zweites wird der Schwerpunkt der ausformulierten Kompetenz genannt. Die vier Schwerpunkte im DiKoLAN-Modell sind *Unterricht (U)*, *Methodik und Digitalität (M)*, *Fachwissenschaftlicher Kontext (F)* sowie *Spezielle Technik (T)*.
- Als letztes werden das Kompetenzniveau sowie die Nummer der Kompetenz genannt. Die Kompetenzniveaus sind *Nennen (N)*, *Beschreiben (B)* und *Anwenden/Durchführen (D)*. Eine Nummer ist notwendig, da es oft mehrere ausformulierte Kompetenzen gibt, die in Kompetenzbereich, Schwerpunkt und Kompetenzniveau übereinstimmen.

Tabelle 3: Übersicht der Experimentierstationen und die dabei geförderten digitalen Kompetenzen nach DiKoLAN.

<b>Nr.</b>	<b>Stationsname</b>	<b>Schwerpunkt &amp; Inhalt</b>	<b>Digitales Medium</b>	<b>Kompetenzschlüssel nach DiKoLAN</b>
1	Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor	Nanotechnologie Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor	Augmented Reality, Animation	P.T.N1 P.T.B1 P.U.A1
2	Zukunftstechnologie 3D-Druck	Methoden & Verfahren Erstellung und Druck eines dreidimensionalen Molekülmodells	CAD-Software, 3D-Drucker	SM.U.B1 SM.M.N1 DV.T.A2
3	Energie in der Chemie	Methoden & Verfahren Visualisierung von Energieumsätzen in physikalischen und chemischen Vorgängen	Infrarotkamera	DV.U.A1
4	„Grüne“ Wunderkerzen	Methoden & Verfahren Entwicklung einer funktionierenden Wunderkerzenmischung mit Hilfe einer Simulation Pyrotechnik Herstellung einer ökologisch und toxikologisch unbedenklicheren Wunderkerze	Simulation	SM.T.A1
5	Nanowelten	Methoden & Verfahren Vermessung der Oberfläche eines menschlichen Haares und Darstellung mittels Falschfarbenbild	Rasterkraftmikroskop, Animation	MD.U.A1

## 5 Publikationsbasierte Umsetzung der Zielsetzung dieser Arbeit

In diesem Kapitel werden die Inhalte von sieben Publikationen vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind bzw. noch entstehen, und so die publikationsbasierte Umsetzung der Arbeit darstellen. In den ersten fünf Publikationen wird ein Überblick über die selbst entwickelten Experimentierstationen und deren fachdidaktische sowie fachchemische Hintergründe vermittelt, während in der sechsten Publikation die Konzeption des Schülerlaborprogramms und des Seminars für die Lehramtsstudierenden beschrieben wird. In Publikation sieben wird dargestellt, welchen Einfluss das Lehr-Lern-Labor-Setting auf die digitalen Kompetenzen der Seminarteilnehmenden nimmt.

Die Publikationen eins und zwei zeigen eine Unterrichtseinheit zur Erstellung eines Molekülbaukastens auf, die in verkürzter Version eine Experimentierstation des Schülerlaborprogramms darstellt. In der dritten Publikation wird die Zusammenarbeit der Fachchemie und der Chemiedidaktik zur Implementierung aktueller chemischer Fachforschung, in Form von ökologisch und toxikologisch unbedenklicheren Wunderkerzen in unterrichtliche Einheiten, dargestellt. Daran anschließend wird in den Publikationen vier und fünf die Entwicklung dieser Wunderkerzen mit unterschiedlichen Oxidationsmitteln aufgezeigt und die Konzeption der Schülerexperimentierstation dargestellt. In der sechsten Publikation wird die Konzeption des Schülerlaborprogramms sowie das Ziel des Seminars für die Lehramtsstudierenden zur Förderung ihrer digitalen Unterrichtskompetenzen präsentiert. Daran anschließend werden in Publikation sieben die erhobenen Ergebnisse der begleitenden Interventionsstudie aufgezeigt. Diese Publikation befindet sich aktuell noch in der Vorbereitung.

5.1 Publikation 1: Kunststoffe und 3D-Druck – Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaukastens.

Michael A. Martens, Kristina Hock & Stefan Schwarzer

SCHEID, M., HOCK, K. & SCHWARZER, S. (2018). Kunststoffe und 3D-Druck – Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaukastens. *Naturwissenschaften im Unterricht: Chemie*, 29(164), 20–26.

#### **Beiträge der Autoren:**

Die Zulassungsarbeit von Michael A. Martens, welche er unter Anleitung von Kristina Hock angefertigt hat, bildet die Vorarbeit dieses Artikels. Darauf aufbauend konzipierte Michael A. Martens im Rahmen seiner Promotion unter Anleitung von Stefan Schwarzer eine Schülerexperimentierstation zu diesem Themenbereich sowie ein Experiment zur Bestimmung der Filamentschmelztemperaturbereiche. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens und Stefan Schwarzer verfasst.

#### **Copyright:**

Michael Scheid, Kristina Hock und Stefan Schwarzer: Kunststoffe und 3D-Druck in: Unterricht Chemie Nr. 164: Strukturen nach Maß

© 2018 Friedrich Verlag GmbH, Hannover

Michael Scheid, Kristina Hock und Stefan Schwarzer

# Kunststoffe und 3D-Druck

## Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaukastens

**KLASSENSTUFE:** Sek. II (11–13)

**THEMA:** Strukturen und Eigenschaften von Polymeren

**METHODE:** CAD-Software, Modell, Experimente, Projektunterricht

**KOMPETENZEN:** Erkenntnisgewinnung, Kommunikation

Beim 3D-Druck werden dreidimensionale Gegenstände erzeugt, indem ein Material Schicht für Schicht aufgetragen wird. Ein häufig verwendetes Material sind Kunststoffe. In diesem Beitrag wird eine Anwendung des mittlerweile günstigen und vielfach verfügbaren 3D-Druckverfahrens für den Chemieunterricht vorgestellt. Die Schülerinnen und Schüler entwickeln beispielsweise im Projektunterricht, welcher auch in Form eines Wahlpflichtkurses oder Projektseminars in der Oberstufe durchgeführt werden kann, Atommodelle für einen Molekülbaukasten. Diese werden direkt in der Schule oder an vielerorts nutzbaren FabLabs ausgedruckt. Bis zur Fertigstellung des Produkts durchlaufen die Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen einen vollständigen Entwicklungs- und Produktionsprozess, von der Modellerstellung, der

Konstruktion der benötigten Teile mit einem CAD-Programm (**Computer-Aided Design**, zu Deutsch: Rechnerunterstütztes Konstruieren) bis hin zum Druck einfacher und komplizierter Modelle (**Abb. 1**). Der fertige Molekülbaukasten orientiert sich an den Ideen der Schülerinnen und Schüler, wie beispielsweise an ihren Designvorstellungen bezüglich Farbgestaltung und Steckverbindungen (**Abb. 2**). Ein praktischer Vorteil gegenüber gekauften Molekülbaukästen ist, dass verloren gegangene „Atome“ bei Bedarf nachproduziert werden können.

Die Druckfilamente werden hinsichtlich ihrer Schmelztemperaturen und anderer Eigenschaften in Schülerexperimenten untersucht, das Druckfilament ABS (**A**crylnitril-**B**utadien-**S**tyrol-Copolymer) wird chemisch analysiert. Auf Grundlage der erhaltenen Daten können die Schülerinnen und Schüler das für ihre Anforderungen geeignete Filament auswählen und wichtige Druckparameter, wie die Drucktemperatur, bestimmen. Bei der Bearbeitung vieler Teilbereiche der im Folgenden vorgestellten Unterrichtseinheit wird chemisches Vorwissen zu Polymeren, zum VSEPR-Modell und zur kovalenten Bindung vorausgesetzt.

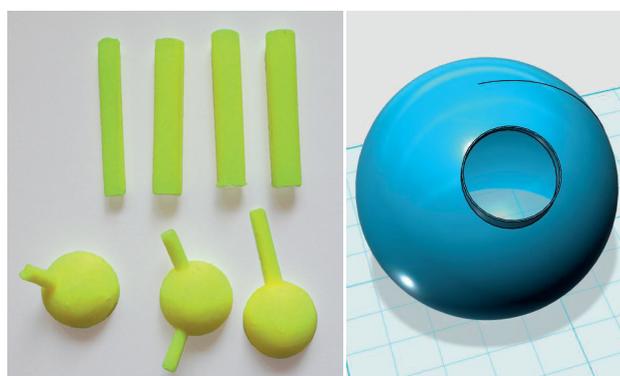
### 3D-Druck und (Chemie-) Unterricht

Vor 58 Jahren hatte der britische Physiker und Science-Fiction-Autor Arthur Clarke die Idee [1], dreidimensionale Gegenstände zu drucken. Damals klang dies noch nach Science-Fiction, seit gut 25 Jahren ist es nun Realität. Relevant für den Schulunterricht ist die Technologie der 3D-Drucker seit ein paar Jahren, da diese in der Entwicklung fortgeschritten und mittlerweile finanziell erschwinglich ist, so dass der Einsatz lohnenswert erscheint. Einsteigermodelle werden von Elektronikfachgeschäften ab 300 € angeboten [2], bessere Modelle für eine weiterführende Verwendung, wie die 3D-Drucker der Ultimaker-Baureihe (**Abb. 3**), die für die im Folgenden vorgestellte Projektarbeit verwendet wurden, gibt es ab 1.500 € zu kaufen [3]. Die Einstiegsmodelle reichen aber für das hier vorgestellte Projekt in ihrer Druckgenauigkeit aus. Des Weiteren bieten Forscherlabore wie das FabLab (kurz für Fabrikationslabor) in München oder andernorts gegen einen kleinen Unkostenbeitrag die Möglichkeit der Nutzung von 3D-Druckern sowie Einsteiger- und Fortgeschrittenenkurse an [4].

**1** | Selbst entwickelte und mittels 3D-Druck erzeugte Modelldarstellung von Brommethan



**2** | Prototypen selbst entwickelter, alternativer Steckverbindungen, z. B. gedrucktes Verbindungsstück anstatt eines Silikonschlauchstücks (l.), CAD-Entwurf (re)



© Fotos: LMU München

Bis jetzt gibt es wenige deutschsprachige Veröffentlichungen zum Thema 3D-Druck im Chemieunterricht, die die Erstellung von Anschauungsmodellen beschreiben [5]. Im Physik- und Mathematikunterricht ist die Nutzung von 3D-Druckern bei der Darstellung von Wellenmodellen oder geometrischen Objekten, denkbar [7, 8]. Selten werden die 3D-Drucker in Schülerräume gegeben und damit als Chance im Projektunterricht genutzt [6]. Die hier beschriebene Verwendung stellt daher ein Novum dar, insbesondere weil ein Einblick in einen kompletten Entwicklungs- und Produktionsprozess gegeben werden kann.

### Stoffeigenschaften nach Maß

Der 3D-Druck ist ein additives Fertigungsverfahren. Im Folgenden soll nur die für den Schulunterricht relevante „Fused Depositing Modelling“-Technik erklärt werden, da dies die aktuell einzig erschwingliche 3D-Drucker-Technologie ist. Sie basiert auf dem Drucken eines erwärmten Thermoplasten mittels Druckkopf, dem sogenannten Extruder. Dabei wird das Filament auf seine spezifische Schmelztemperatur gebracht und durch den Druckkopf schichtweise aufgetragen, wobei das Filament nach dem Drucken sofort wieder erstarrt (Abb. 4). Mit jeder Schicht wächst das gedruckte Modell auf der meist beweglichen Konstruktionsplattform. Der bereits erwähnte und abgebildete Ultimaker 3D-Drucker ist einer der bekannteren Drucker, der mit dieser Technik arbeitet. Weitere Hersteller von 3D-Druckern mit der FDM Technologie sind Renkforce, Dremel und CoLiDo. Aufgrund einer Vielzahl an möglichen Filamenten können die Eigenschaften des Produkts an die jeweiligen Ansprüche angepasst werden. Die drei am häufigsten eingesetzten Filamente sind Polylactide (PLA) und Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) sowie Polyvinylalkohol (PVA), als Supportmaterial für Stützkonstruktionen (s. auch Kasten 1). Im Folgenden werden zwei Schülerversuche zu Filamenten vorgestellt.



3 | Für die Erstellung des Molekülbaukastens verwendeter 3D-Drucker der Baureihe Ultimaker 3

Im ersten Experiment sollen die Schmelzbereiche der drei Filamente PLA, ABS und PVA bestimmt werden. Im zweiten Experiment wird ABS analysiert und in seine chemischen Bestandteile aufgetrennt. Dabei können die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile nachvollzogen werden (s. Kasten 3 und 4).

### Vorgehen im Unterricht

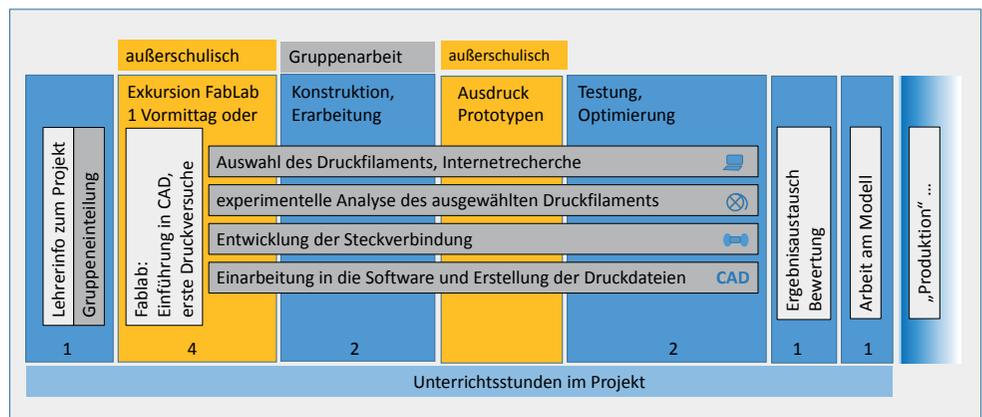
Für die Durchführung der Experimente ist es von Vorteil, wenn die Schülerinnen und Schüler chemisches Vorwissen zu Polymeren besitzen. Beispielweise umfasst der bayerische Lehrplan im Bereich „Struktur und Eigenschaften von Kunststoffen“ zehn Unterrichtsstunden, in welchen auch explizit die „Struktur[en] und Eigenschaften von Thermoplasten,



4 | Bei genauerer Betrachtung sind die einzelnen Druckschichten der optisch vergrößerten Halbkugel deutlich zu erkennen

Duroplasten und Elastomeren“ angeführt werden [12]. Eine entsprechende Unterrichtseinheit kann sowohl im regulären Chemieunterricht als auch im Rahmen eines eigenen Projektseminars durchgeführt werden. Je nach zur Verfügung stehender Zeit werden dabei mehrere Themengebiete von den Schülerinnen und Schülern selbst erarbeitet. Die Kernaufgaben, welche für die erfolgreiche Erstellung eines Molekülbaukastens notwendig sind, werden im Folgenden aufgelistet, sollten von je einer Schülergruppe bearbeitet werden und sind in der Regel in sechs Unterrichtsstunden durchführbar (Abb. 5).

- **Auswahl des Druckfilaments mittels Internetrecherche:** Die Schülerinnen und Schüler erstellen mittels Internetrecherche zunächst eine Liste der möglichen Druckfilamente, wobei Vor- und Nachteile aufgeführt werden. In Absprache mit der Gruppe der Steckverbindungsentwicklung und der Gruppe für das Design soll dann gemeinsam eine Entscheidung für ein Druckfilament, aufgrund der spezifischen Anforderungen des



5 | Vorschlag zum Projektverlauf und zur Gruppeneinteilung

© Fotos: LMU München

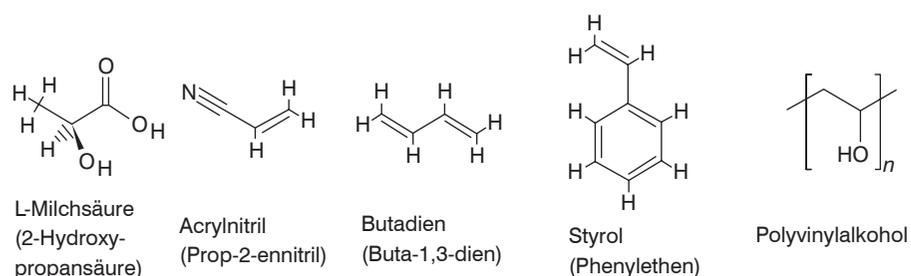
## Filamente im 3D-Druck

**PLA.** Polylactide Kunststoffe, umgangssprachlich auch bekannt als Polymilchsäuren oder als PLA (engl.: „*polylactic acid*“), sind aus miteinander verknüpften Milchsäuremolekülen aufgebaut (s. Strukturformel unten) und gehören chemisch gesehen zur Gruppe der Polyester [9]. PLA wird aus nachwachsenden Rohstoffen wie beispielsweise Mais oder Zuckerrohr hergestellt, hat einen Schmelzbereich von 160 °C bis 190 °C und eignet sich besonders für Einsteiger des 3D-Drucks als Filament, da es beim Druck formstabil ist [9]. Dieser Kunststoff ist lebensmittelecht und wird vor allem für Verpackungsmaterial wie Folien, Becher oder dünne Plastikschalen verwendet.

**ABS.** Acrylnitril-Butadien-Styrol wurde 1946 in den USA entwickelt und ist heute einer der zehn industriell wichtigsten Kunststoffe weltweit [10]. Da es aus den drei unten mit ihrer Strukturformel gezeigten Monomeren Acrylnitril, Butadien und Styrol besteht, ist es ein sogenanntes Terpolymer. ABS gehört zur Klasse der Thermoplaste und eignet sich aufgrund seiner Schmelztemperatur von 235 °C [11] als Filament für 3D-Drucker mit Extrudertechnik. ABS kann durch die Beimengung von Farbstoffen in jeder gewünschten Farbe hergestellt werden. Der Kunststoff besitzt eine hohe Härte, eine gute Chemikalienbeständigkeit sowie eine hohe Kratzfestigkeit, ist lebensmittelecht und mit anderen Kunststoffen kompatibel [10]. Er wird unter anderem für die bekannten LEGO®-Steine verwendet. ABS wird durch das Blenden, das heißt durch das Vermischen der beiden Kunststoffe Styrol-Acrylnitril, kurz SAN, und Acrylnitril-Butadien-Kautschuk hergestellt [10].

**PVA.** Polyvinylalkohol (s. Strukturformel unten) ist ein Thermoplast, welcher durch die Hydrolyse von Polyvinylacetat hergestellt wird. Aufgrund seiner Eigenschaft, sich in Wasser aufzulösen, ist dieser Kunststoff hervorragend für das Drucken von Stützkonstruktionen bei Überhängen geeignet, während er gleichzeitig wegen seiner Wasserlöslichkeit als Druckfilament zur späteren, dauerhaften Verwendung ungeeignet ist. Um Stützkonstruktionen drucken zu können, werden 3D-Drucker mit Dualextruder benötigt, sodass das PVA und das eigentliche Druckfilament parallel gedruckt werden können.

**PLA und ABS im Vergleich.** PLA ist wegen seiner besseren Druckbarkeit für Einsteiger des 3D-Drucks vorzuziehen. Die bessere Druckbarkeit kommt vor allem daher, dass PLA sich beim Abkühlen nicht verzieht. Eine entsprechende Neigung eines Bauteils zum Aufwölben oder Verziehen wird Warp-Effekt genannt und tritt bei ABS häufig auf, sofern das gedruckte Produkt nicht langsam und kontrolliert mit Hilfe einer beheizbaren Druckplatte abgekühlt wird [9]. Da PLA härter und spröder als ABS ist, eignet sich ABS besser zur Konstruktion von Steckverbindungen, welche immer wieder gelöst und erneut zusammengesteckt werden.



Molekülbaukastens, gefällt werden (**Kasten 1**).

- **Analyse der Druckfilamente:** Die Teilnehmenden dieser Gruppe bestimmen die Schmelzbereichsbereiche der drei Filamente ABS, PLA und PVA (**Kasten 3** und **Arbeitsblatt 1**). Das Wissen über die Schmelzbereichsbereiche ist für das spätere Drucken wichtig, da die Drucktemperatur des Extruders vorab festgelegt werden muss. Das ausgewählte Druckfilament wird

analysiert (**Kasten 4** und **Arbeitsblatt 2**). Dabei liegt der Fokus auf dem Zusammenhang zwischen chemischen Verbindungen und deren Eigenschaften im Druckfilament.

- **Entwicklung der Steckverbindung:** Diese Arbeitsgruppe entwickelt eine Steckverbindung, die viele Male das Zusammenstecken und wieder Auseinandernehmen von „Atom“ und „Elektronenpaar“ überdauern vermag. Als Anregung werden zwei Molekülbaukästen

mit unterschiedlichen Steckverbindungen sowie ein passender Materialfundus zur Hand gegeben (**Kasten 2**).

- **Einarbeitung in die CAD-Software und Erstellung der Druckdateien:** Diese Gruppe befasst sich mit dem CAD-Programm, um die Atommodelle und die Modelle der bindenden Elektronenpaare schnell als druckfähige Datei am Rechner konstruieren zu können. Die Gruppe wird eng mit der Gruppe der Steckverbindungsentwicklung und der Gruppe des Atomdesigns zusammenarbeiten.
- **Design der Atommodelle:** Die Schülerinnen und Schüler wählen die Elemente aus, die im späteren Molekülbaukasten als Atommodelle dargestellt werden, und ordnen ihnen Farben zu. Zudem müssen sie Anzahl und Anordnung der Bindungsmöglichkeiten der jeweiligen Atommodelle der Elemente erarbeiten.

## Unterrichtliche Erprobung

Das Projekt lässt sich gut in den regulären Unterricht beim Themengebiet Kunststoffe integrieren. Ein Bezug zu vielen Lehrplaninhalten kann, unter Verwendung der 3D-Druck-Technologie, auch mit Fächerübergreifen zur Informatik hergestellt werden. Bei der vorgestellten Unterrichtseinheit können die Schülerinnen und Schüler ihr theoretisch und experimentell erarbeitetes Wissen zu Polymeren anwenden. Das Projekt wurde mit einer elften Klasse eines Dachauer Gymnasiums erprobt, wobei deutlich wurde, dass die Durchführung in sechs Unterrichtsstunden möglich ist, es aber empfehlenswert sein kann, ein zeitlich umfangreiches Projektseminar bzw. einen Wahlpflichtkurs anzubieten. Folgend sind drei Schülerzitate aus dieser Erprobung angeführt:

„Gefallen hat mir das viele eigenständige Arbeiten und die Versuche zum Aufspalten des Kunststoffes.“

„Nicht gefallen haben mir die teilweise knappe Zeit und die mangelnde Kommunikation der Gruppen untereinander.“

## Erstellung einer Steckverbindung

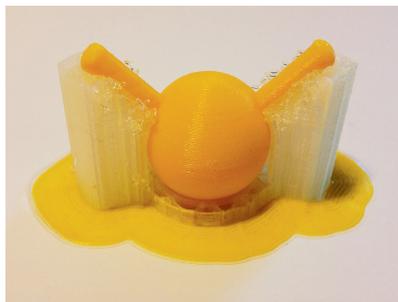
Ein wichtiger Schritt bei der Erstellung eines Molekülbaukastens ist die Entwicklung einer geeigneten Steckverbindung. Als Eigenschaft muss sie sich wiederholt zusammenstecken und lösen lassen sowie eine gewisse Flexibilität aufweisen. Die vorgestellte Bindung ist sicherlich nur eine von mehreren möglichen Lösungen und es ist durchaus denkbar, dass bei der Durchführung des Projekts völlig andere Varianten entwickelt werden.

Für die Steckverbindung erhalten die Atomdarstellungen Zylinder mit einer Abrundung, auf welche die „bindenden Elektronenpaare“ in Form eines Schlauches aufgesteckt werden. Für diese „bindenden Elektronenpaare“ werden Silikonschläuche mit 4 Millimeter Innendurchmesser und 6 Millimeter Außendurchmesser benötigt, welche es im Aquaristikfachhandel als Meterware zu kaufen gibt [13]. Als günstigster Durchmesser hat sich nach einigen Testdrucken ein Zylinderdurchmesser von 4,05 Millimetern erwiesen.

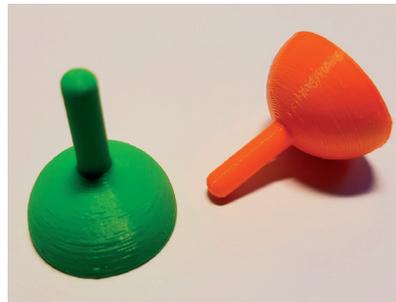
Durch Silikonschlauchstücke verschiedener Längen können unterschiedliche Bindungslängen dargestellt werden. Als „Atomdurchmesser“ scheinen 15–20 Millimeter gut geeignet.

Der Ausdruck der Atommodelle kann auf zwei Arten geschehen. Zum einen können die „Atome“ als Ganzes mit Hilfe von Stützkonstruktionen erfolgen (Abb. 6). Hierbei entsteht eine nahezu perfekte Kugelform und auch die Verbindungszylinder können mit Überhängen gedruckt werden. Steht kein 3D-Drucker mit Dualextruder zur Verfügung, müssen die „Atome“ in zwei Hälften gedruckt werden (Abb. 7), da nur Überhänge von maximal etwa 60° gedruckt werden können. Die Schnittfläche durch die Mittel der Kugel dient als Grundfläche für den Ausdruck, die Hälften werden nach dem Druck mit einem Kunststoffkleber zusammengeklebt. Beide Varianten des Drucks sind nebenstehend abgebildet.

Für die Erstellung der Druckdateien ist das kostenlose 3D-Programm 123D-Design gut geeignet [14]. Dieses Programm ist nur in englischsprachiger Version zugänglich und muss auf den Rechnern installiert werden, dafür erlaubt es aber das genaue Einstellen von Winkeln, was bei vielen anderen 3D-Programmen nur über grobe Schätzungen realisiert werden kann.



6 | „Schwefelatom“ aus PLA mit Stützkonstruktionen aus PVA



7 | Zwei „Atomhälften“ mit Verbindungszapfen

„Das gemeinsame Arbeiten mit meinem Chemiekurs war eine interessante und gelungene Ablenkung zum normalen Unterricht.“

Die Anschaffung eines 3D-Druckers erscheint als eine lohnende Investition, zumal entsprechende Drucker an Schulen auch für andere Projekte und Fächer genutzt werden können, z. B. im Fach Kunst.

Wird das Projekt längerfristig angeboten, können weitere Aufgabenbereiche wie beispielsweise die Erarbeitung einer zweckmäßigen Verpackung mittels 3D-Druck für den Molekülbaukasten oder die Erarbeitung einer Vermarktungsstrategie des Baukastens eingebunden werden. Zudem kann der Entwicklungsprozess der Steckverbindung nach dem Ausdrucken von Prototypen mehrmals wiederholt werden, bis ein optimales Ergebnis erreicht ist.

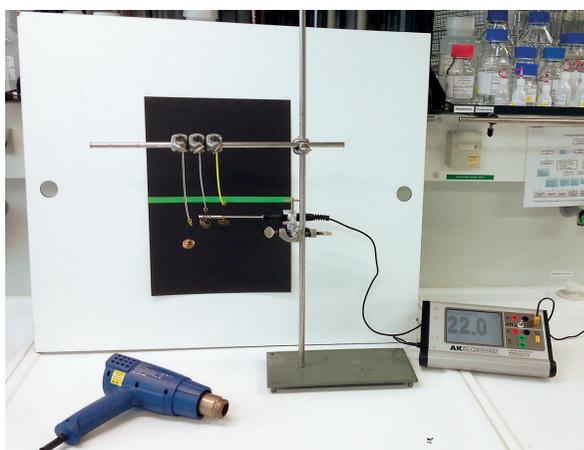
## Literatur

- [1] Arthur C. Clarke Predicts the Internet, 3D Printers and Trained Monkey Servants, [www.openculture.com/2014/06/in-1964-arthur-c-clarke-predicts-the-internet-3d-printers-and-trained-monkey-servants.html](http://www.openculture.com/2014/06/in-1964-arthur-c-clarke-predicts-the-internet-3d-printers-and-trained-monkey-servants.html) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [2] Beispiel 3D-Drucker, [www.conrad.de/de/3d-drucker-o2409001.html](http://www.conrad.de/de/3d-drucker-o2409001.html) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [3] 3D-Drucker Ultimaker 3, [www.conrad.de/de/3d-drucker-ultimaker-f1727490.html](http://www.conrad.de/de/3d-drucker-ultimaker-f1727490.html) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [4] Auflistung Fabrikationslabors (FabLabs) in Deutschland: [fabrikationslabor.de/fablabs-in-deutschland](http://fabrikationslabor.de/fablabs-in-deutschland) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [5] Schilde, U.; Kloeveborn, F.: Molekülmodelle chemischer Verbindungen mittels 3D-Druck. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule* 64(2015) Nr. 5, S. 18–24.
- [6] Lindmeier, A.; Rach, S.: 3D-Druck – Hands and minds on! Von der räumlichen Konstruktion zum gedruckten Modell. *Mathematik lehren* 32(2015) Nr. 190, S. 18–21.
- [7] Heusler, S.: Neue Ausdrucksformen für die Physikdidaktik – Das Potential von 3D-Druckern für den Physikunterricht. *PhyDid B, Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2014*, S. 5.
- [8] Waske, S.: 3D-Drucker – Zukünftig das neue Arbeitsmittel an den Berliner Schulen? „Im Rahmen des WAT-Unterrichts ein dreidimensionales Objekt ausdrucken“. *Forum Arbeitslehre*(2014) Nr.13, S. 20–25.
- [9] FDM-3D-Druck: ABS oder PLA? Was sind die Unterschiede?, <https://3druck.com/lieferanten-haendler/fdm-3d-druck-abs-oder-pla-sind-die-unterschiede-2020380> (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [10] Materialbeschreibung Acrylnitril-Butadien-Styrol., <http://materialarchiv.ch/detail/4> (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [11] Werkstoffdatenblatt ABS., [www.l-kt.de/Werkstoffdatenblaetter/Werkstoffdatenblatt%20ABS.pdf](http://www.l-kt.de/Werkstoffdatenblaetter/Werkstoffdatenblatt%20ABS.pdf) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [12] Bayerischer Lehrplan Gymnasium 11/12 Chemie, [www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/?StoryID=26195](http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/?StoryID=26195) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [13] Silikon Luftschlauch: [www.mein-aquariumladen.de/Aquarium-Belueftung-Silikon-Luftschlauch-Aussen-6-mm-Innen-4-mm](http://www.mein-aquariumladen.de/Aquarium-Belueftung-Silikon-Luftschlauch-Aussen-6-mm-Innen-4-mm) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [14] 3D-Programm 123D-Design: [www.123dapp.com/design](http://www.123dapp.com/design) (letzter Zugriff: 12.12.2017).
- [15] Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS): <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/abs/abs.htm> (letzter Zugriff: 12.12.2017).

## Bestimmung des Filamentschmelzbereichs

Die drei Druckfilamente PVA, PLA und ABS haben unterschiedliche Schmelzbereiche. Diese Tatsache ist für das Drucken essentiell und soll deswegen von den Schülerinnen und Schülern in einem Versuch qualitativ nachvollzogen werden. PVA hat seinen Schmelzbereich bei 200°C, PLA bei 150°C und ABS bei 220°C. Um diesen Unterschied nachzuweisen, werden drei gleich lange Filamentstücke dieser drei Kunststoffe nebeneinander eingespannt und unten mit einem Gewicht von je 20 g beschwert (**Abb. 8**). Danach werden die Filamente gleichmäßig mit einem Heißluftföhn erhitzt. Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn ist zu erkennen, dass die Filamente unterschiedlich elastisch sind. Da ABS die geringste Elastizität

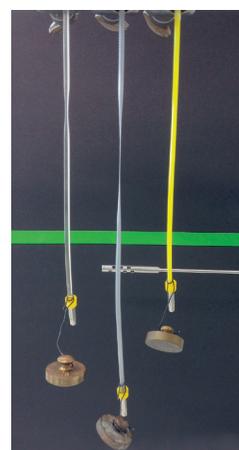
hat, bleibt es am längsten in seiner ursprünglich gebogenen Form, wie es auf der runden Filamentspule aufgewickelt wurde. Bei der Durchführung des Experiments mit einem Heißluftföhn wird PLA als erstes flüssig, wobei der untere Teil mit dem Gewicht von dem oberen eingespannten Ende abfällt (**Abb. 10**). Als nächstes geschieht dies bei dem PVA-Filament und als letztes bei dem ABS-Filament. Bei diesem Versuch können die Schülerinnen und Schüler gut nachvollziehen, weshalb bei der Verwendung unterschiedlicher Filamente verschiedene Druckdüsentemperaturen am 3D-Drucker eingestellt werden müssen.



8 | Versuchsaufbau zur Schmelzbereichsbestimmung



9 | Filamente vor dem Erwärmen.  
Links: PVA; Mitte: PLA; Rechts: ABS



10 | Filamente nach dem Erwärmen

## Analyse von ABS

Die Schülerinnen und Schüler führen mit Hilfe einer Anleitung selbstständig eine Versuchsreihe durch, wobei die gemachten Beobachtungen schrittweise zu der Erkenntnis führen, dass ABS aus mehreren chemischen Verbindungen bestehen muss. Die Versuchsanleitung wurde auf der Grundlage des Arbeitsblattes „Zusammensetzung von ABS“ erstellt [15], mehrmals mit Schülerinnen und Schülern erprobt und angepasst. Die gesamte Versuchsreihe ist auf den zumeist in Schulen verfügbaren Chemikalien- und Laborgerätebestand ausgerichtet. Ausnahmen hiervon sind der Trockenschrank sowie die Zentrifuge. Der Trockenschrank kann durch einen normalen Ofen, welcher auf die in der Versuchsanleitung vorgegebene Temperatur eingestellt wird, ersetzt und als

Ersatz für die Zentrifuge kann eine Handzentrifuge verwendet werden.

ABS wird zunächst in Aceton gelöst und die entstandene Lösung zentrifugiert. Die überstehende Lösung wird abgossen und der Niederschlag auf einem Uhrglas im Trockenschrank getrocknet. Das entstandene Produkt ist Polybutadien (**Abb. 11**) und sorgt im ABS für die Zähigkeit und die elastischen Eigenschaften. Die restliche Lösung wird zu Wasser getropft, wobei ein Niederschlag ausfällt, welcher abfiltriert und ebenfalls im Trockenschrank getrocknet wird. Das entstandene Produkt ist ein Styrol-Acrylnitril-Pfropfcopolymer, welches für die Härte und Festigkeit von ABS sorgt, gleichzeitig aber spröde und kreideartig ist (**Abb. 12**).



11 | Niederschlag 1:  
Polybutadien



12 | Niederschlag 2:  
Styrol-Acrylnitril

## Bestimmung des Filament-Schmelzverhaltens

### Geräte:

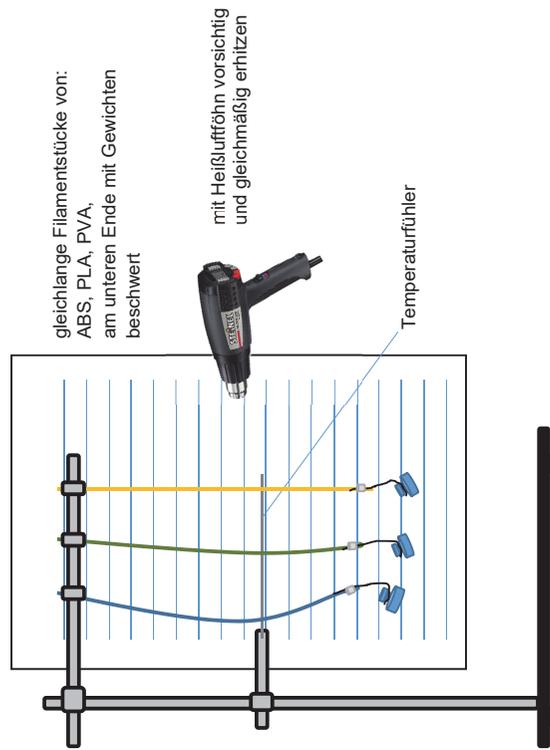
Stativmaterial, kleine Gewichte zum Beschweren (je 20 g), Temperaturmessfühler ( $T > 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) mit Anzeigegerät, Heißluftföhn

### Chemikalien:

Druckfilamente aus verschiedenen Kunststoffen (z.B. Polyvinylalkohol PVA, Polylactid PLA; Acryl-Butadien-Styrol ABS)

### Durchführung:

Von den Filamenten werden gleich lange Stücke (15 cm) abgeschnitten. Diese werden wie in der Abbildung gezeigt, am Stativ befestigt und am unteren Ende mit einem Gewicht (20 g) beschwert. Es hat sich bewährt, diese mit einem kurzen Abschnitt eines Siliconschlauchs am Filament zu befestigen. Danach werden die Filamente mit einem Heißluftföhn gleichmäßig erhitzt.



### Entsorgung:

Die Filamentreste können im Hausmüll entsorgt werden.

## Bestimmung des Filament-Schmelzverhaltens

### Theorie:

Die verwendeten Kunststoffe haben unterschiedliche Erweichungs- und Schmelztemperaturbereiche (Tab.1). Außerdem zeichnen sie sich durch unterschiedliche mechanische und physikalische Eigenschaften aus (Tab.2). Um beim 3D-Druck optimale Ergebnisse zu erzielen, muss dies auch bei der Einstellung der Druckdüsentemperatur beachtet werden. Die Glas- oder Erweichungstemperatur ist diejenige Temperatur, bei der der Kunststoff gerade gummiartig wird und sich zu verformen beginnt. Die Düse des Druckers wird in etwa auf die Schmelztemperatur aufgeheizt. Die genaue Drucktemperatur ist von dem Durchmesser der Düse und der Druckgeschwindigkeit abhängig.

Filament-Eigenschaften	ABS	PLA	PVA
Schmelzindex MVI (im Schnitt) [cm <sup>3</sup> /10 min]	9,7	10,3	k. A.
Glastemperatur	110 – 125	70 – 80	85
Erweichungstemperatur [°C]	210 – 240	160 – 190	180 – 205
Schmelztemperatur [°C]	40 – 80 mm/s	ab 20 mm/s	wie ABS oder PLA

Tab.1: Glas- und Schmelztemperaturen der untersuchten Filamente

Eigenschaften	ABS	PLA
Bruchfestigkeit [MPa]	~ 70	~ 60
Elastizität E-Modul [MPa]	~ 2300	~ 3500
Kerbschlagzähigkeit (IZOD) [kJ/m <sup>2</sup> ]	5 – 50	2 – 40
Witterungsbeständigkeit	gut	mäßig
Toxizität	reizend	nicht reizend
UV-Beständigkeit	mittel	hoch
Oberflächenhärte	mittel	hoch
Schwellwert (Strangaufweitung)	groß	mittel
Warp-Effekt	brennbar	gering
Flammbarkeit	brennbar	nicht brennbar
Nachbehandlungs-Möglichkeiten (bohren, fräsen, veredeln etc.)	gut	mittel
Reibungswiderstand	gering	mittel

Tab.2: Mechanische und physikalische Eigenschaften von ABS und PLA

## Analyse eines Kunststoff-Filaments für den 3D-Druck

Für die Darstellung der „Atome“ im Molekülbaukasten wird ein Filament benötigt, welches sich für den 3D-Druck eignet und gleichzeitig gute Steckverbindungen ermöglicht. Anhand einer Internetrecherche wird ein Kunststofffilament ausgesucht.

Die chemische Beschaffenheit der Kunststoffe soll in den folgenden Versuchen genauer ermittelt werden.

Lesen Sie vor der Versuchsdurchführung die gesamte Versuchsanleitung aufmerksam durch. Sollten Sie unsicher sein oder Fragen haben, wenden Sie sich an Ihren Lehrer oder Betreuer! Notieren Sie alle Versuche und Ihre Beobachtungen!

**Arbeiten Sie sorgfältig und denken Sie daran, dass Aceton leicht entzündlich ist. Tragen Sie während der gesamten Versuchsdurchführung Kittel und Schutzbrille!**

### Benötigte Chemikalien:

0,8 g der zu analysierenden Filament-Probe, destilliertes Wasser, Aceton, technisch  Ethylacetat .

### Benötigte Geräte:

Magnetrührgerät mit Rührfisch, 1 Glas mit Schraubdeckel ca. 150 mL, 1 Messzylinder 100 mL, 1 Erlenmeyerkolben 200 mL, 1 Glasrichter groß und 1 Glasrichter klein, 2-4 Zentrifugengläser (insgesamt 50 mL), 1 Filterpapier (d = 185 mm), PE-Folie (Frischhaltefolie), 1 Spatel, 2 Glaspipetten mit Hütchen, 2 Uhrgläser, Küchenkrepp oder Zellstoff

### Vorlests:

Testen Sie in einem mit Lösemittel gefüllten Schnappdeckelglas, ob die Proben löslich sind. Geben Sie dazu 1–2 mL Lösemittel in das Schnappdeckelglas und fügen Sie ein 2 cm langes Stück des Filaments hinzu. Verschließen Sie das Schnappdeckelglas und schütteln Sie gelegentlich um. Beobachten Sie Farbveränderungen und Löseverhalten.

### Vorprobe 1: Löslichkeit in Wasser nach 15 Minuten

Überstand Filament löst sich in Wasser  
Filament löst sich in Wasser nicht

→ PVA (Polyvinylalkohol)  
→ weiter mit Vorprobe 2

### Vorprobe 2: Löslichkeit in Ethylacetat nach 15 Minuten

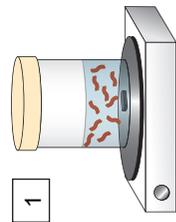
Filament quillt auf, keine Farbveränderung des Lösemittels  
Filament löst sich in Ethylacetat, Überstand farbig  
(nach 3 Stunden hat sich das Filament vollständig gelöst)

→ PLA (Polylactid)  
→ weiter mit Versuch 1

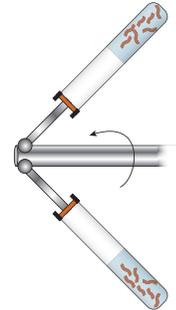
## Versuch 1 (mit Filament aus Vorprobe 2)

### Durchführung:

50 mL Aceton werden mit Hilfe des Messzylinders abgemessen und in das 150-mL-Schraubdeckelglas gegeben. Schneiden Sie die Probe so klein wie möglich und geben Sie sie zum Aceton im Schraubdeckelglas. Rühren Sie die Suspension 15 Minuten lang auf dem Magnetrührer (Rührfischchen nicht vergessen!).



2



### Aufgabe:

Beschreiben Sie das Löseverhalten und die Ergebnisse der Zentrifugation.

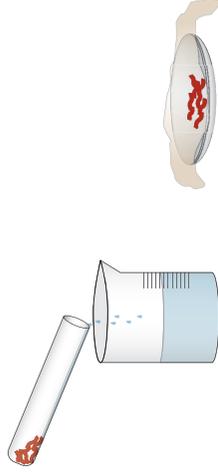
## Analyse eines Kunststoff-Filaments für den 3D-Druck

### Versuch 2 (Produkt 1)

#### Durchführung:

Das Rührfischchen wird mit einer Rührfischhangel entfernt und die in Versuch 1 entstandene Lösung wird gleichmäßig auf die Zentrifugengläser verteilt. Die austarierten Gläser werden symmetrisch in die Zentrifuge gestellt. In Abwesenheit des Betreuers wird die Lösung für etwa 5 Minuten zentrifugiert.

Die überstehende Lösung wird in ein 100 mL Becherglas abgegossen und zur Seite gestellt. Der Bodensatz aus dem Zentrifugenglas wird auf eine PE-Folie, welche auf dem Uhrglas ausgebreitet ist, aufgetragen und für 15 Minuten bei 70 °C im Trockenschrank getrocknet.



### Aufgabe:

Untersuchen Sie den Rückstand durch Betrachten und Fühlen! Vergleichen Sie Konsistenz und die Menge des entstandenen Stoffes mit der ursprünglichen Probe.

### Versuch 3

#### Durchführung:

60 mL destilliertes Wasser werden mit Hilfe des Messzylinders abgemessen und in ein sauberes 100 mL Becherglas gegeben. Unter Rühren (mit Hilfe eines sauberen Rührfischchens und dem Magnetrührer) wird etwa die Hälfte des in Versuch 2 gewonnenen Überstandes mit der Pipette langsam zugegeben (Produkt 2).

### Aufgabe:

Beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.

### Versuch 4 (Produkt 2)

#### Durchführung:

Die in Versuch 3 entstandenen Flocken werden nun mithilfe von Faltenfilter und Glasrichter filtriert (dauert etwa 10 Minuten). Dazu wird der Glasrichter in den 200 mL Erlenmeyerkolben gestellt und der Faltenfilter in den Glasrichter gelegt. Die zu filtrierende Suspension wird dann portionsweise zugegeben.

Die im Faltenfilter zurückgehaltene Masse wird auf ein Uhrglas gegeben und im Trockenschrank bei 70 °C für 15 Minuten getrocknet.

Ein Stück PE-Folie wird auf ein Uhrglas gelegt und 3–4 mL des Filtrats darauf getropft. Die Probe wird ebenfalls im Trockenschrank getrocknet.

### Aufgabe:

Untersuchen Sie die getrocknete Masse und das eingetrocknete Filtrat auf seine Konsistenz.

### Entsorgung:

Die Filtrate werden in den Abfallbehälter für organische Lösemittel gegeben, die Rückstände und getrockneten Proben im Hausmüll entsorgt.

## 5.2 Publikation 2: 3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions – Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments.

Michael A. Martens, Kristina Hock & Stefan Schwarzer

SCHEID, M., HOCK, K. & SCHWARZER, S. (2019). 3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions – Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments. *World Journal of Chemical Education*, 7(2), 72–83.

### **Beiträge der Autoren:**

Die Zulassungsarbeit von Michael A. Martens, welche er unter Anleitung von Kristina Hock angefertigt hat, bildet die Vorarbeit dieses Artikels. Darauf aufbauend konzipierte Michael A. Martens im Rahmen seiner Promotion unter Anleitung von Stefan Schwarzer eine Schülerexperimentierstation zu diesem Themenbereich sowie ein Experiment zur Bestimmung der Filamentschmelztemperaturbereiche. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens verfasst.

### **Copyright:**

Published with license by Science and Education Publishing, Copyright © 2019 Michael Scheid, Kristina Hock and Stefan Schwarzer. No changes were made to the article.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

# 3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions - Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments

Michael Scheid, Kristina Hock, Stefan Schwarzer\*

Ludwig-Maximilians-Universität München, Department of Chemistry, Chemistry Education, Munich, Germany

\*Corresponding author: [stefan.schwarzer@lmu.de](mailto:stefan.schwarzer@lmu.de)

Received January 12, 2019; Revised February 24, 2019; Accepted March 16, 2019

**Abstract** In the last few years high quality 3D printing has become quite inexpensive. Therefore, a look at its possible applications in school chemistry teaching seems worthwhile. This article deals with a project to engage upper school students in the development and production of their own molecular model set using a computer-aided design (CAD) program and a 3D printer. The presented teaching unit can be integrated into regular chemistry classes with six to eight lessons or can be offered as an elective lesson course. Part of this teaching unit is the investigation of different 3D print filaments to elaborate their chemical structure-properties-relations. The filaments are characterized by their melting behavior and by further chemical analysis.

**Keywords:** 3D printing, molecular model set, project work, CAD software, structure-properties-relations

**Cite This Article:** Michael Scheid, Kristina Hock, and Stefan Schwarzer, "3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions - Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments." *World Journal of Chemical Education*, vol. 7, no. 2 (2019): 72-83. doi: 10.12691/wjce-7-2-6.

## 1. Introduction

Fifty-eight years ago the physician and science fiction writer Arthur Clarke hit on the idea [1] of printing items in three dimensions. Back then, the idea sounded like science fiction but has been reality for over twenty-five years. Since 2018, even the guardsmen of the Swiss Guard have been wearing helmets made by 3D printing: The so-called Morion (Figure 1) is made of polyvinyl chloride (PVA) and weighs only 570 grams [2].



Figure 1. Morion made by 3D printing © KNA

Since the development of 3D printing is now advanced and affordable, the use in school education has become more attractive. By now, beginners' models of 3D printers are offered by electronics retailers starting from 300 € [3]. Higher-quality models for further use, like the 3D printer of the Ultimaker series (Figure 2), which was used for the described project in this article, are sold starting from 1.500 € [4]. The printing accuracy of the beginners' models is sufficient for the kind of project presented here.



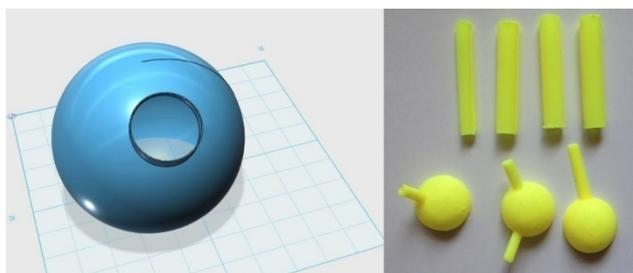
Figure 2. 3D printer of the Ultimaker<sup>3</sup> series used for the construction of the molecular model set

The aim of the project is to engage upper school students in the fabrication of their own molecular model set. Until the 3D printed product is completed (Figure 3) the students undergo the entire process from developing to 3D printing, using a computer-aided design (CAD) program (see also Figure 11). The whole process is under supervision of the students, reflecting their favored ideas regarding color design and plug connection (Figure 4). A convenient advantage in comparison to purchased molecular model sets is that lost "atoms" can be reproduced, if necessary.

The components for the model are printed either directly in school or in the FabLabs (short form for "fabrication laboratory") which are available in many places. FabLabs offer, for a contribution toward costs, the possibility to use 3D printers as well as courses on printing for beginners and non-beginners. These labs are located in all major cities worldwide [5].



**Figure 3.** Student-developed, 3D printer-generated model of bromomethane



**Figure 4.** CAD-Design (left), prototypes of self-developed models of "atoms" and "binding electron pairs" (right)

During the project, the printing filaments are examined in student experiments regarding their melting behavior. In addition, the printing filament ABS (copolymer of acrylonitrile-butadiene-styrene) is chemically analyzed. Based on the findings important printing parameters such as printing temperature can be set for the printing process. Students' prior knowledge on polymers, the valence shell electron pair repulsion model (VSEPR-Model) and of covalent bonding is required for the presented teaching unit, see paragraph 3.

Until now, 3D printing in chemistry classes has been used by teachers to print larger models of molecules (proteins, DNA, the layered structure of graphite), orbitals or potential energy surfaces [6,7,8] to provide illustrative material in class. In physics and mathematics school

lessons, it is conceivable to use 3D printing for illustrating models of waves or geometric objects [9,10].

Only in rare cases, students were allowed to use 3D printing on their own responsibility independently. Thus, they seldom receive the chance to use 3D printing for their own projects [8]. The presented project is different and could be motivating for students, because it fosters valuable insights into an entire process of development and production. In an educational environment like school, interdisciplinary projects may arise, where different subjects like art [11] or physics cooperate. Furthermore, models of molecules for teaching or the illustration of measurement results during experiments, such as printed interference images, can be made permanently available for students by 3D printing. Even children with inclusion requirements such as blind or visually impaired benefit from such haptic models.

## 2. Principles of 3D Printing

3D printing objects are generated by applying the filament layer-by-layer (additive manufacturing). The most common, and for school teaching relevant printing technique is the "Fused Depositing Modeling" because it's the only affordable 3D printing technology nowadays. It is based on the printing of a heated thermoplastic applying a print head, the so-called extruder. For that reason, the filament is heated to its specific melting temperature. The print head applies it stepwise on a construction platform that is movable in most cases while the filament sets immediately after printing (Figure 5). A majority of semiprofessional 3D printers are based on this process, which can be explained by the low acquisition and operating costs along with the low maintenance and great flexibility compared to other 3D printing processes. 3D printers can emit fumes and ultrafine particles when printing. To prevent health risks, 3D printers should be used only in fume hoods or well-ventilated rooms.



**Figure 5.** Single printed layers of a 3D printed object

### 2.1. Recent Developments in 3D Printing

Next to the fused deposition modeling (FDM) procedure outlined above other techniques like laser-sintered tools or polymers cured by use of stereo lithography within the

additive-assembly method were developed. Furthermore, the filaments become more and more diverse as to their chemical composition. An amount of metals in the filament causes small batches to become firmer and more conductive. Filaments made of polyvinyl alcohol are water-soluble and can be used as a support structure. The Table 1 provides an insight into different 3D printing materials [7].

It has become common practice to completely create individual hearing aids and dental implants via 3D printing. In addition to artificial replacements, temporarily aids such as orthosis for leg injuries has become cheaper and easier to print. As another aspect, 3D models are used by Physicians for preoperative training. For example, magnetic resonance imaging (MRI) scans or ultrasound images are uploaded to printing services, e.g. BIOMODEX®. The printed model will be received within few days. Bones, ligaments, tendons and cartilage are printed in different colors and flexibilities in order to show the diverse properties in such a model. In this way, preoperative training of surgery skills is possible [12].

Another field of research for 3D printing is the extraction of cartilage, to cultivate and to multiply cells. Following those cells are transferred onto a printed scaffold made of biocompatible filaments. After prolonged cultivation, the cartilage grows over the filament, which undergoes more and more degradation. The cartilage, of an auricle for example, originated this way is then ready to be implanted [13].

Spanish scientists succeeded in reprinting the layers of human skin through 3D printing. They extracted fibroblasts

and keratinocytes from patients. In combination with blood plasma they were able to build various kinds of bio-ink. The outmost skin layer, the epidermis, was printed with the keratinocyte ink on a special substratum. On top of this, a layer of fibroblasts, that were responsible for the support structure, was set. The skin thus produced can then be transplanted. Following this procedure, patients with burns can be helped much faster since printing 100 cm<sup>2</sup> skin replacement only takes 35 minutes, whereas in a conventional way the skin tissue had to be grown in a culture dish for weeks [14].

A worthwhile area of operations seems to be the synthesis of hair follicles. In this field, research aims on the printing of a follicle consisting of 15 different cell types as a viable organ with its surrounding cell layer. If cultivation were successful, the next target would be to transplant these individual hair follicles [15].

Even in the pharmaceutical industry, 3D printing seems to be a promising method: drugs individualized to the patient and the combination of different active substances in one pill are the targets. This is especially advantageous for patients that cannot swallow many pills or children for whom purchased pills are too highly dosed [16].

In the food industry, there are manifold opportunities through 3D printing: chocolates, pasta or creatively designed French fries can be printed in small series [17].

There are even advantages through 3D printing in the building industry. In 2017, a house completely printed of cement was built within 24 hours in additive manufacturing close to Moscow. In this way housing could be provided easily and cheaply [18].

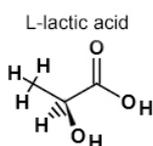
Table 1. Selection of different materials for 3D printing (modified after [7])

Material	Type	Description	Appropriate for use in school
Plastic filament	PLA (Poly lactic acid)	biodegradable	often used, cheap, multiple colors
	ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)	durable, fine structures	laboratory hood for printing is recommendable, warp effect, cheap, multiple colors
	PVA (Polyvinyl alcohol)	water soluble	used for support structure, printers with dual nozzles suggested
	Acrylic Plastic	translucent to clear finish	fine features can be brittle, cannot do models with cavities
Resin	Epoxide resin	UV curable (405 nm)	SLA (stereolithographic) or DLP (Digital Light Processing) printer
Silicon	One or two component silicon	UV curable	DLP -(Digital Light Printer)
Carbone	mixture with different plastic compounds, up to 20% of carbon fiber	extreme light and durable	Steel instead of brass nozzle is recommended, because of higher wearing
Moldlay	Castable Wax	accurate to shape	prototyping, printing of lost mold for jewelry design, easy follow up treatment, molds for cast metal
Metal /plastic	Polyamid with metal dust (Al, Ti or Fe)	Parts for automotive, aviation or medical purpose	printertype: lasersinter, special for vocational school
	metal and precious metal	silver, gold thin structures can be printed	Expensive, selective laser melting
Powder	Gypsum	Calcium sulfate hemihydrate with binding material and colored ink	Art instruction: 3D printing of architecture models
Paper	office paper	Layers of paper are printed with a regular printer, the 3D print nozzle adds glue to the sheet and cuts the shape	Cheap, multiple colors, special ink-printer-3D-Printcombination required

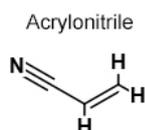
## 2.2. Filaments

Due to the large number of available filaments, the features of the printed product can be easily adjusted to particular demands. The three most commonly used filaments are polylactic acid (PLA), acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) and polyvinyl alcohol (PVA) as material for supporting structures.

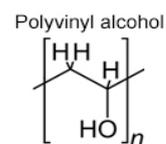
**PLA.** Polylactide synthetics, commonly known as polylactic acid, short PLA, are built of intertwined lactic acid molecules (see structural formula) and chemically belong to the polyester group. PLA is made of renewable resources such as corn or sugar cane, it has a melting temperature between 145 °C and 160 °C [19]. It's suitable as a filament especially for beginners in 3D printing since it keeps its shape during printing. This synthetic is food-safe and used particularly for foils, cartons and thin plastic trays.



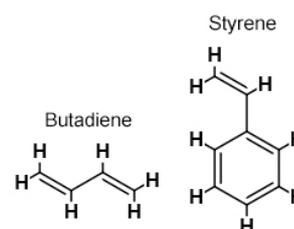
**ABS.** Acrylonitrile-butadiene-styrene was developed in 1946 in the USA and is nowadays one of the most important industrial synthetics worldwide and being used in a large number of applications [20]. Since it consists of the three monomers, mentioned below with their structural formula, acrylonitrile, butadiene and styrene, it is a so-called terpolymer. ABS belongs to thermoplastics and is suitable as a filament in 3D printing with extruder technology due to its melting temperature of 220 - 240°C [21]. ABS can be fabricated in any desired color by adding dyes. The synthetic has a high hardness, a good resistance to chemicals as well as a high scratch resistance; it is food-safe and compatible with other synthetics. Based on these features, this synthetic is widely used in automobiles, electrical and toy industry and is used for the popular LEGO® bricks. ABS can be coated with metals such as chromium, which is used especially in the automotive industry. ABS is produced by blending, which means the mixture of the two synthetics styrene-acrylonitrile, short SAN, and acrylonitrile-butadiene-rubber, or by a graft copolymerization [20]. In the graft copolymerization, monomers of one or more types are attached to the polymer whereby a copolymer with a comb-like structure is built [22].



**PVA.** Polyvinyl alcohol (see structural formula below) is a thermoplastic made by the hydrolysis of polyvinyl acetate. Due to its solubility in water, this synthetic is used to print support structures on overhangs. Because of its hygroscopic properties the filament is unsuitable for permanent use. To print similarly the PVA as well as the actual print filament a 3D dual extruder printer is necessary.



**PLA and ABS compared.** PLA is preferable for beginners in 3D printing because of its better printability. This derives from the fact that PLA does not lose its shape when cooling down. This so called "Warp effect" occurs frequently at ABS filament because of different cooling temperatures of each component and every layer that leads to inner tensions in the printed object. It can be controlled by using a heated sample plate.



Since PLA is harder and more brittle than ABS, ABS lends itself better to build plug connections that can be easily solved and plugged together repeatedly.



**Figure 6.** The Warp effect is clearly recognizable on the bottom side of this object made of ABS

## 2.3. Structure-properties-relations of the Filaments

When performing the experiments described in this article, prior chemical knowledge of polymers is necessary for understanding. For example, some German school curricula contain around ten lessons in the a field of "structure and features of synthetics" in which the "structures and features of thermoplastics, thermosets and elastomers" are explicitly mentioned [23]. The following students' experiments demonstrate these structure and features.

### Student experiment 1: Qualitative determination of filament melting ranges

(See also attached student worksheets)

The three printing filaments PVA, PLA and ABS have different melting temperatures. This fact is important for parameter adjusting of the 3D printer. The melting point of PVA is 200 °C, of PLA 150 °C and ABS 230 °C. To prove this difference, one piece of equal length of each filament are clamped side by side and a weight of 20 g is attached (Figure 7, Figure 8). While the experiment is set

up, students can observe the varying flexibility of the different filaments.

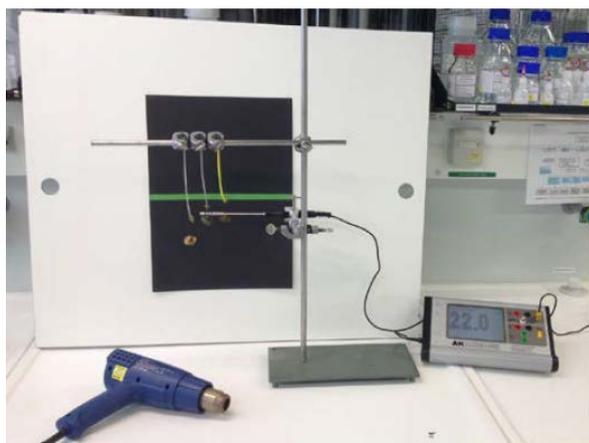


Figure 7. Experimental setup for melting range determination

Now, the filaments are heated evenly with a heat gun. Since ABS has the least flexibility, it stays in its original bent shape as it has been winded on the round filament coil. Applying the heat gun, PLA becomes liquid first (Figure 8). PVA filament becomes liquid second and the ABS filament at last. In this experiment, the students can easily comprehend why various temperatures of the pressure jet at the 3D printer must be set while using different filaments.

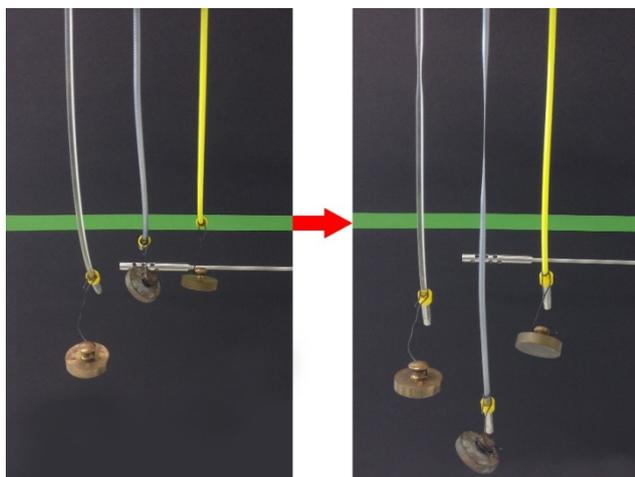


Figure 8. Filaments prior and after heating. Left: PVA; Middle: PLA; Right: ABS

After the melting temperature sequence has been carried in experiment 1 out, the filament ABS will be separated into its chemical components during the following experiment two.

#### Student experiment 2: Analysis of ABS

(See also attached worksheets)

This experiment is carried out in two steps. Based on made observations during this experiment students' can conclude that ABS must consist of several components. The practical work relates to the instruction "composition of ABS" [24], was evaluated with students several times and then optimized during this process. The entire practical work is adapted for the stock of chemicals and laboratory equipment that are mostly available at schools. A used drying cabinet can be substituted with a normal

oven, which is set to the temperature written in the worksheet. As a replacement for an automatic centrifuge a simple manual centrifuge can be used.

Step 1: ABS is dissolved in acetone and the resulting product is centrifuged. The supernatant solution is drained off and stored for the further experiment. The precipitate is dried completely in a drying cabinet. The dried residue of the centrifugation is polybutadiene and exhibits the expected toughness and elastic features of ABS (Figure 9).



Figure 9. Precipitate 1 - Polybutadiene

Step 2: The stored solution is added dropwise into water and the resulting precipitate is filtered of and dried in a drying cabinet as well. The resulting product of the precipitation 2 is a styrene-acrylonitrile graft copolymer, which shows the hardness and firmness of ABS while being brittle and chalky (Figure 10).



Figure 10. Precipitate 2 - Styrene-acrylonitrile

Within the provided worksheet, two core points are emphasized. On the one hand it contains clear instructions that make the students follow step by step the separation process. On the other hand, in order to develop an understanding of what every sub step is for, the students are asked frequently certain questions to find explanations for their observations.

### 3. Teaching Unit

A chemistry teaching unit is described in the following section. The unit can be carried out in regular chemistry lessons as well as a part of a project seminar, e.g. on modern materials. Depending on the available time, more or less topics, e.g. printing of a storage box, can be addressed. Core student tasks, which are essential for successfully creating a molecular model set, are listed in Figure 11. Each task should be elaborated by one of the five student groups. The entire program can be carried out in at least six school lessons (Figure 11):

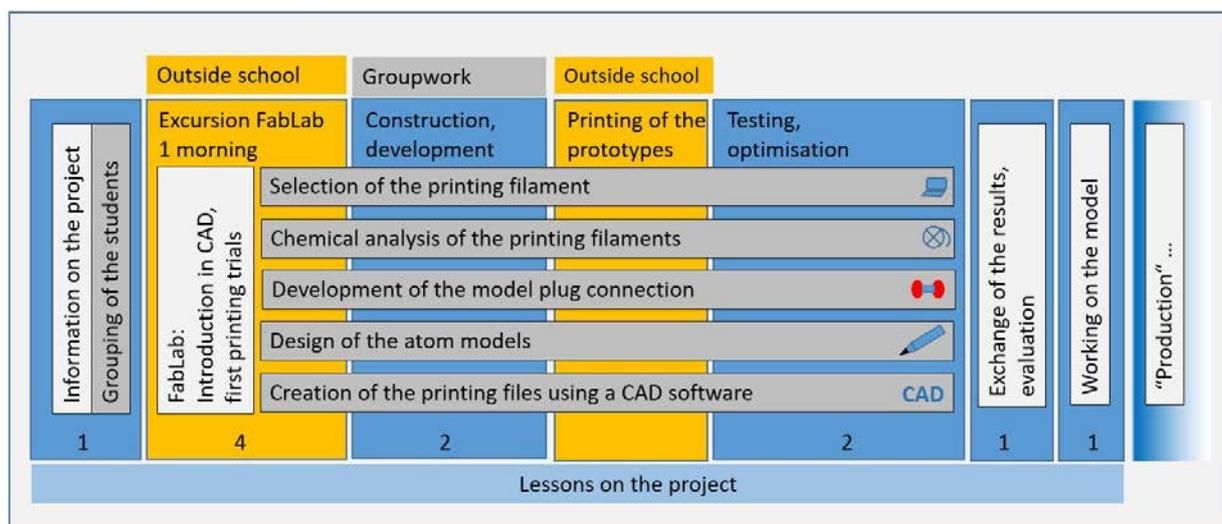


Figure 11. Suggested project phases of a teaching unit on 3D printing, numbers indicate the proposed quantity of lessons

- **Selection of the printing filament:** The first group of students has to look up information of advantages and disadvantages, e.g. price, colors, melting temperature, safety aspects, of commercially available printing filaments through research on the internet, available literature and product data sheets. In cooperation with the group 'development of the plug connection' and together with the design group a decision on the printing filament should be made collectively covering the specific requirements of the molecule model set.

- **Chemical analysis of the printing filaments:** The participants of this group have to determine the melting temperature of the three filaments ABS, PLA and PVA (see student experiment 1 and worksheet 1). The printing temperature of the extruder has to be set exactly to get optimal printing results.

- **Development of the model plug connection:** The students in this group develop a plug connection that provides a stable linking and allows several disassembles of "atoms" and "electron pairs". In order to give students some ideas of already existing products, different molecular sets are offered for viewing (see also Info box).

- **Design of the atom models:** This group selects colors and connections of their desired atom models. Additionally, they have to work out the amount and configuration of bonding possibilities of each atom model. In this phase students have to apply their basic chemical knowledge.

- **Creation of the printing files using a CAD software:** The group dealing with the CAD program have to work out the designed model. This group works in close cooperation with the groups 'Development of the model plug connection' and 'Design of the atom models'.

#### 4. Practical Evaluation and Outlook

As described the presented project fits well into regular chemistry lessons on the topic "polymers" and in addition it can be linked interdisciplinary to many curriculum contents on the subject of computer applications using the potentially motivating 3D printing technology. The purchase of a 3D printer seems to be a worthwhile investment, especially since 3D printing can be used in school for other projects and courses as mentioned.

Offering the project for a longer period of time, further assignments can be involved such as a creation of an appropriate packaging through 3D printing for the molecular model set or the developing of a marketing strategy for the set. Furthermore, the development process of the plug connection can be repeated several times until an optimal result is achieved.

The proposed teaching unit fosters the application of students' theoretical and experimental knowledge of polymers and was tested with 16 students of an eleventh grade class of a German academic high school. Students were asked about their experiences during the unit. It turned out, that the described project fits into a unit of six lessons, though it might be advisable to give more time to the entire project, as pointed out by the students.

Following some more statements of the students are given:

*"I liked the many independent project parts and the attempts to chemically split the plastic."*

*"I did not like the sometimes short time and the lack of communication among the groups."*

*"Working together with my chemistry class was an interesting successful experience and different from ordinary lessons."*

In addition, first tendencies have been found, showing that the integration of 3D printing has increased the motivation of the students for chemistry class in general as well as for the specific topic of polymers. Further investigations have to prove these first findings, which are based on a very limited number of students.

##### Additional information: Plug connection

An important step in creating a molecular model set is the development of a suitable plug connection. The main features for such a connection are that it provides a stable link and allows several disassembles of "atoms" and "electron pairs". The proposed connection (Figure 13) is certainly just one of several possible solutions.

For the linking, the atom models get cylindrical connections with a rounding on the top. The "binding pair of electrons" in form of tubes is attached to these cylinders. For these "binding pair of electrons" silicone hoses of 4 millimeters internal and 6 millimeters external diameter are used which are available for sale in the specialist trade in aquaristics by the meter [25]. After a few test prints, the

diameter of the cylinder of 4.05 millimeters turned out to be the most favorable one.

Using silicone tube pieces of different lengths, various bond lengths can be displayed. An "atom diameter" of 15-20 millimeters seems to be particularly suitable.

Printing the atom models can be done in two ways. For one thing, the "atoms" can be printed as a whole with the help of supporting structures (Figure 12).



**Figure 12.** "Sulfur atom" made of PLA with supporting structure of PVA

In this way, an almost perfect ball shape arises and the connecting cylinders can be printed with overhangs as well. If no 3D printer with dual extruder is available the "atoms" have to be printed in halves since only overhangs of maximum 60° can be printed (Figure 13).



**Figure 13.** "Atom halves" with connecting dowel pin

The cut surface through the center of the sphere serves as a base for 3D printing, the halves are glued together with a plastic adhesive after printing. Both of the variants of printing are shown opposite.

To create the printing files, the free 3D program 123D-Design is well-suited [26]. This software is accessible in an English language version, must be installed on computers and allows the concrete setting of angles, which can not be realized in many other 3D programs.

## References

- [1] Arthur C. Clarke Predicts the Internet, 3D Printers and Trained Monkey Servants, [www.openculture.com/2014/06/in-1964-arthur-c-clarke-predicts-the-internet-3d-printers-and-trained-monkey-servants.html](http://www.openculture.com/2014/06/in-1964-arthur-c-clarke-predicts-the-internet-3d-printers-and-trained-monkey-servants.html) (accessed: 01/2019).
- [2] The Vatican's Swiss Guards are now using 3D printed helmets, <https://www.theverge.com/2019/2/24/18238786/vatican-swiss-guards-3d-printed-helmets> (accessed: 02/2019).
- [3] Ender 3 Pro, <https://www.3djake.uk/creality-3d-printers-spares-parts/ender-3-pro> (accessed: 02/2019).
- [4] 3D printer Ultimaker 3, <https://www.dream3d.co.uk/product/ultimaker-3-offer/> (accessed: 02/2019).
- [5] Map of fabrication laboratories (FabLabs) worldwide, <https://www.fablabs.io/labs/map> (accessed: 01/2019).
- [6] Schilde, U.; Kloevekorn, F.: Molecular models of chemical compounds made by 3D printing (Molekülmodelle chemischer Verbindungen mittels 3D-Druck). *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 64 (2015) No. 5, 18-24.
- [7] Jones, O.; Spencer, M.: A Simplified Method for the 3D Printing of Molecular Models for Chemical Education. *Journal of Chemical Education* 95 (2018), 88-96.
- [8] Violante, L.; Nunez, D.; Ryan, S.: 3D Printing in the Chemistry Curriculum: Inspiring Millennial Students To Be Creative Innovators. *Addressing the Millennial Student in Undergraduate Chemistry* (2014) No. 1180, 125-146.
- [9] Heusler, S.: New ways of expression for physics education - The potential of 3D printer in physics teaching (Neue Ausdrucksformen für die Physikdidaktik - Das Potential von 3D-Druckern für den Physikunterricht), <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/506/653> (accessed: 01/2019).
- [10] Lindmeier, A.; Rach, S.: 3D printing - Hands and minds on! From the spatial construction to a printed model (3D-Druck - Hands and minds on! Von der räumlichen Konstruktion zum gedruckten Modell). *Mathematik lehren* 32 (2015) No. 190, 18-21.
- [11] Qualitäts- und Unterstützungs Agentur - Landesinstitut für Schule des Landes Nordrhein-Westfalen (QUA-LiS NRW): Information and orientation to get into 3D printing at school (3-D-Druck in der Schule. Informationen und Orientierung für den Einstieg in den Unterricht), <https://www.qua-lis.nrw.de/cms/upload/service/flyer/d-3D-Druck-in-der-Schule.pdf> (accessed: 01/2019).
- [12] 3D printing in medicine (3D-Druck in der Medizin), <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-in-der-medicin-170720181/> (accessed: 01/2019).
- [13] Scientists print an ear that survives and grows in the human body (Wissenschaftler drucken ein Ohr, das im Körper überlebt und wächst), <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/zukunft-visionen/ohr-aus-3d-drucker-ueberlebt-und-waechst-27351713/> (accessed: 01/2019).
- [14] First time printing human skin by a 3D printer (Erstmals menschliche Haut aus dem 3D Drucker), <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/3d-druck/erstmal-menschliche-haut-3d-drucker/> (accessed: 01/2019).
- [15] L'Oreal and Poietis: Partnership against hair loss through 3D bioprinting (L'Oreal und Poietis: Partnerschaft zur Bekämpfung von Haarausfall mit 3D-Bioprinting), <https://www.3dnatives.com/de/loreal-poietis-bekampfung-von-haarausfall-mit-3d-bioprinting-061020161/> (accessed: 01/2019).
- [16] 3D printing in medicine (3D-Drucker(er) in der Medizin), <https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/medizin-3d-drucker> (accessed: 01/2019).
- [17] Foods made by 3D printing (Lebensmittel aus dem 3D Drucker), <https://3druck.com/tags/lebensmittel-3d-drucker/> (accessed: 01/2019).
- [18] Your house made by 3D printing (Dein Haus aus dem 3D-Drucker zum Spottpreis), <https://manonamission.de/dein-haus-aus-dem-3d-drucker-zum-spottpreis> (accessed: 01/2019).
- [19] PLA filament, <https://shop.3dfilaprint.com/23kg-filaprint-iron-grey-premium-pla-175mm-3d-printer-filament-10082-p.asp> (accessed: 02/2019).
- [20] Everything You Need to Know About ABS Plastic, <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic> (accessed: 02/2019).
- [21] ABS filament, <https://shop.3dfilaprint.com/abs-extrafill-cobalt-blue-175mm-3d-printer-filament-8294-p.asp> (accessed: 02/2019).
- [22] Cowie, J.; Arrighi, V.: *Polymers, Chemistry and physics of modern materials*, CRC Press, 2007.
- [23] Bavarian high school curriculum 11/12. School subject chemistry, [www.isb-gym8-lehrplan.de/content/serv/3.1.neu/g8.de/?StoryID=26195](http://www.isb-gym8-lehrplan.de/content/serv/3.1.neu/g8.de/?StoryID=26195) (accessed: 01/2019).
- [24] Acrylonitrile-butadiene-styrene (Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)), <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/abs/abs.htm> (accessed: 01/2019).
- [25] Silicone air hose, <https://fish.aquaristic.net/en/Aquarium-Air-Pump/Evolution-Silicone-air-hose-5-m-4-6-mm.html> (accessed: 02/2019).
- [26] 3D software 123D-Design, <https://www.heise.de/download/product/123d-design-89217> (accessed: 01/2019).
- [27] FDM 3D printing: ABS or PLA? What are the differences? (FDM-3D-Druck: ABS oder PLA? Was sind die Unterschiede?), <https://3druck.com/lieferanten-haendler/fdm-3d-druck-abs-oder-pla-sind-die-unterschiede-2020380> (accessed: 01/2019).

## Worksheet 1: Melting behavior of 3D print filaments

### Equipment:

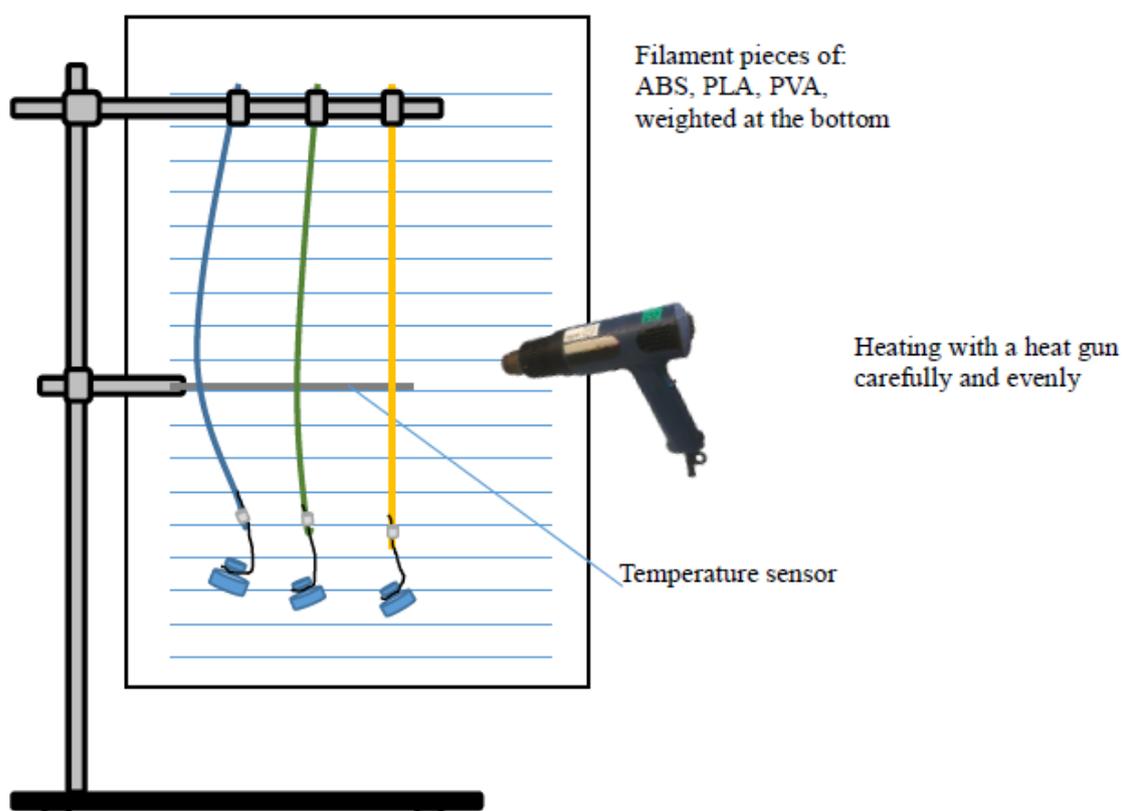
Stand material  
3 small weights to weight (20 g each)  
1 Temperature sensor ( $T > 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) with display device  
1 Heat gun

### Chemicals:

Printing filaments of various synthetics (for example polyvinyl alcohol PVA, polylactic acid PLA, acrylonitrile-butadiene-styrene ABS)

### Experimental part:

Pieces of equal length are cut off (15 cm) from the filaments. These are attached to the stand as illustrated in the picture and weighted at the bottom (20 g). It has been proven to attach these with a short section of a silicone tube to the filament. Thereafter, the filaments are heated evenly with a heat gun.



### Observation:

The diverging elasticity of the filaments can be detected before heating by the differing degree of deflection.

PLA reaches its glass-transition temperature as the first synthetic and softens at approx.  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . If heated further, the synthetic melts and the lower weighted piece falls off.

As the temperature increases further, the PVA filament elongates and then the ABS filament as well.

### Theory:

The synthetics used have different softening and melting temperatures. In order to achieve optimum results in 3D printing, this must also be taken into account when setting the pressure jet temperature. The glass or softening temperature is the temperature at which the synthetic just becomes rubbery and begins to deform. The jet of the printer is heated approximately to the melting temperature. The exact printing temperature depends on the diameter of the jet and the printing speed.

Table 2. Glass or melting temperature of the examined filaments [modified after 27]

Filament features	ABS	PLA	PVA
Melting index MVI (in section) [ $\text{cm}^3/10\text{min}$ ]	9,7	10,3	ns
Glass temperature Softening temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	110 – 125	70 – 80	85
Melting temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	210 – 240	160 – 190	180 - 205
Printing speed	40 - 80 mm/s	starting from 20 mm/s	like ABS or PLA

**Table 3. Mechanical and physical features of ABS and PLA [27]**

Features	ABS	PLA
Break resistance [MPa]	~ 70	~ 60
Elasticity E-Module [MPa]	~ 2300	~ 3500
Notched impact strength (IZOD) [kJ/m <sup>2</sup> ]	5 – 50	2 – 40
Resistance to weather	good	moderate
Toxicity	irritant	not irritant
UV resistance	medium	high
Surface hardness	medium	high
Threshold (extrudate swell)	high	medium
Warp effect	high	low
Flammability	flammable	non-flammable
Possibilities for subsequent treatment (drilling, milling, refining, etc.)	good	medium
Friction resistance	low	medium

**Disposal:**

The filaments can be disposed of with household waste.

## Worksheet 2: Analysis of a polymer filament for 3D printing

To 3D print the atoms for this molecular model set, a suitable filament is required, which allows a stable plug connection, based on the proposed internet research, a synthetic filament is selected.

The chemical properties of the filament polymer will be examined in the following experiments.

Read the entire experiment instruction carefully before performing the experiment. If you are unsure about anything or you have any question, please ask your teacher or your advisor! Write down your observations!

**! Work carefully and remember that acetone is highly flammable. Wear safety goggles and a lab coat during the entire experiment!**

### Equipment:

1 Magnetic stirrer with magnetic stir bar	1 Folded filter paper (d = 185 mm)
1 Glass beaker about. 100 mL	PE film (cling film)
1 Measuring cylinder 100 mL	1 Spatula
1 Erlenmeyer flask 200 mL	2 Glass pipette with hat
1 Glass funnel big and 1 glass funnel small	2 Watch glasses
2-4 Centrifuge tube (total 50 mL)	Paper towels or cellulose

Drying cabinet (oven)

Centrifuge (centrifuge for manual usage)

### Chemicals:

5 cm of ABS filament (pretest) and 0,8 g - sample to be analyzed

Distilled water, acetone (technical grade)  , ethyl acetate  .

### Pretests:

In a solvent-filled snap cap glass, test whether the samples are soluble. Add 1-2 mL of solvent to the lever lid glass and add two 1 cm pieces of the filament. Close the lever lid glass and shake. Observe color changes and dissolving behavior for ½ an hour.

Pretest 1: Water solubility

Filament solves in water

→ PVA (Polyvinyl alcohol)

Filament solves not in water

→ continue with pretest 2

Pretest 2: Solubility in ethyl acetate:

Filament solves in ethyl acetate

→ PLA (Polylactic acid)

Filament solves not in ethyl acetate

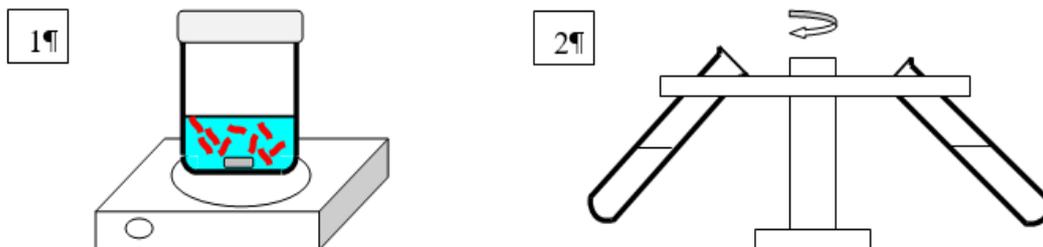
→ continue with experiment 1

## Experimental part:

### Experiment 1 (with filament from pretest 2)

#### Experimental procedure:

50 mL of acetone are measured using the measuring cylinder and placed in the 150 mL lever lid glass. Cut 0.8 g of the sample substance as small as possible and add it to the acetone in the lever lid glass. Stir the suspension on the magnetic stirrer for 15 minutes (do not forget the flea!).



#### Observation:

- Filament dissolves only partially.

---

- The solution takes on the color of the filament.

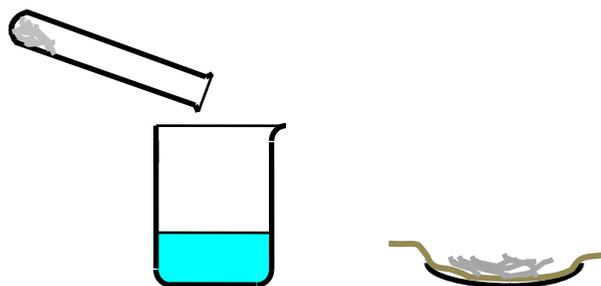
---

### Experiment 2 – Product 1

#### Experimental procedure:

After the magnetic stir bar is removed, the solution formed in Experiment 1 is distributed evenly on the centrifuge tubes. The balanced tubes are placed symmetrically in the centrifuge. In the presence of the advisor, the solution is centrifuged for about 5 minutes.

The supernatant solution is poured into a 100 mL beaker and set aside. The sediment from the centrifuge tube is applied to a PE film, which is spread on the watch glass, and dried for 15 minutes at 70 °C in a drying cabinet.



#### Observation:

- The weight is significantly lower than it was measured out.

---

- After drying, the residue is tough and not very elastic.

---

#### Exercise:

Examine the residue by looking and feeling! Compare its consistency and the amount of the resulting substance with that of the original sample.

**Observation:**

- The weight is significantly lower than it was measured out.

---

- After drying, the residue is tough and not very elastic.

---

**Explanation:**

The examined filament consists of ABS. ABS is a mixed polymer of an acetone-soluble component and an acetone-insoluble component.

**Experiment 3****Experimental procedure:**

60 mL of distilled water are measured using the measuring cylinder and placed in a clean 100 mL beaker. With stirring (with the aid of a clean flea and the magnetic stirrer), about half of the supernatant obtained in Experiment 2 is slowly added dropwise with the pipette (product 2).

**Observation:**

- In the aqueous solution colored flakes precipitate.

---

**Explanation:**

The component dissolved in acetone and precipitates in aqueous solution.

**Experiment 4 – Product 2****Experimental procedure:**

The flakes produced in experiment 3 are now filtered using folded filters and glass funnels (takes about 10 minutes). The glass funnel is placed in the 200 mL Erlenmeyer flask and the folded filter placed in the glass funnel. The suspension to be filtered is then added in portions.

The mass retained in the pleated filter is placed on a watch glass and dried in a drying cabinet at 70 °C for 15 minutes.

A piece of PE film is placed on a crystal and 3-4 mL of the filtrate dripped thereon. The sample is also dried in the drying cabinet.

**Exercise:**

Analyze the dried mass and the dried filtrate for its consistency.

**Observation:**

- The residue remains flaky.

---

- The filtrate is baked to a brittle foil.

---

**Explanation:**

The filament can be separated by dissolving it in acetone into two components. The acetone-soluble component is a styrene-acrylonitrile graft copolymer (SAN). This is fibrous and brittle in the dried state and provides in the filament for the hardness and strength of the synthetic. The component precipitated in acetone (product 1) is a polybutadiene. This butadiene rubber is flexible and tough when dried. It ensures the tenacity and flexibility of the filament.

**Disposal:**

The filtrates are placed in the organic solvent waste container and the residues and dried samples disposed of in the household waste.

**References:**

modified of Morawitz Katrin (2011), Thermoplastic features of ABS <http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/abs/abs.htm>.



### 5.3 Publikation 3: Chemiedidaktik: Funken selbstgemacht

Michael A. Martens, Magdalena Rusan, Thomas M. Klapötke & Stefan Schwarzer

SCHEID, M., RUSAN, M., KLAPÖTKE, T. M. & SCHWARZER, S. (2021). Chemiedidaktik: Funken selbstgemacht. *Nachrichten aus der Chemie*, 69(9), 27–30.

#### **Beiträge der Autoren:**

Die Entwicklung der Wunderkerzen wurde von Michael A. Martens unter Anleitung von Stefan Schwarzer durchgeführt. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens und Stefan Schwarzer gemeinsam geschrieben. Magdalena Rusan und Thomas M. Klapötke berieten dabei wissenschaftlich und führten die Tests zur Charakterisierung der energetischen Eigenschaften der Wunderkerzen durch.

#### **Copyright:**

Abdruck für diese Dissertation mit freundlicher Genehmigung durch die Redaktion der *Nachrichten aus der Chemie* von der Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.

## Chemiedidaktik

# Funken selbstgemacht

Die Mischung, die Wunderkerzen funkeln lässt, ist nichts für Kinder – die Bestandteile sind gesundheitsschädlich und können explosiv sein. Das muss nicht sein: Chemiker und Chemiedidaktiker aus München haben eine Mischung entwickelt, die Schülerinnen und Schüler ab der Jahrgangsstufe fünf sicher handhaben können.



So brennt eine selbst hergestellte Wunderkerze.

Chemiker und Chemiedidaktiker aus München und Tübingen haben gemeinsam bariumnitratfreie Wunderkerzen entwickelt:<sup>1)</sup> Die Didaktiker haben sich darauf konzentriert, die Wunderkerzen weniger umweltschädlich und den Herstellungsprozess einfach und schultauglich zu machen. Die Arbeitsgruppe für hochenergetische Materialien der Ludwig-Maximilians-Universität München hat untersucht, ob die neuen Wunderkerzen explosionsfähig oder explosionsgefährlich sind.

Die Wunderkerzen sollten nach der Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (Risu) der Kultusministerkonferenz<sup>2)</sup> aus dem Jahr 2019 sicher herzustellen und zu handhaben sein, Schülerinnen und Schüler sollten sie im Unterricht selbst herstellen dürfen. Dies haben Prüfverfahren sichergestellt, welche die Reaktivität der Wunderkerzenreaktionsmischung ermittelten.

## Chemische Zusammensetzung

Artikel über die Herstellung konventioneller Wunderkerzen gibt es von Keeney und Coautoren aus dem Jahr 1995<sup>3)</sup> und über die chemischen Reaktion bei der Verbrennung von Wunderkerzen von Martin und de Vries aus dem Jahr 2004.<sup>4)</sup> Zudem dokumentierte das

Portal [impulse.de](http://impulse.de) im Jahr 2013 den Herstellungsprozess von Wunderkerzen der Firma Weeco.<sup>5)</sup>

Darüber hinaus ist es schwierig, einen Einblick in die Herstellung und besonders in die chemische Zusammensetzung von Wunderkerzen zu erhalten – die Produzenten halten ihre Rezepturen geheim.

Wunderkerzen bestehen aus einem Gemisch anorganischer Chemikalien sowie einem Bindemittel, mit dem die Masse auf einem Draht fixiert wird. Die Hauptbestandteile von Wunderkerzen sind Eisenpulver, ein Oxidationsmittel, Aluminium- und Magnesiumpulver, Bindemittel sowie Draht.<sup>6)</sup> Handelsübliche Wunderkerzen enthalten zudem geringe Mengen weiterer Chemikalien, welche die Abtrenneigenschaften optimieren. So sorgt Borax für einen gleichmäßigen Funkenflug und fixiert zugleich die Reaktionsprodukte am Draht, damit die heiße Schlacke nicht tropft.<sup>5)</sup>

## Funkenflug erzeugen

Das in Wunderkerzen enthaltene Eisenpulver oxidiert während der Reaktion mit Luftsauerstoff zu Magnetit; dabei entstehen die für Wunderkerzen typischen warmweißen Funken. Das Erscheinungs-

bild der Funken hängt von der Größe der Eisenpartikel und von deren Kohlenstoffgehalt ab. Partikelgrößen von 44 µm bis 149 µm sowie ein Kohlenstoffanteil von ein bis zwei Prozent sind ideal für einen gleichmäßigen Funkenflug mit vielen Verzweigungen. Größere Partikel führen zu unregelmäßigem Funkenflug und Verbrennungsgefahr; kleinere Partikel reagieren so schnell, dass keine Funken fliegen. Zudem reagiert das Eisen mit dem Oxidationsmittel der Wunderkerzen, und zwar im Inneren, sodass Funken nicht zu sehen sind.

In handelsüblichen Wunderkerzen dient Bariumnitrat als Oxidationsmittel, das eine hohe Oxidationskraft hat und kostengünstig



Diesen Beitrag haben Michael Scheid (Foto oben), Magdalena Rusan, Thomas M. Klapötke und Stefan Schwarzer (Foto unten) verfasst. Scheid studierte an der LMU München Chemie und Geographie für das gymnasiale Lehramt. Seit 2018 forscht er im Arbeitskreis von Stefan Schwarzer. Rusan entwickelt an der LMU München Experimente für Vorlesungen und Lehramtspraktika. Klapötke ist Lehrstuhlinhaber für anorganische Chemie an der LMU München und erforscht Explosivstoffe. Schwarzer war Professor für Chemiedidaktik an der LMU München und wechselte 2020 an die Universität Tübingen. Er entwickelt Experimente zu Materialien mit Bezug zur Nachhaltigkeit für Schule und Schülerlabor.



ist.<sup>5)</sup> Da viele Bariumverbindungen giftig und umweltschädigend sind,<sup>7)</sup> verbietet sich Bariumnitrat in den neu entwickelten Wunderkerzenmischungen. Alternativen in den beiden neuen Wunderkerzenmischungen sind Kalium- und Strontiumnitrat.

Kalium- und Strontiumkationen sind umweltverträglicher als das Bariumkation. Anders als Bariumverbindungen sind die meisten Strontiumverbindungen toxikologisch unbedenklich.<sup>8)</sup>

Die unterschiedliche Umweltverträglichkeit der drei Nitratsalze in Wunderkerzen können Schülerinnen und Schüler an der Wasserlinse als Modellorganismus untersuchen: Während die Wasserlinsen in Kontakt mit Bariumkationen innerhalb von zehn Tagen ausbleichen, wachsen die Pflanzen mit Kaliumkationen im Wasser weiter.<sup>9)</sup>

Aluminium und Magnesium reagieren in Wunderkerzenmischun-

gen mit dem Oxidationsmittel stark exotherm. Dabei entstehen Gase, durch die Eisenpartikel austreten, die dann als Funken erscheinen. Dabei entscheidet der Zerteilungsgrad von Aluminium und Magnesium über das Abbrennverhalten der Wunderkerze. Für einen homogenen Funkenflug ist Aluminiumstaub mit einer maximalen Partikelgröße von  $45\ \mu\text{m}$  erforderlich. Magnesium ist verzichtbar, wenn der Anteil von Aluminium ausreichend groß ist: Je feiner das Aluminiumpulver ist, desto geringer muss sein Anteil sein. Bei einer Partikelgröße des Aluminiums von  $45\ \mu\text{m}$  sind etwa 5 Gewichtsprozent notwendig.

Bindemittel bei konventionellen Wunderkerzen ist Dextrin,<sup>5)</sup> es macht die Mischung dickflüssig, sodass die Drähte von Wunderkerzen in Tauchgängen beschichtet werden können, bis das Material dick genug aufgetragen ist. Dieses Verfahren dauert und ist materialin-

tensiv, daher eignet es sich nicht dazu, Wunderkerzen für die Forschung oder in der Schule herzustellen. Eine Alternative ist kaltlösliche Stärke, die mit kaltem Wasser verkleistert. Mit diesem Bindemittel nimmt die Wunderkerzenmischung eine Konsistenz wie Knetmasse an, die mit der Hand gerollt und einfach zu einer Wunderkerze geformt werden kann (Abbildung 1).

Die beiden neu entwickelten Wunderkerzenmischungen bestehen je aus einem Nitratsalz, Eisen und Aluminium sowie kaltlöslicher Stärke und Wasser. Der optimale Stoffmengenanteil des Nitratsalzes liegt bei 35 Prozent der anorganischen Bestandteile an der Mischung, und zwar für  $\text{SrNO}_3$  und  $\text{KNO}_3$ .

Die Herstellung der Wunderkerzenmischungen wird detailliert in der Literatur beschrieben<sup>1,9)</sup> und ist als Video abrufbar.<sup>10)</sup>

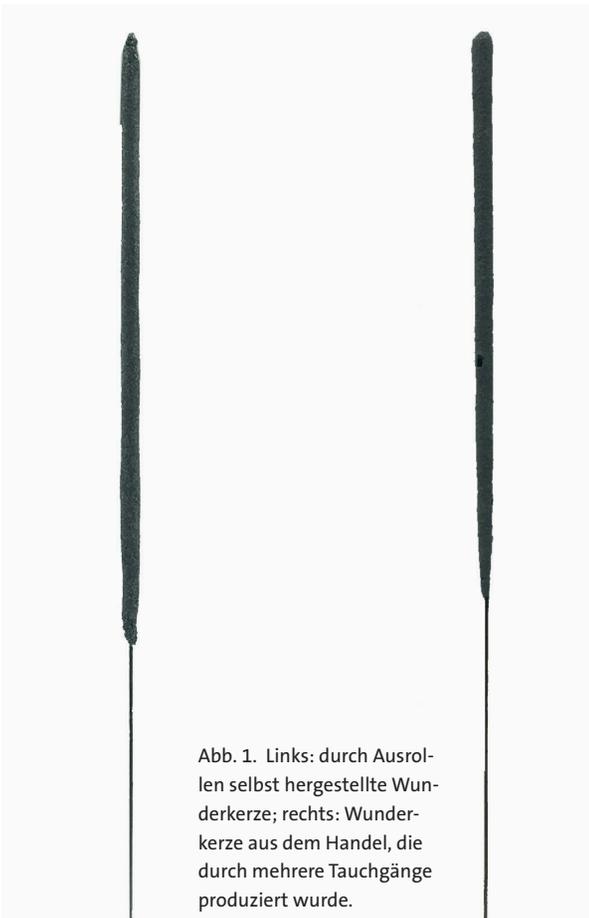


Abb. 1. Links: durch Ausrollen selbst hergestellte Wunderkerze; rechts: Wunderkerze aus dem Handel, die durch mehrere Tauchgänge produziert wurde.



Abb. 2. Ergebnisse von Stahlhülisentests, bei dem ein Stoff in einer verschlossenen Stahlhülse mit Entlastungsöffnung erhitzt wird; oben: negativ, rechts: positiv.



### Prüfverfahren: explosiv oder nicht?

Pyrotechnische Mischungen unterliegen in Deutschland sowohl im Unterricht als auch allgemein strengen Regelungen. So können nach der aktuellen Fassung der Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (Risü) „Mischungen oxidierender Verbindungen, z. B. Nitrate [...] mit entzündbaren oder reduzierbaren Stoffen [...] die Eigenschaften von explosiven Stoffen haben“.<sup>2)</sup> Schülerinnen und Schüler dürfen explosive Stoffe an Schulen nicht herstellen, und Lehrer dürfen sie nur in Demonstrationsversuchen einsetzen. Um Wunderkerzen als Schülerexperiment herstellen zu dürfen, ist somit der Nachweis zu erbringen, dass die Wunderkerzenmischungen nicht explosiv sind.

Fachwissenschaft und Gesetzgeber unterscheiden zwischen explosionsfähigen und explosionsgefähr-

lichen Stoffen und Gemischen.<sup>11)</sup> Um die Explosionsfähigkeit eines Stoffs abzuschätzen, wird das Berthelot-Rot'sche Produkt  $B_R$  berechnet. Ist dieses größer oder gleich dem des traditionell als Referenzwert dienenden Oppauer Salzes, wird ein Stoff oder Gemisch als explosionsfähig bezeichnet. Oppauer Salz ist eine Mischung aus Ammoniumnitrat und Ammoniumsulfat zu gleichen Gewichtsanteilen.

Keine der beiden neu entwickelten Mischungen mit den Oxidationsmitteln Kalium- und Strontiumnitrat hat ein  $B_R$  oberhalb des Referenzwerts.

Damit ein chemischer Stoff darüber hinaus nicht als explosionsgefährlich eingestuft wird, darf er bei drei Prüfverfahren zur thermischen und mechanischen Belastbarkeit nicht spontan reagieren.<sup>11)</sup> Die drei Prüfverfahren sind:

- Stahlhülstest (Abbildung 2) mit einer Bohrung von 2 mm in der Düsenplatte,

- Schlagempfindlichkeit  $\leq 39$  J (im BAM-Fallhammer, Abbildung 3),
- Reibeempfindlichkeit  $\leq 353$  N (Abbildung 4).

Das Ergebnis des Stahlhülstests mit den neuen Mischungen ist negativ, sie weisen eine Schlagfestigkeit von über 40 J sowie eine Reibeempfindlichkeit von mehr als 360 N auf.

Zudem wurden die Mischungen einem ESD-Test (electrostatic discharge) unterzogen, der ihre Empfindlichkeit gegenüber elektrostatischer Entladung prüft. Beide Mischungen weisen hier eine ESD-Empfindlichkeit von mehr als 1,5 J auf.

Die Wunderkerzenmischungen sind somit nach dem deutschen Sprengstoffgesetz weder explosionsgefährlich noch zählen sie zu den Explosivstoffen.<sup>11,12)</sup> Daher dürfen mit den Mischungen Wunderkerzen als Schülerexperiment im Unterricht hergestellt werden. ▶



Abb. 3. BAM-Fallhammer; damit wird im Labor die Schlagempfindlichkeit eines Stoffs geprüft.



Abb. 4. BAM-Reibapparat, dient im Labor dazu, die Reibeempfindlichkeit einer Substanz zu bestimmen.

Allerdings ist es Schülerinnen und Schülern bis einschließlich Jahrgangsstufe 4 nicht erlaubt, mit Eisenpulver, Aluminiumpulver, Kalium- und Strontiumnitrat zu arbeiten,<sup>14)</sup> die Herstellung von Wunderkerzen im Schülerexperiment ist somit erst ab Jahrgangsstufe fünf möglich.

### Wunderkerzen im Chemieunterricht

Seit zwei Jahren fertigen Schülerinnen und Schüler Wunderkerzen im Schülerlabor an. Dies gelingt bereits Fünftklässlern gut.

Ergänzend können sie mit Wasserlinsen die Umweltverträglichkeit der verschiedenen Wunderkerzenmischungen untersuchen und das Handlungsprinzip Nachhaltigkeit fächerübergreifend diskutieren. Dies schult Schülerinnen und Schüler in den Kompetenzbereichen Erkenntnisgewinnung und Bewertung. Schulklassen aus der Unterstufe können damit einen Beitrag der Wissenschaft Chemie zu einer saubereren Umwelt diskutieren.

Ab der Jahrgangsstufe 9 sind die Schülerinnen und Schüler der weiterführenden Schulen meist mit den Grundlagen der Redoxchemie vertraut und können die grundlegenden Reaktionsgleichungen ei-

ner abbrennenden Wunderkerze aufstellen.<sup>4)</sup> Weitere Lehrplanbezüge der Wunderkerzen finden sich zu den Themen Oxidationsmittel, Atombau und Flammenfärbung. Die Lehrpläne einiger Bundesländer, etwa in Bayern und Brandenburg,<sup>15,16)</sup> führen die Wunderkerze als Beispiel für Redoxreaktionen und Pyrotechnik direkt auf.

### Ein Fazit: Zusammenarbeit mit der Grundlagenforschung

Die Ergebnisse aktueller chemischer Forschung erscheinen auf den ersten Blick oft als ungeeignet für den Chemieunterricht. Dies liegt meist an komplizierten Reaktionsmechanismen, komplexen Theorien sowie an Geräten, die an Schulen nicht vorhanden sind und deren Verständnis und Handhabung fachliches Wissen und oft auch Detailwissen erfordert.

Trotzdem lohnt es sich, bei aktuellen Forschungsthemen genauer hinzusehen: Es gibt Themen mit Lehrplanbezug, die sich für die Wissenschaftskommunikation eignen.<sup>17)</sup> Dies ist zum einen für außerschulische Lernorte wie Schülerlabore oder Chemieunternehmen interessant. Zum anderen lässt sich so der Unterrichtsgegenstand aus den Lehrplänen auf dem aktuellen Stand halten. Zudem tragen solche interdisziplinär erarbeiteten Themen zur Öffentlichkeitsarbeit der Wissenschaft Chemie bei. Aktuelle Forschungsinhalte und -methoden können Schülerinnen und Schülern so an alltagsnahen Beispielen zugänglich gemacht werden. ■

*Das Projekt „Di-Fa<sub>Ch</sub><sup>M</sup>“ wird im Rahmen der „Qualitäts Offensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Hierfür bedanken wir uns. Ein besonderer Dank geht zudem an alle Schülerinnen und Schüler, die mit ihrem Feedback den Entwicklungsprozess zur Herstellung der neuartigen Wunderkerzen unterstützt haben.*

- 1) M. Scheid, M. Rusan, T. M., Klapötke, S. Schwarzer, Chemistry Teacher International, 2021
- 2) [www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1994/1994\\_09\\_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf) (Stand 16.8.2021)
- 3) A. Keeney, C. Walters, R. D. Cornelius, J. Chem. Educ. 1995, 72/7, 652–653
- 4) C. Martin, T. de Vries, CHEMKON 2004, 11/1, 13–20
- 5) V. Bast, Impulse 2013, „Warenprobe: Wie eine Wunderkerze entsteht“, [www.impulse.de/leben/oh-wunder/2011512.html#4](http://www.impulse.de/leben/oh-wunder/2011512.html#4) (Stand 16.8.2021).
- 6) J. Falbe, H. Römpf, M. Regitz, E. Hillen, (Hrsg.) Römpf-Chemie-Lexikon, 19. Aufl. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1995
- 7) [www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10084](http://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10084) (Stand 16.8.2021)
- 8) [www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10254](http://www.umweltprobenbank.de/de/documents/profiles/analytes/10254) (Stand 16.8.2021)
- 9) M. Scheid, L. Pohl, M. Rusan, T. M., Klapötke, S. Schwarzer, CHEMKON 2020, doi: 10.1002/ckon.202000054
- 10) [player.vimeo.com/video/464925052](https://player.vimeo.com/video/464925052) (letzter Zugriff am 4.3.2021).
- 11) T. M. Klapötke, Chemie der hochenergetischen Materialien, de Gruyter, Berlin 2009
- 12) [www.gesetze-im-internet.de/sprengg\\_1976/BJNR027370976.html#BJNR027370976BJNG000101377](http://www.gesetze-im-internet.de/sprengg_1976/BJNR027370976.html#BJNR027370976BJNG000101377) (Stand 4.3.2021)
- 13) [degintu.dguv.de/chemicals/export/pdf](http://degintu.dguv.de/chemicals/export/pdf) (Stand 4.3.2021)
- 14) S. Sjøberg, C. Schreiner, The ROSE project. An overview and key findings. University of Oslo 2010
- 15) [www.isb-gym8-lehrplan.de/content/serv/3.1.neu/g8.de/id\\_1.html](http://www.isb-gym8-lehrplan.de/content/serv/3.1.neu/g8.de/id_1.html) (Stand 4.3.2021)
- 16) [bildungsserver.berlin-bran-denburger.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrpläne/Rahmen-lehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Chemie\\_2015\\_11\\_10](http://bildungsserver.berlin-bran-denburger.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrpläne/Rahmen-lehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Chemie_2015_11_10) (Stand 4.3.2021)
- 17) T. Wilke, P. Engelmann, S. Schwarzer, O. Tepner, Nachr. Chem. 2020, 68(12), 8

### AUF EINEN BLICK

Wunderkerzen bestehen aus Eisenpulver, einem Oxidationsmittel, Aluminium- und Magnesiumpulver sowie einem Bindemittel, das die Substanzen zusammen- und an einem Draht festhält.

Als Oxidationsmittel dient in handelsüblichen Wunderkerzen Bariumnitrat. Da es ein starkes Oxidationsmittel ist, eignet es sich in Kombination mit brennbaren Stoffen nicht für Schülerexperimente. Alternativen sind Kalium- und Strontiumnitrat.

Neue Mischungen sind auf Explosivität zu untersuchen, bevor Kinder und Jugendliche in der Schule mit ihnen arbeiten dürfen.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

#### 5.4 Publikation 4: The production of less harmful and less toxic sparklers in an experiment for school students

Michael A. Martens, Magdalena Rusan, Thomas M. Klapötke & Stefan Schwarzer

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*, 3(3), 285–294.

##### **Beiträge der Autoren:**

Die Entwicklung der Wunderkerzen sowie die Erprobung der Unterrichtseinheit im Schülerlabor wurde von Michael A. Martens unter Anleitung von Stefan Schwarzer durchgeführt. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens und Stefan Schwarzer gemeinsam geschrieben. Magdalena Rusan und Thomas M. Klapötke berieten dabei wissenschaftlich und führten die Tests zur Charakterisierung der energetischen Eigenschaften der Wunderkerzen durch.

##### **Copyright:**

© 2021 Michael Scheid et al., published by De Gruyter, Berlin/Boston . No changes were made to the article.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. To view a copy of this license, visit: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## Good practice report

Michael Scheid, Magdalena Rusan, Thomas M. Klapötke and Stefan Schwarzer\*

# The production of less harmful and less toxic sparklers in an experiment for school students

<https://doi.org/10.1515/cti-2020-0012>

Received June 19, 2020; accepted January 28, 2021; published online February 24, 2021

**Abstract:** In this article, a new and simple way of producing sparklers is presented as a school experiment. These sparklers are more environmentally friendly and less health threatening than sparklers produced with existing preparation methods. The problem of conventional sparklers is the toxicity of barium nitrate, which is used as the oxidizer. The substitution of this oxidizer with strontium nitrate and also the reduction of the weight proportion makes the new mixture less dangerous and less toxic. Various tests for the categorization of high-energetic materials show that the newly developed sparklers are not classified as explosives. Furthermore, the tests demonstrate that the newly developed sparklers are not as dangerous as commercial sparklers. Due to their lower health risk, these new sparklers are well suited for use in school education. In addition, expenditure for this experiment is low and integrating it into the upper secondary level curriculum is easy. Sparklers are an impressive example of redox reactions from everyday life. The experiment is a best-practice application for chemistry education, incorporating current results of chemistry research.

**Keywords:** green chemistry; redox reaction; school student experiment; sparkler.

## Introduction

The exact date of the invention of the first sparkler is not known. However, it is known that the sparkler in its present form was invented by Franz Jacob Welter more than 100 years ago. In 1908, he received the patent for his “method for producing a spark-emitting light stick” from the Imperial Patent Office in Hamburg, Germany (Welter, 1907). The exact chemical composition of the first sparkler is not recorded in this patent.

Since their invention, sparklers have captivated people with their fascinating sparks. In addition to the use of sparklers at Christmas time and on New Year’s Eve, there are various other uses in everyday life. For example, sparklers are used to decorate food at birthday celebrations or wedding parties. However, due to their chemical compounds, sparklers can be hazardous to health (Helmenstine, 2018). Normal sparklers use barium nitrate as the oxidizer. Therefore, the ingestion of the sparkler’s combustion products, because the dust from the sparkler drips down onto the food, and the inhalation of the smoke from the sparkler can be harmful to health. Up until now, an experimental procedure for producing safer sparklers has not been discussed or examined.

---

\*Corresponding author: **Stefan Schwarzer**, Chemistry Education, Eberhard Karls Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 18, 72076 Tübingen, Germany, E-mail: stefan.schwarzer@uni-tuebingen.de. <https://orcid.org/0000-0002-4134-5684>

**Michael Scheid**, Department of Chemistry, Ludwig-Maximilians-Universität München, Butenandtstraße 5-13, 81377 München, Germany; and Chemistry Education, Eberhard Karls Universität Tübingen, Auf der Morgenstelle 18, 72076 Tübingen, Germany. <https://orcid.org/0000-0002-3379-2804>

**Magdalena Rusan and Thomas M. Klapötke**, Department of Chemistry, Ludwig-Maximilians-Universität München, Butenandtstraße 5-13, 81377 München, Germany. <https://orcid.org/0000-0003-2301-0810> (M. Rusan). <https://orcid.org/0000-0003-3276-1157> (T.M. Klapötke)

For this reason, the goal of the cooperation between different research groups was to develop less health-threatening and more environmentally compatible sparklers. To achieve this goal, barium nitrate was replaced with the safer and less toxic oxidizer strontium nitrate and the weight proportion of the oxidizer was reduced. Because strontium nitrate has a higher solubility in water than barium nitrate, the new sparkler mixture is easier to roll by hand than sparklers with barium nitrate.

Due to the ease of preparation and the very close burning behavior in comparison to commercial sparklers, the production of the new sparklers is well suited as an experiment for school students at the upper secondary level. In addition, several professional state-of-the-art sensitivity tests proved that the new sparklers are safe to manufacture and to use. The new sparklers have already found their way into our science laboratory for school students, where school students produce them several times a week.

## General information

Sparklers consist of five main components (Keeney, Walters, & Cornelius, 1995):

- Oxidizer: an oxygen source for the oxidation of the metals
- Iron: to generate the sparks of the sparkler
- Aluminum and magnesium: as powder or dust to accelerate the reaction
- Binder: flour, starch, dextrin, or a similar chemical become a binder when mixed with water and thus hold the composition together
- Wire: iron, copper, or steel wire as carrier material

In addition, there are usually also other components, such as coal or sugar, in order to ensure uniform reactions with good spark patterns. Borax can be added so that the products of the sparkler remain attached to the steel wire during combustion (Bast, 2013). These components are not discussed in this article because they are not used in the sparkler mixture presented here.

To develop the barium nitrate-free sparklers, several experimental instructions from various sources on using barium nitrate as an oxidizer were studied (Helmenstine, 2015; Keeney et al., 1995). However, the spark pattern produced by all of the sparkler mixtures tested was much smaller than the spark pattern produced by commercial sparklers. In reaction to this, many correction loops were necessary until a perfect spark pattern could be obtained while considering all of the safety aspects. In general, it can be assumed that the combustion of sparklers produces a large number of different reaction products (Martin & Vries, 2004). In the following, only the reactions that school students must know in order to understand how sparklers work are listed.

## Oxidizer

In conventional sparklers, the cheap oxidizer barium nitrate is used. Barium nitrate is toxic (LD50 oral, rat: 355 mg/kg) (NCBI, 2020a) and problematic for the environment. Strontium nitrate with an LD50 value (oral, rat) of 2750 mg/kg (NCBI, 2020b) is toxicologically and ecologically less harmful. For this reason, strontium nitrate is used as the oxidizer for the sparkler mixture presented here. Another important aspect of replacing barium nitrate with strontium nitrate is that the sparkler mixture with strontium nitrate is much less sticky because strontium nitrate has a higher solubility in water than barium nitrate (NCBI, 2020a, 2020b). This makes it easier to manually shape the mixture into the form of a sparkler.

In addition to the reactions with the two metals described below, the thermolysis of the oxidizer when the sparkler is burned can be assumed as:



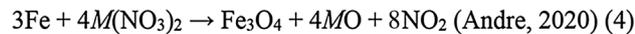
“M” in this and all the following reaction equations is representative of a divalent metal cation, such as  $\text{Ba}^{2+}$  or  $\text{Sr}^{2+}$ .

## Iron

The iron powder in the sparkler mixture produces the sparks by being oxidized with the oxygen of the air to magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), which was verified by X-ray powder diffraction. This oxidation produces the typical sparks of a sparkler, which are warm white to yellow in color. The size of the iron particles and their carbon content are essential for their appearance. In order to achieve a good spark pattern, a powder mixture of 44–149  $\mu\text{m}$  (–100 mesh to +325 mesh) is recommended. In order to obtain the typical branching of the sparks, which can be recognized in pictures as asterisks, a carbon proportion of 1–2% is necessary (Shimizu, 2010). The reaction equation for the oxidation of iron powder with the oxygen of the air is:



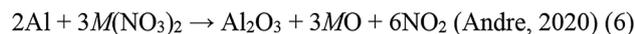
Furthermore, the iron powder reacts with the oxidizer. This happens in the mixture and is not recognizable as flying sparks. Two reactions are described in the literature:



## Aluminum

The oxidation of elemental aluminum releases large amounts of energy (Jennings-White & Kosanke, 1995). Aluminum-free sparklers only glow and do not have any flying sparks. Due to the large amount of energy released during the oxidation of aluminum, its proportion in the production of a safe sparkler should be as low as possible. Aluminum dust has a larger surface area than aluminum powder and it therefore reacts faster. Because of this, by using aluminum dust instead of aluminum powder, an aluminum proportion of only 5.7% in the mixture is enough to produce a good spark pattern.

Furthermore, sparklers with aluminum dust create a more homogeneous spark pattern than sparklers with aluminum powder. In addition, the use of aluminum dust does not create large hot sparks, which could be easily recognized by their cool white color. The best particle size for the aluminum dust is flaky particles that are smaller than 45  $\mu\text{m}$  (–325 mesh). Several reactions of aluminum with the oxidizer are described in the literature, for example:



## Magnesium

The third metal commonly used in sparklers is magnesium (Keeney et al., 1995). Similar to aluminum, it increases the temperature of the sparkler’s flame. If magnesium meets water, hydrogen is formed. The water of wet salts such as nitrates can already cause potentially dangerous reactions with magnesium and hydrogen (Jennings-White & Kosanke, 1995). To avoid this risk in the manufacture and disposal of the sparklers, no

magnesium powder is used in this mixture. In the newly developed sparklers, the aluminum dust is sufficient to create a good spark pattern.

## Binder

In commercial sparklers, dextrin is used as the binder (Bast, 2013). However, dextrin is not suitable for producing a tough mass that can be rolled to form sparklers. It is more suitable for the preparation of a sticky mass into which the wire is dipped in the industrial production of sparklers. Therefore, food starch, cold-water-soluble starch, glue, and flour were tested for the production of the new sparklers, and cold-water-soluble starch turned out to be the most suitable. On the one hand, cold-water-soluble starch has good adhesive force and, on the other hand, it requires only a small amount of water (six drops or 0.3 mL) in the sparkler mixture for a sparkler with 1.75 g of combustible material, which means that it can dry quickly. Thus, the sparklers are ready for use after only 2 h in the drying oven. This is an important aspect if the sparklers are to be produced in a school laboratory within one day.

An important aspect that must be considered when adding binders is their influence on the burning behavior. All of the binders tested, including the cold-water-soluble starch, inhibited the reaction and the spark patterns of the sparklers.

## Wire

For the production of a sparkler, a carrier is needed. Commercially available sparklers use a copper-coated steel wire. The copper ensures that the heat is conducted along the wire of the sparkler, so that the sparkler burns well. The sparkler mixture presented here contains enough energy to burn well on a steel wire without a copper coating. The optimal steel wire diameter is 0.8 mm for sparklers with the mixture given below.

## Experimental procedure

The production of the sparklers takes about 45 min but the drying time (at least 2 h in the drying oven or 24 h in the air) and the time required to burn the sparklers must also be scheduled (Figure 1).

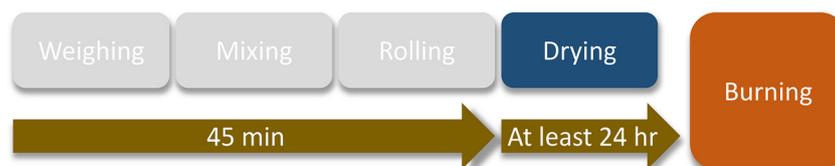


Figure 1: Experimental procedure of making sparklers.

## Materials

Strontium nitrate, iron powder, and cold-water-soluble starch can be purchased from standard chemical suppliers, for example, Acros Organics. A degree of purity of 99% of the strontium nitrate is enough; the degree of purity of the iron powder should be about 98%. A higher degree of purity is not recommended for the iron powder; if a higher degree of purity is used, the sparkler does not show the typical spark pattern for which the contained carbon is responsible. Aluminum dust or rather flakes that have a particle size smaller than 45  $\mu\text{m}$  can be bought from a pyrotechnics supplier, for example, Skylighter (Skylighter, 2020). Normal aluminum

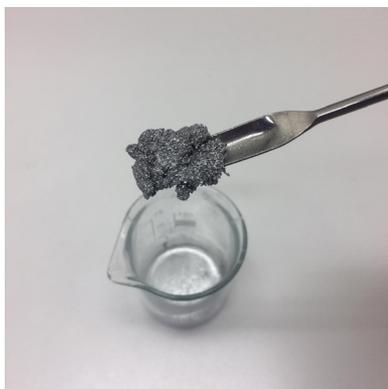
powder is not fine enough to create a good spark pattern. Furthermore, one steel wire that is 0.8 mm thick, a spatula, two 50 mL beakers, a 1.0 mL syringe, a drying oven, and a precision scale are needed.

## Making the sparklers

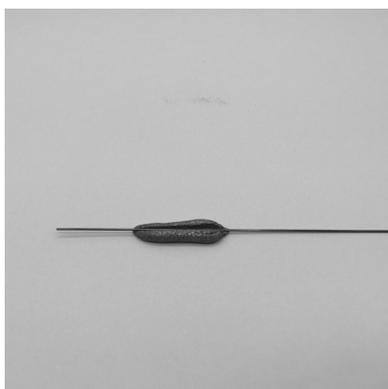
For the production of one sparkler, the following chemicals in the following quantities are required:

- 0.85 g strontium nitrate
- 0.10 g aluminum flakes (–325 mesh)
- 0.60 g iron powder (98%, –100 + 325 mesh)
- 0.20 g cold-water-soluble starch

These chemicals are mixed in a dry state until a homogeneous powder is formed. After the addition of water in the following step, it is important to work quickly to form the sparkler, because the sparkler mixture begins to harden after 3 min. Five to six drops of distilled water (about 0.3 mL) are added to the chemical mixture and the mixture is kneaded with a spatula until a sticky mass is formed to a single lump (Figure 2). This lump should have the same consistency as the clay or dough that children use for modeling. After this, protective gloves should be worn to roll the mixture to a cylindrical shape. An approximately 25 cm-long steel wire is pressed into the cylindrical shape (Figure 3) and then covered up again with the mixture. The sparkler is then rolled by hand (Figure 4). It is important to ensure that the sparklers are formed as uniformly as possible (Figure 5), to ensure the best possible burning behavior and spark pattern.



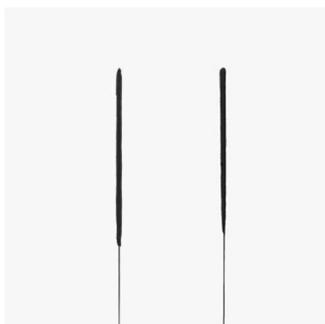
**Figure 2:** The lump of mixture used to make the sparkler.



**Figure 3:** The wire is pressed into the rolled-out mixture.



**Figure 4:** The sparkler is formed by rolling the mixture by hand.

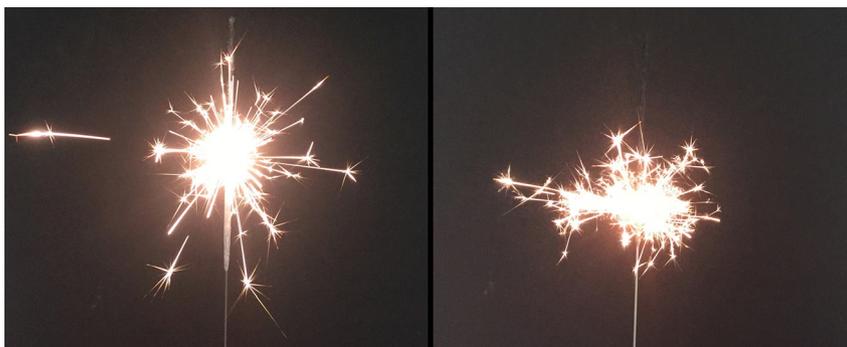


**Figure 5:** A self-made sparkler (left) and a bought sparkler (right).

After rolling, the sparkler is placed vertically in a clay pot filled with sand and is dried either for 24 h in the air or for 2 h at 70 °C in a drying oven. It is recommended to dry the sparklers for 24 h in the air, because drying in the oven leads to small cracks in the sparklers because of the fast drying process. However, these cracks do not affect the spark pattern of the sparklers.

### Burning the sparkler

Due to the emission of gas during the burning of the sparklers, the sparklers should only be burned in fume hoods or outside. After the sparkler is lit at the top, it burns down with a spark pattern similar to that of commercial sparklers (Figure 6). The sparklers should be burned in a noncombustible pot filled with sand and placed on a large, nonflammable surface. Because of the risk of hot drops and sparks, the burning sparklers must not be held in the hand. Leftover educts and unburnt sparkler mixtures should be dissolved in water and disposed of in a container for metal salt solutions. Burnt sparklers can be disposed of in a container for solids.



**Figure 6:** Spark pattern of a self-made sparkler (left) and a bought sparkler (right).

## Safety benefits of the school experiment

Because the strong oxidizer strontium nitrate is used in the sparkler mixture, together with the combustible substances iron powder and aluminum dust, the sparkler mixture is formally categorized as an explosive substance. In order to assess the hazardous potential of the newly developed sparklers, the Berthelot-Rot value  $B_R$  of the mixture was calculated and the final mixture was exposed to mechanical and thermal stress and also to electrostatic pulses. The Berthelot-Rot value  $B_R$  of the mixture with a density of  $2.19 \text{ g cm}^{-3}$ , which is the highest theoretical density, was calculated to be  $2180 \text{ kJ m}^{-3}$ , which is lower than the value of the Oppauer salt used for comparison, which was calculated to be  $3434 \text{ kJ m}^{-3}$  (density =  $1.74 \text{ g cm}^{-3}$ ) (Sućeška, 2018). Thus, the mixture can be considered to be relatively safe with respect to accidental explosions (Klapötke, 2019). In the impact sensitivity test (using the BAM drop hammer with a load of 40 J), the friction sensitivity test (load of 353 N), the steel-sleeve test (a nozzle plate with a hole of 2 mm in diameter), and the ESD test (electrical impulse of 1.5 J), the newly developed sparkler mixture could not be stimulated to react or explode. This shows that the mixture is not a hazardous, explosive substance (Figure 7) (Klapötke, 2019). In contrast to the self-made sparklers, some commercially available sparklers reacted so strongly to thermal stress that they did not pass the steel-sleeve test (Figure 8).



**Figure 7:** Clockwise from top: Impact sensitivity test, friction sensitivity test, steel-sleeve test, and ESD test.



**Figure 8:** Left: Although the steel sleeve used in the steel-sleeve test with the self-made sparklers is deformed at the bottom, the test can still be considered negative. Right: The steel sleeve of a steel-sleeve test used for the bought sparklers was blown up into seven parts. Thus, the steel-sleeve test was not passed.

Thus, the appropriate production and burning of the new sparkler mixture described above can be classified as safe. Nonetheless, the regulations of the respective country for conducting experiments with energetic materials at schools and in experiments for school students must be observed. For example, in Germany, school students in the fifth grade, around the age of 11, are allowed to produce these sparklers (KMK, 2019).

## School use

Every school student knows sparklers and, therefore, they are a good example from the school student's everyday life for redox reactions. To understand the chemical processes behind the experiment, students should be familiar with the basics of redox chemistry. The idea of the transfer of oxygen from the initial class is sufficient. Astonishingly, pyrotechnics is rarely used in chemistry education although the topic could attract students' interest (Sjøberg & Schreiner, 2010) and it provides many links to the chemistry curriculum. Oxidizers and redox reactions can be found in all chemistry curricula worldwide (ACS, 2018; Department for Education of England, 2015) and the experiment can be used as a simple school student experiment to demonstrate these topics from chemistry education. Depending on the grade, a teaching unit on this topic can be used to deal with various parts of the redox theory in more detail with the school students.

The experiment is particularly suitable for intensifying the topics of oxidizing agents and oxidation of metals and for changing the concept of the transfer of oxygen to the idea of redox reactions as electron transitions. Furthermore, pyrotechnics in general and sparklers in particular can also be found in some curricula. A use at upper secondary level to illustrate the principles of green chemistry is also conceivable, since the substitution of a substance with a less harmful and less toxic alternative can be easily understood by the school students. In the sense of "minds-on chemistry" there is also the opportunity to discuss the possibilities and contributions of chemistry to environmental protection.

## Students' experience and comments

The experiment was presented on several conferences, seminars and chemistry teacher-training courses on the topic of modern materials. As a result, the experiment has already been used in regular chemistry classes. It was reported that the school students could easily produce the sparklers and that this lesson content of sparklers will be repeated with other students. In addition, a short form of the instructions for the experiment will be published in the new edition of the Bavarian collection of experiments for chemistry education, "Chemistry – but safe", which will be available in spring 2021.

Although the experiment was designed for school students in the eighth grade, who are mostly over the age of 14, it can also be carried out by younger school students. In our school student laboratory, more than 40 school students in the fifth grade, around the age of 11, and more than 600 school students over the age of 14 successfully produced the newly developed sparklers. In addition to the production of sparklers, the school student laboratory program contains four further stations that can be worked on by the school students. In surveys at the end of the days spent in the school laboratory, the station for making sparklers is always the most popular station among the school students, as these exemplary comments from the school students show:

"It's a nice example from everyday life and an exciting chemical topic."

"I liked the combination of theory combined with practical work."

"The experiments helped me to understand how to make sparklers and what chemical processes are behind a sparkler."

"I liked being able to manufacture my own sparkler."

"Discussing the aspect of the environmental problems of pyrotechnics was exiting."

With this experiment, the topic of redox chemistry can be intensified using an interest-promoting (Sjøberg & Schreiner, 2010) everyday chemical product. Additionally, school students get an insight into the toxicological and environmental problems of commercial sparklers. Students are encouraged to reflect critically on the daily

use of chemical products and, at the same time, they are shown that chemical research may reduce environmental problems.

For example, in our student laboratory, supervisors were often asked by school students why these new sparklers are not available in shops yet. The students said that this would be much more reasonable because they are much better for health and the environment. After the experiment, other students came to the conclusion that, in the future, they would like to do without New Year's Eve fireworks for the sake of the environment. These suggestions and comments show that the students may have changed their opinions and attitudes. The majority of students who conducted the experiment in our science laboratory for school students stated that the experiment increased their interest in the topics of pyrotechnics and redox chemistry in particular, as well as in chemistry in general.

Teachers receive an instructional guide to assist them in carrying out this experiment with school students. With this guide, it is possible to produce these new, fully functional sparklers in a simple, cost-effective, and safe manner. Furthermore, this simple experiment with such a popular object from the field of pyrotechnics is also fun for school students. The future development of this experiment could involve the further scientific development of a sparkler that uses an ecologically safe oxidizer such as potassium nitrate.

SPONSORED BY THE



Federal Ministry  
of Education  
and Research

**Acknowledgments:** The authors wish to thank the school students who tried out the experiment during its development in our student laboratory and who contributed to its improvement. This project is part of the “Qualitätsoffensive Lehrerbildung”, a joint initiative of the Federal Government and the *Länder* which aims to improve the quality of teacher training. The programme is funded by the Federal Ministry of Education and Research. The authors are responsible for the content of this publication. The authors declare no competing financial interest.

**Author contributions:** All the authors have accepted responsibility for the entire content of this submitted manuscript and approved submission.

**Research funding:** This research was funded by Bundesministerium für Bildung und Forschung (Qualitätsoffensive Lehrerbildung).

**Conflict of interest statement:** The authors declare no conflicts of interest regarding this article.

## References

- ACS. (2018). *ACS guidelines and recommendations: For teaching middle and high school chemistry*. Washington, D.C.: ACS Chemistry for Life. American Chemical Society. <https://www.acs.org/content/acs/en/education/policies/acs-guidelines-and-recommendations-for-teaching-high-school-chemistry.html> [Accessed 21 Dec 2020].
- Andre, C. (2020). *Chemie? – Aber sicher! Experimente kennen und können!: Chemistry? – But safe! Knowing experiments and how to!* (5. Auflage). Akademiebericht/Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung Dillingen: Vol. 475. Dillingen a. d. Donau: Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung (ALP).
- Bast, V. (2013). *Warenprobe: Wie eine Wunderkerze entsteht: Product sample: How a sparkler is made*. Hamburg: Impulse. <https://www.impulse.de/leben/oh-wunder/2011512.html#4> [Accessed 21 Dec 2020].
- Department for Education of England. (2015). *National curriculum in England: Science programmes of study*. London: Department for Education.
- Helmenstine, A. (2015). *How to make a homemade sparkler – 2 simple recipes*. Myrtle Beach: Sciencenotes.org. <https://sciencenotes.org/how-to-make-a-homemade-sparkler-2-simple-recipes/> [Accessed 21 Dec 2020].
- Helmenstine, A. (2018). *Are sparklers safe on cakes? Sparklers look great but present safety hazards*. New York: ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/are-sparklers-safe-on-cakes-607432> [Accessed 21 Dec 2020].
- Jennings-White, C., & Kosanke, K. L. (1995). Hazardous chemical combinations: A discussion. *Journal of Pyrotechnics*, (2), 333–345.
- Keeney, A., Walters, C., & Cornelius, R. (1995). Making sparklers: An introductory laboratory experiment. *Journal of Chemical Education*, 72(7), 652–653.
- Klapötke, T. M. (2019). *Chemistry of high-energy materials* (5th ed.). *De Gruyter textbook*. Berlin/Boston: De Gruyter.
- KMK. (2019). *Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht: RiSU. Guideline for safety in education*. Berlin: Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland.

- Martin, C., & Vries, T. D. (2004). Chemie der Wunderkerze – ein Thema nicht nur in der Weihnachtszeit. Chemistry of the sparkler – a topic not only at Christmas time. *CHEMKON*, 11(1), 13–20.
- NCBI. (2020a). *Barium nitrate*. Bethesda, Maryland: U.S. National Library of Medicine – National Center for Biotechnology Information. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24798> [Accessed 21 Dec 2020].
- NCBI. (2020b). *Strontium nitrate*. Bethesda, Maryland: U.S. National Library of Medicine – National Center for Biotechnology Information. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24848> [Accessed 21 Dec 2020].
- Shimizu, T. (2010). *Fireworks: The art, science and technique* (4th ed.). Midland, Tex.: Pyrotechnica Publications.
- Sjøberg, S., & Schreiner, C. (2010). *The ROSE project. An overview and key findings*. Oslo: University of Oslo. <https://roseproject.no/network/countries/norway/eng/nor-Sjoberg-Schreiner-overview-2010.pdf> [Accessed 21 Dec 2020].
- Skylighter. (2020). *Aluminum, atomized, spherical, 23 micron*. <https://www.skylighter.com/collections/chemicals/products/aluminum-atomized-spherical-23-micron> [Accessed 21 Dec 2020].
- Sučeška, M. (2018). EXPL05. Computer program to calculate the Berthelot-Rot value  $B_R$ .
- Welter, F. J. (1907). Welter, Franz Jacob, AT000000035606B.

## 5.5 Publikation 5: Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: ein bewährter Schulversuch im neuen Licht

Michael A. Martens, Laura Pohl, Magdalena Rusan, Thomas M. Klapötke & Stefan Schwarzer

SCHEID, M., POHL, L., RUSAN, M., KLAPÖTKE, T. M. & SCHWARZER, S. (2020, online first). Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: Ein bewährter Schulversuch im neuen Licht. *CHEMKON*. DOI: 10.1002/ckon.202000054.

### **Beiträge der Autoren:**

Die Entwicklung der Wunderkerzen sowie die Erprobung der Unterrichtseinheit im Schülerlabor wurde von Michael A. Martens unter Anleitung von Stefan Schwarzer durchgeführt. Laura Pohl entwickelte im Rahmen ihrer Zulassungsarbeit die Wunderkerzen mit dem Oxidationsmittel Kaliumnitrat unter der Anleitung von Michael A. Martens. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens geschrieben, Laura Pohl schrieb den Absatz zur Entwicklung von Wunderkerzen mit Kaliumnitrat. Magdalena Rusan und Thomas M. Klapötke berieten wissenschaftlich und führten die Tests zur Charakterisierung der energetischen Eigenschaften der Wunderkerzen durch.

### **Copyright:**

Reprinted with permission from *CHEMKON*, 2022. Copyright 2020 John Wiley and Sons.



# Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: ein bewährter Schulversuch im neuen Licht

Michael Scheid,<sup>[a, b]</sup> Laura Pohl,<sup>[a]</sup> Magdalena Rusan,<sup>[a]</sup> Thomas M. Klapötke<sup>[a]</sup> und Stefan Schwarzer<sup>\*[b]</sup>

**Zusammenfassung:** Wunderkerzen bieten für den Chemieunterricht vielfältige Anknüpfungspunkte. Nicht nur Lehrplaninhalte der Redoxchemie und Oxidationsmittel können vertieft, sondern auch Umweltaspekte aufgezeigt und mit den hier vorgestellten neu entwickelten und umweltfreundlicheren Wunderkerzen ein Einblick in aktuelle Forschungsthemen aus dem Bereich der Pyrotechnik gegeben werden. Im Fokus der Unterrichtseinheit steht die Herstellung von Wunderkerzen als Schülerexperiment. Ergänzend wird in einem Modellexperiment die Auswirkung auf lebende Organismen dieser neu entwickelten Wunderkerzenrezeptur sowie der herkömmlichen Wunderkerzenzusammensetzung verglichen. Abschließend werden im Artikel ausführlich die rechtlichen Rahmenbedingungen der Wunderkerzenherstellung als Schülerexperiment im Hinblick auf die Sicherheit thematisiert. Mit Hilfe von Sensitivitätstests konnte nachgewiesen werden, dass die hier vorgestellten Wunderkerzenmischungen keine explosiven Gemische sind. Somit dürfen diese Mischungen im Einklang mit der aktuellen Fassung der RiSU 2019 erstmals auch von Schülerinnen und Schülern hergestellt werden.

**Stichworte:** Wunderkerze · Pyrotechnik · Redoxchemie · Sicherheit

## Less harmful and less toxic sparklers: a well-known school experiment in a new light

**Abstract:** Sparklers offer a variety of topics for chemistry education. Redox chemistry and oxidizing agents can be found in nearly all chemistry curricula worldwide. Furthermore, environmental aspects can be shown and an insight into current research topics of pyrotechnics can be provided. The focus of the unit is the production of sparklers as a school student experiment. In addition, the effects of sparklers products on living organisms are tested in a model experiment. Finally, the conditions of producing sparklers as a school student experiment are discussed. The sparkler mixtures passed several sensitivity tests. For this reason, school students can produce the sparklers according to the current German safety guidelines in education.

**Keywords:** sparkler · pyrotechnics · redox chemistry · safety

## 1. Einleitung

In den Medien wird jedes Jahr rund um Silvester über die von Pyrotechnik verursachte Umweltverschmutzung diskutiert. So titelte der Schweizer Tages-Anzeiger zu Silvester 2018 „Wie das Feuerwerk die Luft verpestet“ [1]. Neben der Feinstaubbelastung wird in dem Artikel auch über die Belastung durch emittierte Metalle und Schwermetalle berichtet. Diese Debatten sind ein passender Anlass, um mit Schülerinnen und Schülern tiefer in das Themengebiet der Pyrotechnik einzusteigen und ihre Auswirkungen auf die Umwelt zu diskutieren.

Dabei bietet die Pyrotechnik als interessensfördernder Kontext [2] für den Chemieunterricht zahlreiche Lehrplanbezüge: Oxidationsmittel, Redox-Reaktionen, Atombau und Flammenfärbung. Zudem wird die Wunderkerze (Abb. 1) in mehreren deutschen Lehrplänen [3,4] explizit als Beispiel für Redox-Reaktionen und Pyrotechnik genannt. Darüber hinaus

kann anhand der Wunderkerze die Umweltproblematik von Pyrotechnik mit Schülerinnen und Schülern ganz konkret erarbeitet und ein Beitrag der Chemie als Wissenschaft im Rahmen einer Nachhaltigkeitsdebatte aufgezeigt werden.

Wunderkerzen werden häufig im Schülerexperiment hergestellt. Aufgrund der aktuellen RiSU [5] ist dies aber rechtlich problematisch, da die Reaktivität der Wunderkerzenmischung nicht einschätzbar ist. Die in diesem Artikel vorgestellten Wunderkerzenmischungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis für energetische Materialien eingehend charakterisiert, wodurch diese Problematik ausgeschlossen werden konnte.

## 2. Chemische Grundlagen der Wunderkerze

Wunderkerzen bestehen allgemein aus fünf Hauptbestandteilen [6–8]:

- Oxidationsmittel: Sauerstofflieferant für die Oxidation der Metalle
- Eisen (in Pulverform): Erzeugung der Funken
- Aluminium und Magnesium (in Pulver- oder Staubform): Beschleunigung der chemischen Reaktion
- Bindemittel: Fixierung der Reaktionsmasse auf dem Draht
- Draht: Trägermaterial der Wunderkerzenmischung

Häufig werden der Mischung außerdem weitere chemische Stoffe wie beispielsweise Kohle, Zucker, Calciumcarbonat oder Borax hinzugefügt, um eine möglichst stetige Reaktion mit gleichmäßigem Funkenflug und ohne Tropfen von heißer

[a] M. Scheid, L. Pohl, M. Rusan, T. M. Klapötke  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Department Chemie  
Butenandtstraße 5-13  
81377 München

[b] M. Scheid, S. Schwarzer  
Eberhard Karls Universität Tübingen  
Didaktik der Chemie  
Auf der Morgenstelle 18  
72076 Tübingen  
\* E-Mail: stefan.schwarzer@uni-tuebingen.de





Abb. 1: Brennende, selbst hergestellte Wunderkerze

Schlacke zu erhalten [7]. Auf diese Zusatzstoffe wird im vorliegenden Artikel allerdings nicht eingegangen, da sie in den hier vorgestellten Wunderkerzen nicht enthalten sind. Der kommerzielle Herstellungsprozess von Wunderkerzen wird unter [7] bebildert dargestellt.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass bei der Verbrennung von Wunderkerzen eine Vielzahl an verschiedenen Reaktionsprodukten entsteht [9]. Um die Vorgänge beim Abbrennen einer Wunderkerze verständlich darzustellen, werden in der folgenden Betrachtung der einzelnen Bestandteile nur die chemischen Reaktionen aufgezeigt, welche für das Verständnis elementar sind.

## 2.1 Oxidationsmittel

Das Oxidationsmittel von in Deutschland käuflichen Wunderkerzen ist Bariumnitrat (Abb. 2), da es preiswert und stark

oxidierend ist. Aufgrund des enthaltenen Barium-Kations ist es toxisch (Tabelle 1).

Auf Wunderkerzenverpackungen wird stets darauf hingewiesen, dass in den Wunderkerzen Bariumnitrat enthalten und somit das Verschlucken der Wunderkerze oder ihrer Produkte sowie das Einatmen des Wunderkerzenrauchs gesundheitsschädlich ist (Abb. 2). Bedeutend unbedenklicher sind die Oxidationsmittel Strontium- und Kaliumnitrat (Tabelle 1). Die Toxizität wird für alle drei Oxidationsmittel anhand des sogenannten LD<sub>50</sub>-Werts abgeschätzt. Dieser gibt an, welche Menge eines Stoffes für 50 Prozent der Population tödlich wirkt. In diesem Fall beziehen sich die Angaben der letalen Dosen auf die orale Aufnahme der Nitrate durch Ratten.

Neben der Toxizität ist bei der Entwicklung von nachhaltigen Produkten auch ihre Umweltverträglichkeit ein wichtiges Kriterium. Die Umweltverträglichkeit der drei in diesem Artikel beschriebenen Wunderkerzenmischungen wurde mit Hilfe einer Indikatorpflanze verglichen. Hierzu werden die Rückstände der abgebrannten Wunderkerzenmischungen in Wasser gelöst und ihre Auswirkungen auf den Modellorganismus Wasserlinse beobachtet. Dieses Modellexperiment kann auch als Schülerexperiment durchgeführt werden (vgl. Kap. 3.3). Soll im Unterricht nur eine bariumnitratfreie Wunderkerze hergestellt werden, sollte als Oxidationsmittel Strontiumnitrat verwendet werden. Damit werden Wunderkerzen hergestellt, die im Abbrennverhalten käuflichen Wunderkerzen sehr nah kommen und gleichzeitig ökologisch sowie toxikologisch weitaus unbedenklicher als käufliche Wunderkerzen sind. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist zudem, dass Wunderkerzenmischungen mit Strontiumnitrat die beste Konsistenz aufweisen, um sie durch Rollen in die gewünschte Form zu bringen. Sollen besonders umweltverträgliche Wunderkerzen hergestellt werden, ist die Mischung mit dem Oxidationsmittel Kaliumnitrat zu wählen. Neben chemischen Reaktionen vom gewählten

Tab. 1: Toxizität der eingesetzten Oxidationsmittel.

Oxidationsmittel	LD <sub>50</sub> Ratte, oral	Gefahrstoffhinweise
Kaliumnitrat	3750 mg/ kg [11]	
Strontiumnitrat	2750 mg/ kg [12]	
Bariumnitrat	355 mg/ kg [13]	Gesundheitsschädlich bei Verschlucken, besondere Ersatzstoffprüfung vor dem Einsatz im Schulunterricht notwendig [14].

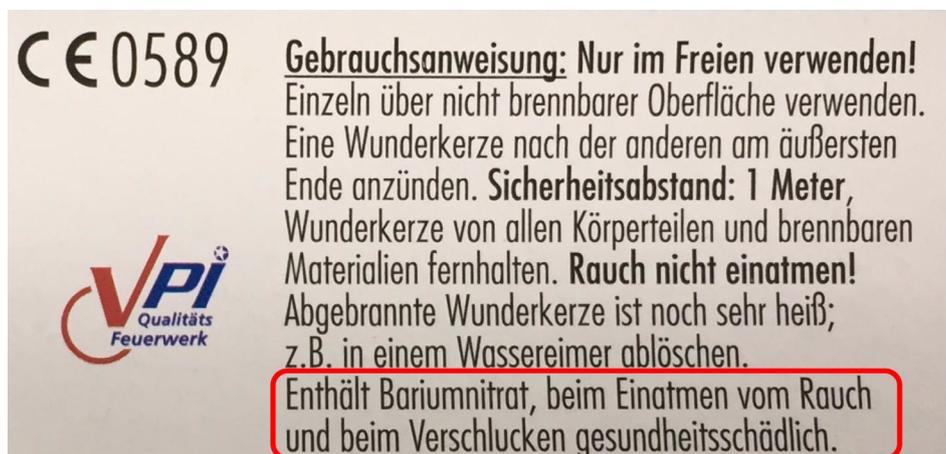
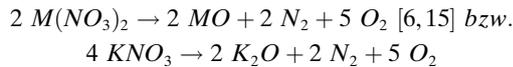


Abb. 2: Warnhinweise auf der Rückseite einer Wunderkerzenverpackung [10]

Oxidationsmittel mit Aluminium und Eisen, welche in den beiden folgenden Abschnitten beschrieben werden, ist bei der Verbrennung der Wunderkerze auch die Thermolyse des Oxidationsmittels selbst denkbar:



M steht in dieser und in allen anderen angeführten Reaktionsgleichungen stellvertretend für ein zweiwertiges Metallkation, wie beispielsweise  $Ba^{2+}$  oder  $Sr^{2+}$ .

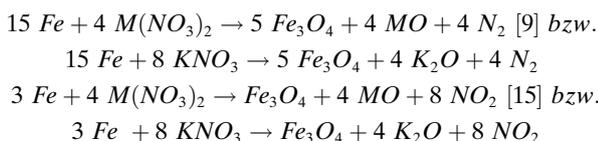
## 2.2 Eisen

Das Eisenpulver in der Wunderkerzenmischung sorgt für die Funken, indem es mit dem Sauerstoff der Luft zu Magnetit ( $Fe_3O_4$ ) oxidiert wird. Diese Oxidation ist somit die zentrale chemische Reaktion und für den pyrotechnischen Effekt des Funkenflugs einer Wunderkerze verantwortlich. Der entstandene Magnetit konnte mittels Röntgendiffraktometrie nachgewiesen werden. Im Schülerversuch kann das Produkt Magnetit zudem mit Hilfe eines Magneten identifiziert werden, da es als einziges Eisenoxid magnetische Eigenschaften aufweist. Bei der Oxidation von Eisen zu Magnetit entstehen die für Wunderkerzen typischen warmweiß bis gelb leuchtenden Funken. Die Größe der Eisenpartikel sowie ihr Kohlenstoffgehalt sind hierbei ausschlaggebend für ihre Erscheinung während der Verbrennung. Um die charakteristische Verzweigung der Funken zu erhalten – diese sind auf Fotos als Sternchen zu erkennen – ist ein Kohlenstoffanteil von ein bis zwei Prozent notwendig [16]. Für ein gleichmäßiges Funkenbild sorgt eine Eisenpulvermischung mit einer Partikelgröße von 44  $\mu m$  bis 149  $\mu m$ . Dies entspricht der Fraktion, die beim Sieben einer Eisenpulvermischung durch ein Sieb mit der Maschenweite 100 mesh und gleichzeitig nicht durch ein Sieb mit der Maschenweite 325 mesh passt. Dies wird als -100+325 mesh bezeichnet. Kleinere Partikel reagieren so schnell mit dem Luftsauerstoff, dass sie nicht als Funken auszumachen sind, größere Partikel hingegen führen zu einem zu heftigen und unregelmäßigen Funkenflug. Die Reaktionsgleichung bei der Oxidation von Eisen mit dem Sauerstoff der Luft ist dabei folgende



Wird eine Wunderkerze in einer sauerstofffreien Umgebung abgebrannt, so glüht diese zwar, der für Wunderkerzen charakteristische Funkenflug bleibt aber aus. Mit diesem Experiment lässt sich nachweisen, dass an der Oxidation der Eisenpartikel außerhalb der festen Wunderkerze der Luftsauerstoff beteiligt ist. Um den Funkenflug zu ermöglichen, ist ein Überschuss an Eisen gegenüber dem Oxidationsmittel in der Wunderkerzenmischung notwendig.

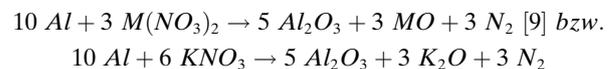
Des Weiteren reagiert in der Wunderkerze das Eisenpulver mit dem Oxidationsmittel. Diese chemische Reaktion ist nicht als Funkenflug erkennbar, da sie im Inneren der Wunderkerze abläuft. In der Literatur werden hierzu zwei mögliche chemische Reaktionen beschrieben



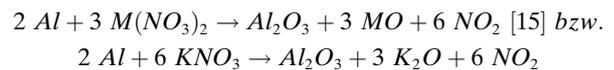
## 2.3 Aluminium und Magnesium

Aluminium und Magnesium werden den Wunderkerzen als Energielieferanten beigemischt. Bei der Oxidation von elementarem Aluminium werden große Mengen an Energie und Gasen frei [17]. Die Gasentwicklung ist notwendig, damit Eisenpartikel aus der Wunderkerze austreten und so der beschriebene Funkenflug möglich wird [9]. Je größer der Zertei-

lungsgrad des Aluminiums in der Wunderkerzenmischung, desto homogener ist das Abbrennverhalten der Wunderkerze. Daher wird zur Herstellung der hier beschriebenen Wunderkerze Aluminiumstaub eingesetzt. Aluminium- und magnesiumfreie Wunderkerzen hingegen glühen nur und zeigen keinen Funkenflug. Aluminiumstaub führt in der Wunderkerzenmischung bereits bei dem geringen Anteil von sechs bis acht Prozent des Gesamtgewichtes zu einem gleichmäßigen, moderaten Funkenflug, wie er von industriellen Wunderkerzen bekannt ist. Größere Aluminiumpartikel führen zu ungleichmäßigem Funkenflug, welcher abwechselnd zu gering und zu stark ausfällt. Bei der Verwendung von Aluminiumstaub treten zudem unerwünschte heiße Funken nicht auf, welche ein Gefahrenpotential bergen und an ihrer kaltweißen Farbe optisch gut zu identifizieren sind. Die optimale Partikelgröße des Aluminiumstaubs sind Aluminiumplättchen (im Handel als „flaky“ bezeichnet), welche kleiner als 45  $\mu m$  sind (-325 mesh). Alle in diesem Artikel angegebenen Mischungen enthalten phlegmatisiertes Aluminium, da der Umgang mit diesem weitaus ungefährlicher ist. Bei der Reaktion von Aluminium mit dem Oxidationsmittel sind mehrere chemische Reaktionen möglich. Dabei können als Nebenprodukte sowohl elementarer Stickstoff



als auch Stickstoffdioxid



entstehen.

Das dritte häufig in Wunderkerzen eingesetzte Metall ist Magnesium [6]. Wie auch Aluminium erhöht dieses die Abbrandtemperatur der Wunderkerze und sollte deswegen ebenfalls mit möglichst großem Zerteilungsgrad eingesetzt werden. Magnesium reagiert mit Wasser unter Wasserstoffentwicklung, weshalb mit hygroskopischen Salzen wie Nitratsalzen gefährliche chemische Reaktionen ablaufen können [17]. Es wird aus diesem Grund in der hier vorgestellten Versuchsanleitung auf den Einsatz von Magnesium in der Wunderkerzenmischung verzichtet. Für einen ansprechenden Funkenflug wie der einer käuflichen Wunderkerze reicht Aluminium aus.

Wenn das Kation des Oxidationsmittels zur Flammenfärbung angeregt werden soll, ist eine Magnesiumzugabe erforderlich. Derlei Wunderkerzen sind nicht in Deutschland, aber in anderen europäischen Ländern erhältlich. Durch die bei der Oxidation von Magnesium freigesetzte Energie und die damit einhergehende Erhöhung der Abbrandtemperatur können Intermediate wie beispielsweise BaOH und SrOH entstehen, die als Emitter fungieren [18]. Die bei der Oxidation von Aluminium freiwerdende Energie reicht hierfür nicht aus. Deswegen sind die in diesem Artikel vorgestellten Wunderkerzenmischungen in Bezug auf ihre Flammenfärbungen farblos, während dieselben Mischungen mit einem Zusatz von Magnesiumpulver beim Abrennen einen farbigen Schein, in Abhängigkeit vom eingesetzten Kation, zeigen.

## 2.4 Bindemittel

Als Bindemittel wird in käuflichen Wunderkerzen Dextrin verwendet [7]. Für die Herstellung von Wunderkerzen, welche durch das im folgenden Abschnitt beschriebene Ausrollverfahren geformt werden sollen, ist dieses Bindemittel allerdings nicht geeignet, da es zu einer sehr klebrigen Masse führt, die nicht durch Ausrollen in Form gebracht werden kann. Für die Herstellung der neu entwickelten Wunderkerzen wurden deswegen auch Speisestärke, Stärke, kaltlösliche

Stärke, Kleister und Mehl getestet, wobei sich kaltlösliche Stärke als am geeignetsten erwies. Eine mit diesem Verfahren hergestellte Wunderkerze benötigt in der Wunderkerzenherstellungsmischung auch nur geringste Mengen an Wasser, wodurch eine schnelle Trocknung möglich ist. Diese Wunderkerzen sind bereits nach zwei Stunden bei 70 °C im Trockenschrank abbrennbereit. Werden Wunderkerzen mit kaltlöslicher Stärke hergestellt, gelingt das Ausrollen wie erwähnt problemlos, handelsübliche Stärke hingegen führt oftmals nicht zur gewünschten Konsistenz und muss für die Verkleisterung erwärmt werden. Lösliche Stärke enthält nur geringe Mengen an Amylopektin und ist für die Wunderkerzenherstellung gänzlich ungeeignet.

Ein nicht außer Acht zu lassender Aspekt beim Zusatz von Bindemitteln ist deren Einfluss auf das Abbrennverhalten. Alle getesteten Bindemittel, so auch die kaltlösliche Stärke, hemmen die Reaktion und den Funkenflug der Wunderkerze.

### 2.5 Draht

Für die Chemikalienmischung der Wunderkerze wird ein Träger benötigt. Bei im Handel käuflichen Wunderkerzen wird häufig ein mit Kupfer beschichteter Stahldraht verwendet. Dabei sorgt das Kupfer für die Wärmeleitung zu benachbarten Reaktionsstellen, sodass die Wunderkerze optimal durchbrennt. Die hier vorgestellten Wunderkerzenmischungen wurden so entwickelt, dass sie mit einem einfachen Stahldraht aus dem Baumarkt gut funktionieren. Der optimale Durchmesser des Stahldrahtes für die selbst hergestellten Wunderkerzen liegt bei 0,8 mm. Dünnere Drähte schmolzen beim Abbrennen der Wunderkerze oftmals durch, bei dickeren Drähten hingegen erloschen in den Laborversuchen die Wunderkerzen, was auf die höhere Wärmekapazität dieser Drähte zurückzuführen ist.

## 3. Unterrichtseinheit zu Wunderkerzen

Grundsätzlich dürfen die angeführten Wunderkerzenmischungen von Schülerinnen und Schülern ab der 5. Jahrgangsstufe gehandhabt werden. Im Schülerlabor hat sich gezeigt, dass ihnen dies mit Unterstützung eines Betreuenden meist gut gelingt. Um die chemischen Prozesse sowie das Modellexperiment zur Umweltverträglichkeit der Wunderkerzenmischungen zu verstehen, müssen die Schülerinnen und Schüler aber mit den Grundlagen der Redox-Chemie vertraut sein. Da dies im Gymnasium und an der Realschule in der Regel ab der 9. oder 10. Jahrgangsstufe der Fall ist, ist die im Folgenden vorgestellte Unterrichtseinheit für Schülerinnen und Schüler dieser beiden Jahrgangsstufen konzipiert. Die Unterrichtseinheit wurde bereits mit einigen hundert Schülerinnen und Schülern erprobt.

### 3.1 Einstieg in die Thematik

Zu Beginn der Unterrichtseinheit können die Schülerinnen und Schüler befragt werden, wer bereits das Abbrennen von Wunderkerzen auf einem Kuchen, einer Torte oder einem Muffin erlebt hat. In den meisten Fällen haben dies etwa drei Viertel der befragten Schülerinnen und Schüler bereits gesehen. Alternativ kann das Terra X-Video „Wunderkerzen ohne Gift“ [19] als Einstieg eingesetzt werden, das in einer Zusammenarbeit des ZDF und der LMU Chemiedidaktik entstanden ist. Daraufhin wird zur Auslösung eines kognitiven Konfliktes eine handelsübliche Wunderkerze in ein Stück Knetmasse gesteckt und im Abzug über einer sauberen, weißen Oberfläche abgebrannt. Bei genauerer Betrachtung fällt den Schülerinnen und Schülern nun auf, dass nach dem Abbrennen schwarze Partikel auf der weißen Oberfläche zu sehen sind. An dieser Stelle setzt oftmals eine spontane Entrüstung ein, da dies ja

unappetitlich und möglicherweise auch gesundheitsschädlich sei. Um diese Frage wissenschaftlich zu beantworten, recherchieren die Schülerinnen und Schüler auf der Verpackung (siehe Abb. 2), in Fachliteratur und im Internet, welche Chemikalien in der Wunderkerze enthalten sind und welche Wirkungen diese auf den menschlichen Körper haben können. Sehr schnell gelangen sie daraufhin zu der Erkenntnis, dass vor allem von dem Oxidationsmittel Bariumnitrat gesundheitliche Gefahren ausgehen können.

Auf die mögliche Frage der Lehrkraft nach alternativen Oxidationsmitteln schlagen die Schülerinnen und Schüler häufig Strontiumnitrat vor, da sie bereits um die ähnlichen Eigenschaften von Elementen einer Periode im PSE wissen. Zudem fragen manche Schülerinnen oder Schüler, ob es auch das Salz Calciumnitrat gibt und in einigen Fällen wird Kaliumnitrat vorgeschlagen, welches den Schülerinnen und Schülern höherer Klassenstufen als Oxidationsmittel bekannt ist, z. B. aus Show-Versuchen wie der „Hölle der Gummibären“.

### Tipps und Tricks rund um die Herstellung von Wunderkerzen

- Nur die in der Versuchsanleitung angegebene Wassermenge zugeben, auch wenn es zu Beginn oftmals als nicht ausreichend erscheint.
- Die Wunderkerzenmasse sollte vor dem Ausrollen noch mal kurz in der Hand durchgeknetet werden. Dies erhöht die Dichte und verhindert ein Bröckeln der Masse beim Ausrollen.
- Bröckelt die Wunderkerzenmasse beim Ausrollen, so wurde zu langsam gearbeitet oder eine nicht geeignete Stärke verwendet.
- Um herauszufinden, ob eine Stärke kaltlöslich ist, wird als Vortest eine Spatelspitze Stärke in etwas kaltes Wasser gegeben und verrührt. Setzt sich die Stärke nach dem Rühren am Boden ab, ist sie nicht kaltlöslich und somit nicht geeignet, die Wunderkerzenmasse zu fixieren. Bildet sich nach dem Rühren eine kleisterartige Konsistenz, ist die Stärke kaltlöslich und eignet sich für die Herstellung der Wunderkerze. Diese kleisterartige Konsistenz bildet auch Sahnesteif mit Wasser aus.
- Der Aluminiumstaub ist maßgeblich für das Abbrennverhalten der Wunderkerze verantwortlich. Funkt die Wunderkerze nicht wie gewünscht, ist der Aluminiumstaub nicht fein genug oder es wurde die falsche Menge zugeetzt.
- Auch andere Aluminiumstäube als der angegebene funktionieren. Diese verteilen sich aber oft sehr leicht und sind deswegen nicht für den Einsatz im Schülerexperiment geeignet.
- Soll nur eine Wunderkerze hergestellt und nicht die gesamte Unterrichtseinheit durchlaufen werden, empfiehlt es sich die Wunderkerzenmischung mit Strontiumnitrat herzustellen, da diese Mischung die beste Konsistenz zum einfachen Formen der Wunderkerze besitzt.
- Die Korngröße des Nitratsalzes hat Einfluss auf das Abbrennverhalten sowie das Formen der Wunderkerze. Je feiner das für die Mischung eingesetzte Salz ist, desto besser kann die Wunderkerze geformt werden. Gleichzeitig nimmt aber mit einem feiner gemahlten Nitratsalz auch die Fähigkeit der Wunderkerze zum Funkensprühen ab.
- Die einzelnen Schritte der Wunderkerzenherstellung werden in einem kurzen Video veranschaulicht [23].

Daran anschließend stellen die Schülerinnen und Schüler selbst Wunderkerzen mit den Oxidationsmitteln Barium-, Strontium- und Kaliumnitrat her.

### 3.2 Herstellung und Abbrennen von Wunderkerzen

Die Wunderkerzenherstellung als Schülerexperiment benötigt etwa 45 Minuten (Abb. 3). Dabei stellen je zwei Schülerinnen und Schüler gemeinsam eine Wunderkerze her. Vor der praktischen Arbeit sollte eine Zuweisung der unterschiedlichen Oxidationsmittel zu einzelnen Schülergruppen erfolgen, sodass für den darauffolgenden Modellversuch Wunderkerzen mit den verschiedenen Nitraten zur Verfügung stehen.

Eisen, Barium-, Strontium- und Kaliumnitrat können über die bekannten Chemikalienhändler bezogen werden. Bei den Nitraten ist eine Reinheit von 99% ausreichend, das Eisenpulver sollte eine Reinheit von maximal 98% haben, damit die charakteristischen Verzweigungen der Funken entstehen können. Die Eisenpartikelgröße sollte zwischen 44 µm und 149 µm (-100 + 325 mesh) liegen. Handelsübliche Eisenpulver bewegen sich üblicherweise in diesen Größenordnungen, sodass ein Sieben und somit der Kauf der Siebe meist nicht nötig ist. Aluminiumpulver ist für einen homogenen Funkenflug nicht fein genug. Aluminiumstaub oder Aluminiumplättchen mit der optimalen Partikelgröße von bis zu 45 µm (-325 mesh) können im Internet von Pyrotechnikhändlern wie beispielsweise Pyro-Powders.de bezogen werden [20]. Damit die Wunderkerzen problemlos geformt werden können, ist kaltlösliche Stärke unerlässlich, welche aber oft nur in sehr großen Gebinden erhältlich ist [21]. Eine Alternative aus dem Supermarkt ist „Sahnesteif“ von Dr. Oetker, in welchem kaltlösliche Stärke enthalten ist. Da die Zusammensetzung dieses Bindemittels anders als die von kaltlöslicher Stärke ist, wird für den Versuchsansatz mit Sahnesteif jeweils ein eigenes Mischungsverhältnis angegeben.

Darüber hinaus wird ein 0,8 mm dicker Stahldraht [22], zwei 50 mL Bechergläser, ein Spatel, eine 1 mL Spritze und eine Präzisionswaage mit einer Ablesbarkeit von einem Milligramm benötigt (Tab. 2).

Von den in Tabelle 2 aufgeführten Chemikalien werden die für die gewünschte Wunderkerze benötigten Mengen eingewogen und in einem Becherglas durch sanfte Schwenkbewegungen vermischt, vgl. Erklärvideo [23]. Im nächsten Schritt wird Wasser zugegeben. Sobald dies geschehen ist, muss die Wunderkerze schnell geformt werden, da ab diesem Zeitpunkt nur etwa zwei Minuten bis zur Aushärtung der Masse bleiben. Mit einem Spatel wird die Mischung so lange verknetet, bis sich eine homogene, zähe Masse gebildet hat, welche als ein einziger Klumpen am Spatel kleben bleibt. Diese Masse wird aus dem Becherglas entnommen, mit der Hand - Handschuhe nicht vergessen - nochmal geknetet und zu einem etwa 3 cm langen Wulst geformt. In diesen wird der Stahldraht hineingedrückt und eingerollt, sodass am Ende eine etwa 10 cm große Wunderkerze entsteht. Die einzelnen Schritte der Wunderkerzenherstellung sind in Abbildung 4 dargestellt (Abb. 4).

Dabei ist eine gleichmäßige Form und Dicke wichtig, da die Wunderkerze ansonsten oftmals nicht durchbrennt (Abb. 5). Die Wunderkerze muss vor dem Abbrennen bei 70 °C für zwei Stunden im Trockenschrank oder für mindestens 24 Stunden im Abzug getrocknet werden. Die selbst hergestellten Wunderkerzen werden neben gekauften Wunderkerzen abgebrannt. So kann das Abbrennergebnis anschaulich verglichen werden (Abb. 6).

Nach der Herstellung und dem Abbrennen der Wunderkerze erarbeiten die Schülerinnen und Schüler die Funktionen der einzelnen chemischen Stoffe in der Mischung und stellen die Reaktionsgleichungen für die Oxidation von Eisen und Aluminium mit Sauerstoff sowie die chemische Reaktion der Sauerstoffabgabe des Oxidationsmittels auf. Über eine Thematisierung der Reaktionsprodukte wird die zu Beginn der Unter-

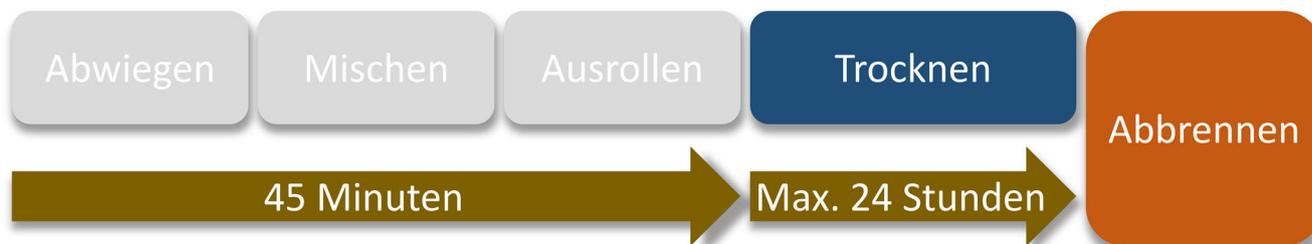


Abb. 3: Zeitlicher Ablauf der Wunderkerzenherstellung

Tab. 2: Zusammensetzung verschiedener Wunderkerzenmischungen für Schülerexperimente.

	Oxidationsmittel	Eisenpulver	Aluminiumstaub	Bindemittel	Wasser
Wunderkerze Bariumnitrat I	Bariumnitrat 0,95 g	0,55 g	0,10 g	Kaltlösliche Stärke 0,20 g	0,30 mL
Wunderkerze Bariumnitrat II	Bariumnitrat 0,95 g	0,55 g	0,10 g	Sahnesteif 0,15 g	0,20 mL
Wunderkerze Strontiumnitrat I	Strontiumnitrat 0,85 g	0,60 g	0,10 g	Kaltlösliche Stärke 0,20 g	0,30 mL
Wunderkerze Strontiumnitrat II	Strontiumnitrat 0,85 g	0,60 g	0,10 g	Sahnesteif 0,20 g	0,25 mL
Wunderkerze Kaliumnitrat I	Kaliumnitrat 0,70 g	0,80 g	0,15 g	Kaltlösliche Stärke 0,15 g	0,40 mL
Wunderkerze Kaliumnitrat II	Kaliumnitrat 0,70 g	0,80 g	0,15 g	Sahnesteif 0,15 g	0,40 mL

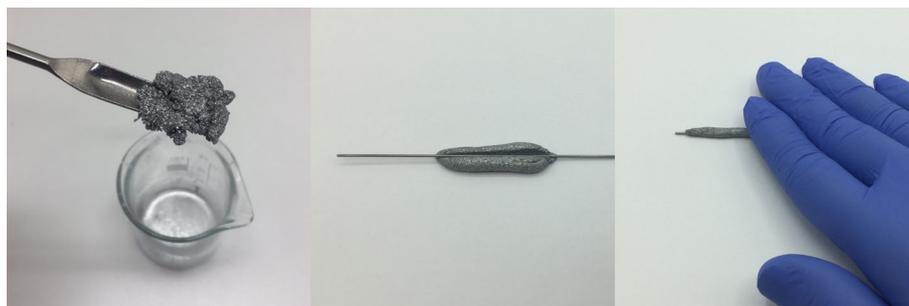


Abb. 4: Arbeitsschrittfolge der Wunderkerzenherstellung

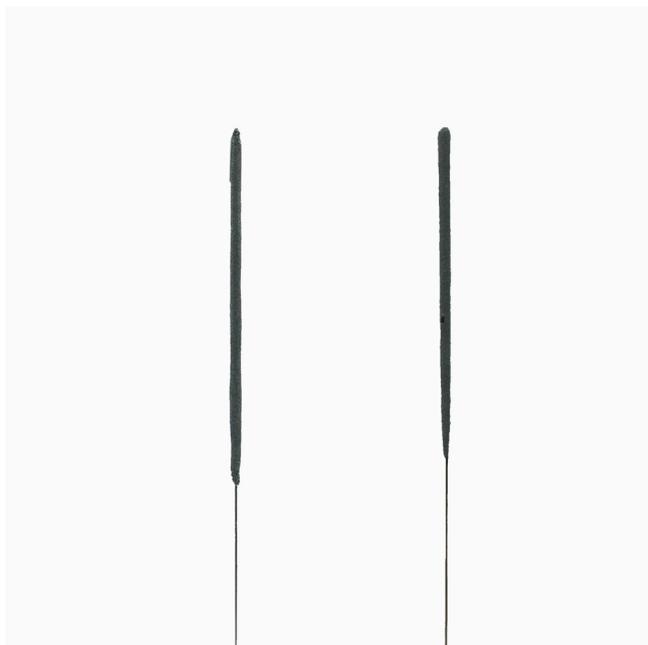


Abb. 5: Eine durch Ausrollen selbst hergestellte Wunderkerze (links) im Vergleich zu einer durch mehrere Tauchgänge geformte käufliche Wunderkerze (rechts)

richtseinheit behandelte Fragestellung des „schwarzen Staubes“ wieder aufgegriffen. In diesem Abschnitt der Unterrichtseinheit werden die lehrplanrelevanten Themengebiete der Redox-Reaktionen und Oxidationsmittel anhand eines Beispiels aus der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler vertieft. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler ihre Kompetenzen in den Bereichen Fachwissen und Erkenntnisgewinnung erweitern.

### 3.3 Modellexperiment zur Umweltverträglichkeit von Wunderkerzen

Die Auswirkungen der beim Abbrennen von Wunderkerzen entstehenden Gase auf Pflanzen können mit dem von Martin & de Vries im Jahr 2004 beschriebenen Experiment geprüft werden [9]. Dazu wird Gartenkresse in abgeschlossenen Gefäßen mit den Gasemissionen der verschiedenen Wunderkerzen kultiviert. Zwischen den hier vorgestellten Wunderkerzenmischungen mit den unterschiedlichen Oxidationsmitteln war dabei aber kein signifikanter Unterschied auf das Pflanzenwachstum feststellbar.

Um die Auswirkungen der festen Verbrennungsrückstände, wie sie an Neujahr auch auf den Straßen zu finden sind, mit den verschiedenen Oxidationsmitteln auf Pflanzen festzustellen, wurde ein weiteres Modellexperiment entwickelt. Die Reste der abgebrannten Wunderkerzen werden dazu in Wasser gelöst und die Wasserlinse *Lemna minor*, welche sich als Umweltindikator etabliert hat, unter diesen Bedingungen kultiviert. Die fehlende Cuticula ermöglicht die Aufnahme von im Wasser gelösten Substanzen sowie die Adsorption schädlicher Stoffe an die Zellwand der Wasserlinsen [24]. Dies und Eigenschaften wie ein schnelles Wachstum, leichte Kultivierbarkeit und die geringe Größe machen die Wasserlinse zu einem optimalen Modellorganismus, der sich vor allem für die Erforschung von pflanzenphysiologischen Fragestellungen eignet [24]. Besonders die weit verbreitete kleinbleibende Art *Lemna minor* wurde schon früh als Organismus für Toxizitätstests und für die Beurteilung der umweltrelevanten Sicherheit von Chemikalien vorgeschlagen [24]. Bei einem solchen Modellexperiment sind der Kontrollansatz sowie konstante abiotische Bedingungen wichtig, damit die Vergleichbarkeit gewährleistet ist.

Für das Modellexperiment werden die von den Schülerinnen und Schülern selbst hergestellten Wunderkerzen mit den verschiedenen Oxidationsmitteln sowie gekaufte Wunderkerzen



Abb. 6: Abbrennen einer selbst hergestellten Wunderkerze mit dem Oxidationsmittel Strontiumnitrat (links) sowie einer gekauften Wunderkerze mit dem Oxidationsmittel Bariumnitrat (rechts)

abgebrannt. Der nach dem Abbrennen und Abkühlen am Draht anhaftende Wunderkerzenrest wird mit einer Zange vom Draht gelöst und in einem Mörser zerkleinert. Danach wird in je ein 150-mL-Becherglas 0,5 g des Wunderkerzenrestes sowie 100 mL destilliertes Wasser gegeben. Da die entstandenen Lösungen der Wunderkerzenreste zum Teil stark basisch sind, muss in allen Probengefäßen mit Hilfe von Salzsäure ein neutraler pH-Wert von 7–8 eingestellt werden. Danach können die Wasserlinsen hinzugegeben werden. Hierzu kann entweder die gesamte Wasseroberfläche mit Wasserlinsen bedeckt oder in jedes Probengefäß eine definierte Menge an Wasserlinsen eingebracht werden. Da im destillierten Wasser keinerlei Nährstoffe für die Pflanzen enthalten sind, verlieren auch die Blätter, genauer gesagt die Sprossglieder der Wasserlinsen, in der Blindprobe mit der Zeit ihr Chlorophyll und bleichen aus. Bereits ab dem vierten Tag ist ein deutlicher Unterschied in der Entwicklung der Wasserlinsen im Modellexperiment (Abb. 7) zu erkennen, da bereits einige Sprossglieder in den Probengefäßen mit den Resten der gekauften Wunderkerzen und im Gefäß mit den Resten der Wunderkerzen mit Bariumnitrat als Oxidationsmittel einen Chlorophyllverlust zeigen. Am deutlichsten ist der Unterschied zwischen den verschiedenen Probengefäßen an Tag 10. Während die Wasserlinsen der Blindprobe und im Gefäß mit den Resten der Wunderkerze mit Kaliumnitrat nur geringe Schädigungen aufweisen, zeigen in dem Probengefäß mit der Wunderkerze mit Strontiumnitrat nur noch wenige Pflanzen keine Schädigung. In den beiden Gefäßen mit den gelösten Resten der gekauften Wunderkerze sowie der Wunderkerzenmischung mit Bariumnitrat ist kein grünes Sprossglied mehr zu erkennen (Abb. 7). Demnach weist die Wunderkerze mit dem Oxidationsmittel Kaliumnitrat die geringste Umwelteinwirkung auf den Modellorganismus auf.

Nach der Durchführung des Modellexperiments wird mit den Schülerinnen und Schülern über dessen Übertragbarkeit und die Grenzen diskutiert. Die Schülerinnen und Schüler prüfen dabei die Möglichkeit, ökologisch und toxikologisch bedenkliche chemische Stoffe auszutauschen und dabei das chemische Produkt im Sinne einer gesteigerten Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit zu verbessern. Hierdurch sollen die Schülerinnen und Schüler in den Kompetenzbereichen Erkenntnisgewinnung und Bewertung geschult werden.

### 3.4 Weitere Kontexte und fächerübergreifender Einsatz der Unterrichtseinheit

In der vorgestellten Unterrichtseinheit wird bei der Weiterentwicklung der Wunderkerze das Augenmerk auf das Handlungsprinzip der Nachhaltigkeit gelegt. Dabei sollen die Schülerinnen und Schüler aus einem holistischen Betrachtungswinkel heraus lernen, z. B. in einem fächerübergreifenden Unterricht mit den Unterrichtsfächern Geographie und Biologie, dass es durch den Einsatz und Verbrauch von Edukten, sowie dem chemischen Erzeugen von Produkten bei der Herstellung und dem Abbrennen von Wunderkerzen, neben den ökologischen Aspekten auch ökonomische und soziale Aspekte zu berücksichtigen gilt. Erst bei der Betrachtung von allen drei benannten Aspekten kann die Nachhaltigkeit der neu entwickelten Wunderkerze beurteilt werden. Dieser fächerübergreifende Unterricht bietet sich am Ende der Sekundarstufe I an, wenn im Fach Geographie die Themen „globale Herausforderungen“ und „Nachhaltigkeit“ behandelt werden.

Die höhere Umweltverträglichkeit der neu entwickelten Wunderkerzen wird mit Hilfe des Umweltindikators Wasserlinse aufgezeigt, was einen Anknüpfungspunkt für eine fächerübergreifende Unterrichtseinheit mit dem Schulfach Biologie darstellt. Während in der Chemie der Fachinhalt der Redoxchemie im Vordergrund steht, kann in der Biologie die Thematik Ökologie, als Wissenschaft der Wechselbeziehungen zwischen Lebewesen und zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt, vertieft werden. In diesem Zusammenhang wird auch die Wirkung von abiotischen Faktoren und insbesondere der Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt durch den Menschen thematisiert. Die Chemie schafft hierbei das grundlegende Fachwissen für ein Verständnis wichtiger abiotischer Faktoren. Ein Beispiel ist die Schulthematik der Salze und der Ionenbindung, die für das Verständnis von Nährstoffverfügbarkeit und Schadstoffeinträge eine wichtige Grundlage darstellt und so die Interpretation des Modellexperiments der Wasserlinse ermöglicht. In der Oberstufe kann auf dieses Wissen bei der Behandlung von Bioindikatoren zurückgegriffen werden.

## 4. Sicherheit

Nach der aktuellen Fassung der „Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht“ (RiSU) vom 14.6.2019 können „Mischungen oxidierender Verbindungen, z. B. Nitrate [...] mit entzündbaren

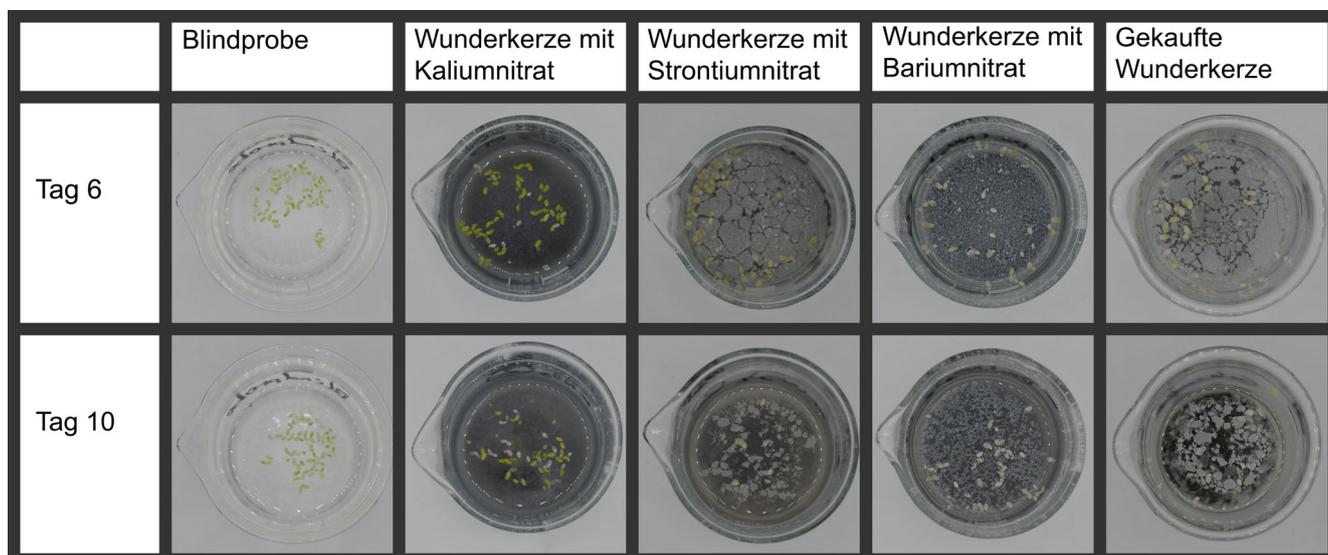


Abb. 7: Wasserlinsen in den Probengefäßen mit den unterschiedlichen Wunderkerzenresten an Tag 6 und Tag 10

oder reduzierbaren Stoffen [...] die Eigenschaften von explosiven Stoffen haben“ [5]. Der Umgang mit diesen Stoffen und Gemischen ist den Lehrkräften vorbehalten und die Herstellung dieser Stoffe und Gemische ist an Schulen gänzlich untersagt [5]. Um die Ungefährlichkeit der in diesem Artikel vorgestellten Mischungen nachzuweisen, wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung für hochenergetische Materialien der Ludwig-Maximilians-Universität München das Berthelot-Rot'sche Produkt, welches ein Maß für die Explosionsfähigkeit der Mischungen darstellt, berechnet [25] und die Explosionsgefährlichkeit mit Hilfe mehrerer Sprengstofftests experimentell bestimmt. Die Mischungen sind rechnerisch nicht explosionsfähig, haben den Stahlhülstentest (mit einem Lochdurchmesser von 2 mm) negativ bestanden und weisen eine Schlagfestigkeit  $>40$  J, eine Reibeempfindlichkeit  $>360$  N sowie eine ESD-Empfindlichkeit  $>1,5$  J auf (Abb. 8). Die Mischungen sind nach dem deutschen Sprengstoffgesetz somit weder explosionsgefährliche Stoffe noch Explosivstoffe [18,26] und fallen daher nicht unter den oben zitierten Absatz der RiSU. Sie dürfen an Schulen von Schülerinnen und Schülern ab der Jahrgangsstufe 5 hergestellt werden, da in den Wunderkerzenmischungen nur chemische Stoffe eingesetzt werden, die laut der DGUV von Schülerinnen und Schülern ab der 5. Jahrgangsstufe verwendet werden dürfen. Der Umgang mit Bariumnitrat ist allerdings für werdende oder stillende Mütter verboten. Zudem muss eine besondere Ersatzstoffprüfung für dieses Oxidationsmittel durchgeführt werden [14].

## 5. Rückmeldungen von Schülerinnen und Schülern

Das Experiment wird in verschiedenen Variationen seit Frühjahr 2019 im Schülerlabor LMUchemlab als eine von mehreren Experimentierstationen angeboten und wurde seitdem von mehr als 600 Schülerinnen und Schülern durchgeführt. In Umfragen am Ende eines jeden Schülerlabortages ist die Wunderkerzenherstellung immer ein Highlight der Schülerinnen und Schüler, was sich auch in der folgenden Auswahl an Schülerkommentaren widerspiegelt:

„Es ist ein sinnvolles Beispiel aus dem Alltag und ein spannendes chemisches Thema.“

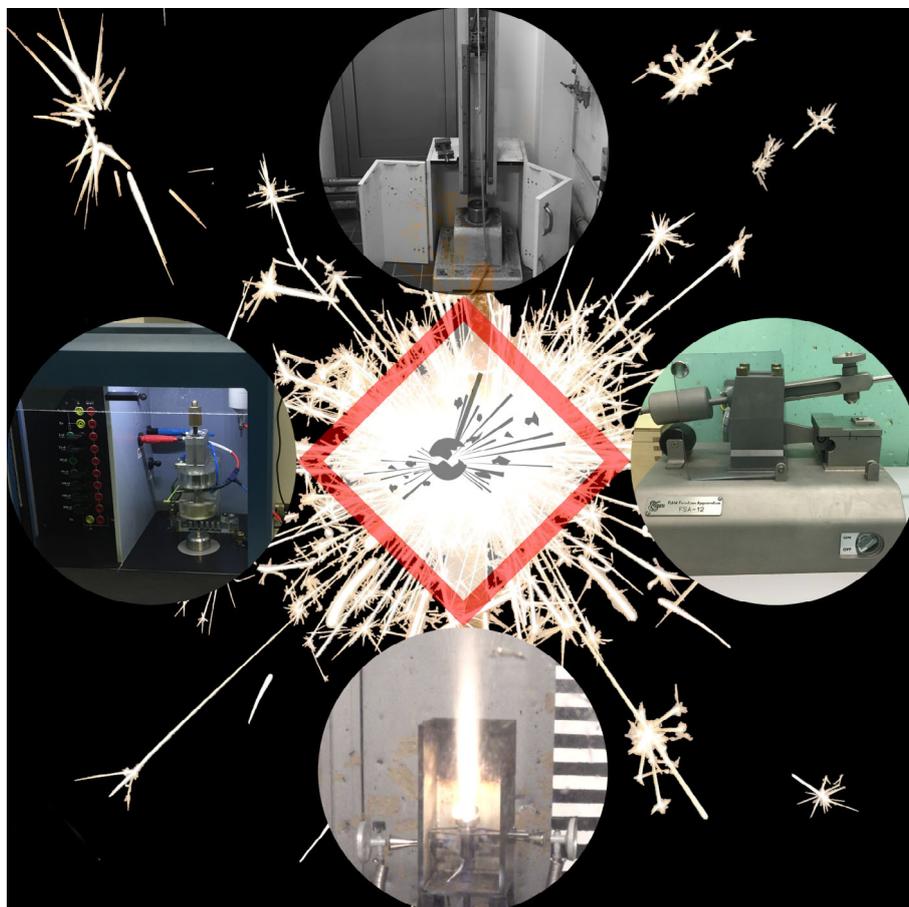
„Ich fand die Kombination von Theorie und praktischer Arbeit gut.“

„Mir gefiel es, meine eigene Wunderkerze herzustellen.“

„Die Diskussion über den Aspekt der Umweltproblematik der Pyrotechnik war spannend.“

„Mir gefiel es, selbst zu verstehen wie man Wunderkerzen herstellt und die chemischen Vorgänge dahinter konnten durch die Experimente besser verstanden werden.“

Darüber hinaus wurden die Betreuenden des Schülerlabors oft von Schülerinnen und Schülern gefragt, weshalb die umweltfreundlicheren Wunderkerzen noch nicht käuflich erhältlich seien. Es wurde festgehalten, dass dies durchaus erstrebenswert wäre, da die neu entwickelten Wunderkerzen hinsichtlich der Verminderung von Gesundheits- und Umweltrisiken einen großen Nutzen hätten. Andere Schülerinnen und Schüler kamen nach dem Durchlaufen der Station zu dem Schluss, dass sie in Zukunft aus Umweltschutzgründen auf das Silvesterfeuerwerk verzichten möchten.



**Abb. 8:** Empfindlichkeitstests zur Charakterisierung der Wunderkerzenmischungen (von oben im Uhrzeigersinn): Fallhammertest, Reibeempfindlichkeitstest, Stahlhülstentest und ESD-Test

Zudem gab die Mehrheit der Schülerinnen und Schüler im Rahmen einer Erhebung von mehreren Schulklassen in einer studentischen Abschlussarbeit an, ein gesteigertes Interesse an den Themen Pyrotechnik und Redoxchemie im Besonderen sowie an der Chemie im Allgemeinen zu haben.



Michael Scheid studierte von 2012 bis 2018 Chemie und Geographie für das gymnasiale Lehramt an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 2018 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung für Didaktik der Chemie. Im Rahmen seiner Promotion gilt sein Interesse im Teilprojekt „DiFa<sup>M</sup>Ch“ der „Lehrerbildung@LMU“ der Visualisierung submikroskopischer Prozesse mit Hilfe von digitalen Medien sowie der Entwicklung von ökologisch und toxikologisch verträglicheren Wunderkerzen.



Laura-Marie Pohl studiert seit 2015 Chemie und Biologie für das gymnasiale Lehramt an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Sie verfasste ihre schriftliche Hausarbeit zur Erlangung des 1. Staatsexamens im Fach Chemiedidaktik über die Entwicklung einer umweltfreundlichen Wunderkerze mit dem Oxidationsmittel Kaliumnitrat für das Schülerlabor.



Magdalena Rusan wurde 2014 an der Ludwig-Maximilians-Universität München im Bereich der Anorganischen Chemie promoviert und arbeitet als wissenschaftliche Angestellte im Bereich der Entwicklung von Experimenten für Experimentalvorlesungen sowie Lehramtspraktika. Sie beschäftigt sich ebenfalls mit der Entwicklung von umweltfreundlichen und toxikologisch verträglicheren Pyrotechnika, insbesondere umweltfreundlichen Wunderkerzen.



Thomas M. Klapötke studierte Chemie an der TU Berlin. Von 1995–1997 war er Lehrstuhlinhaber (Ramsay Chair) an der University of Glasgow und wechselte 1997 an die LMU München, wo er seitdem als Ordinarius für Anorganische Chemie auf dem Gebiet der hochenergetischen Materialien arbeitet. Seine Hauptarbeitsgebiete sind primäre und sekundäre Explosivstoffe, Raketentreibstoffe, Treibladungspulver und Pyrotechnika.



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 Fachwissenschaftlichen statt. Ebenfalls stehen Lernwirksamkeitsuntersuchungen der entwickelten Materialien im Vordergrund seiner Arbeit.

## Danksagung

Das Projekt „Di-Fa<sup>M</sup>Ch“ wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Hierfür möchten wir uns recht herzlich bedanken. Ein besonderer Dank geht zudem an alle Schülerinnen und Schüler, die mit ihrer Evaluation die Entwicklung der neuartigen Wunderkerzen erst ermöglicht haben.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Literatur

- [1] Tages-Anzeiger (2018). Wie das Feuerwerk die Luft verpestet. [www.tagesanzeiger.ch/wissen/medizin-und-psychologie/wie-das-feuerwerk-die-luft-verpestet/story/30543323](http://www.tagesanzeiger.ch/wissen/medizin-und-psychologie/wie-das-feuerwerk-die-luft-verpestet/story/30543323) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [2] Sjøberg, S., Schreiner, C. (2010). The ROSE Project. An Overview and Key Findings. Universität Oslo.
- [3] Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg. Teil C. Chemie. Jahrgangsstufen 7-10. [https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Chemie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Chemie_2015_11_10_WEB.pdf) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [4] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München. Lehrplan des achtjährigen Gymnasiums. Bayern. [www.isb-gym8-lehrplan.de/content/serv/3.1.neu/g8.de/id\\_1.html](http://www.isb-gym8-lehrplan.de/content/serv/3.1.neu/g8.de/id_1.html) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [5] Kultusministerkonferenz (2019). Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht. [www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1994/1994\\_09\\_Sicherheit-im-Unterricht.pdf](http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_Sicherheit-im-Unterricht.pdf) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [6] Keeney, A., Walters, C., Cornelius, R. (1995). Making Sparklers: An Introductory Laboratory Experiment. *Journal of Chemical Education* 72/7, 652–653.
- [7] Bast, V. (2013). Warenprobe: Wie eine Wunderkerze entsteht. [www.impulse.de/leben/oh-wunder/2011512.html#4](http://www.impulse.de/leben/oh-wunder/2011512.html#4) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [8] Falbe, J., Regitz, M. (Hrsg.) (1992). *Römpf-Chemie-Lexikon*. 9. Aufl. Thieme, Stuttgart.
- [9] Martin, C., de Vries, T. (2004). Chemie der Wunderkerze - ein Thema nicht nur in der Weihnachtszeit. *CHEMKON* 11/1, 13–20.
- [10] WECO. Polar Premium-Wunderkerzen. Nr. 6158.
- [11] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. Kaliumnitrat. [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis\\_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestis-deu:sdbdeu](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestis-deu:sdbdeu) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [12] National Center for Biotechnology Information. Strontium Nitrate. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24848> (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [13] National Center for Biotechnology Information. Barium nitrate. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24798> (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [14] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Stoffliste zur DGUV Regel 113-018 “Unterricht in Schulen mit gefährlichen Stoffen” (2018). <https://publikationen.dguv.de/regelwerk/dguv-informationen/3060/stoffliste-zur-dguv-regel-113-018-unterricht-in-schulen-mit-gefaehrlichen-stoffen> (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [15] Andre, C. (2020). Chemie? – Aber sicher! Experimente kennen und können!. 5. Aufl. Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung (ALP), Dillingen a. d. Donau.
- [16] Shimizu, T. (2010). *Fireworks. The Art, Science and Technique*, 4. Aufl. Pyrotechnica Publications, Midland, Tex.
- [17] Jennings-White, C., Kosanke, K. L. (1995). Hazardous Chemical Combinations. A Discussion. *Journal of Pyrotechnics* 2, 333–345.
- [18] Klapötke, T. M. (2009). *Chemie der hochenergetischen Materialien*. De Gruyter.
- [19] Nguyen-Kim, M. T. (2018). Wunderkerzen ohne Gift. Terra X Lesch & Co. [www.youtube.com/watch?v=SI2az6m4xwM&t=184s](http://www.youtube.com/watch?v=SI2az6m4xwM&t=184s) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [20] Werth-Metall. Aluminiumpulver “45”. <https://werth-metall.de/produkt/aluminiumpulver-45/> (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [21] Th.Geyer GmbH & Co.KG. Kaltlösliche Stärke. <https://shop.thgeyer-lab.com/erp/catalog/search/search.action.jsessionid=>

- 57F0773F08E24E3D492849653ED06579?model.query=a4881 (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [22] Hornbach. Stahldraht 0,8 mm. [www.hornbach.de/shop/Stahldraht-0-8x1000-mm/6178899/artikel.html](http://www.hornbach.de/shop/Stahldraht-0-8x1000-mm/6178899/artikel.html) (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [23] Scheid, M. (2020). Herstellung von Wunderkerzen. <https://vimeo.com/464925052> (letzter Zugriff am 5.10.2020).
- [24] Ziegler, P., Appenroth, K.-J. (2019). Die Wasserlinse – eine unterschätzte Vielzweckpflanze. *Biol. Unserer Zeit* 49/3, 207–213.
- [25] Sučeška, M. (2018). EXPLO5.
- [26] Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe, Sprengstoffgesetz - SprengG (1976). [www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2014/sprengstoffgesetz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2014/sprengstoffgesetz.pdf?__blob=publicationFile&v=1) (letzter Zugriff am 5.10.2020).

*Eingegangen am 3. August 2020*

*Angenommen am 5. Oktober 2020*

*Online veröffentlicht am ■■. ■■ 0000*

## 5.6 Publikation 6: Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors

Michael A. Martens & Stefan Schwarzer

MARTENS, M. A. & SCHWARZER, S. (2022, online first). Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors, *CHEMKON*. DOI: 10.1002/ckon.202100063.

### **Beiträge der Autoren:**

Die Konzeption und Durchführung des Schülerlaborprogramms sowie des dazugehörigen Seminars für die Lehramtsstudierenden wurde von Michael A. Martens unter Anleitung von Stefan Schwarzer durchgeführt. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens geschrieben. Das Gesamtprojekt fand unter der Leitung von Stefan Schwarzer statt.

### **Copyright:**

Reprinted with permission from *CHEMKON*, 2022. Copyright 2022 John Wiley and Sons.

doi.org/10.1002/ckon.202100063

# Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors

Michael A. Martens<sup>\*[a]</sup> und Stefan Schwarzer<sup>\*[b]</sup>

**Zusammenfassung:** Laut den Bildungsstandards der KMK sowie den allgemeinen Bildungs- und Erziehungszielen der Lehr- und Bildungspläne der einzelnen Bundesländer sollen Schülerinnen und Schüler digitale Kompetenzen fächerübergreifend erwerben. Angehende Chemielehrkräfte müssen sich für die Vermittlung dieser Kompetenzen die dafür notwendigen Voraussetzungen und damit die Kompetenzen selbst erst aneignen. Im Unterrichtsfach Chemie ist dabei die Nutzung von digitalen Medien in chemischen Experimenten sowohl zur Messwerterfassung als auch zur Visualisierung des Übergangs von der makroskopischen zur submikroskopischen Ebene als Besonderheit zu berücksichtigen. Zur Vermittlung dieser digitalen Kompetenzen an angehende Chemielehrerinnen und -lehrer wurde ein Seminar konzipiert, bei dem sie im Schülerlabor LMUchemlab Schülerinnen und Schüler unter Einsatz von digitalen Medien beim Experimentieren betreuen und den Einsatz der digitalen Medien in den chemischen Experimenten anschließend reflektieren. Dazu wurde ein neues Schülerlaborprogramm mit fünf Experimentierstationen zu modernen Materialien und verschiedenen digitalen Medien entworfen. Dieser Artikel stellt die Experimentierstationen, die in den Experimenten eingesetzten digitalen Medien sowie deren didaktische Funktionen vor und zeigt auf, welche digitalen Kompetenzen die Studierenden im Verlauf des Seminars erwerben sollen.

**Stichworte:** DPACK · Digitale Medien · Lehramtsausbildung · Schülerlabor

## Digital media in chemistry education: Developing professional skills in context of a school student laboratory

**Abstract:** According to the educational standards of the KMK (The standing conference of the ministers of education and cultural affairs of the federal states in the federal republic of Germany) and the general educational aims of the curricula of the German federal states, school students should acquire digital skills in an interdisciplinary way. For this purpose, prospective chemistry teachers must first acquire the competencies and fulfill the prerequisites themselves in order to be able to impart these skills. In chemistry education, the use of digital media in chemical experiments both for data acquisition and for visualizing the transition from the macroscopic to the submicroscopic level must be considered. To impart these digital skills to prospective chemistry teachers, a course was designed to take place at the LMUchemlab school student laboratory. In this workshop, the prospective chemistry teachers supervise school students' use of digital media while experimenting and subsequently reflect on the use of digital media in chemical experiments. This course encompasses a new laboratory program for school students with five experimental stations on modern materials and various digital media. This article presents the experimental stations, the digital media used in the chemical experiments and their educational functions, and shows which digital skills the prospective chemistry teachers should acquire over the course.

**Keywords:** DPACK · digital media · teacher education · student lab for school students

## 1. Das LMUchemlab

Das LMUchemlab wurde 2018 eröffnet und ist nach der Kategorisierung von Haupt et al. ein Lehr-Lern-Labor zur Wissenschaftskommunikation [1], in dem Schülerinnen und Schüler in Kleingruppen Experimente zur aktuellen chemischen Forschung durchführen und dabei von Lehramtsstudierenden be-

treut werden. Im LMUchemlab werden dabei verschiedene Schülerlaborprogramme für die Sekundarstufe I und II angeboten, unter anderem auch das hier beschriebene Programm für die Mittelstufe mit universitärem Begleitseminar für die Studierenden.

### 1.1 Universitäres Begleitseminar zur Vermittlung digitaler Kompetenzen im chemischen Experiment

Zeitgemäßer Unterricht verlangt von angehenden Lehrkräften Kompetenzen im Umgang mit digitalen Medien (*Digital Knowledge*, kurz DK) sowie professionelles Wissen über die Anwendungsgebiete und das didaktische Potential von digitalen Medien in ihrem Unterrichtsfach (*Digital Content Knowledge*, kurz DCK; sowie *Digital Pedagogical Knowledge*, kurz DPK) [2]. Um diese Kompetenzen im Studium zu vermitteln, wurde an der Ludwig-Maximilians-Universität München ein Seminar sowie ein darauf abgestimmtes Schülerlaborprogramm mit speziell an dieser Zielsetzung orientierten Experimentierstationen entwickelt. Das Seminar ist Teil des Projektes „DiFa<sup>M</sup><sub>Ch</sub>“, das vom Bundesministerium für Bildung und

[a] M. A. Martens  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Didaktik der Chemie  
Butenandtstraße 5–13  
81377 München  
\* E-Mail: michael.scheid@cup.uni-muenchen.de

[b] S. Schwarzer  
Eberhard Karls Universität Tübingen  
Didaktik der Chemie  
Auf der Morgenstelle 18  
72076 Tübingen  
\* E-Mail: stefan.schwarzer@uni-tuebingen.de

Forschung im Rahmen der Qualitätsoffensive Lehrerbildung gefördert wird.

Kern des Begleitseminars ist die Reflexion des Einsatzes von digitalen Medien an den Experimentierstationen des Schülerlabors aus Sicht der Studierenden. Die angehenden Chemielehrkräfte betreuen dazu in Microteachingsituationen Kleingruppen von zwei bis fünf Schülerinnen und Schülern an den Stationen und besprechen anschließend ihre Lehrtätigkeit. Durch das Microteaching soll die Aneignung der zu erlernenden unterrichtlichen Kompetenzen positiv unterstützt werden [3]. Jeder Seminarteilnehmende betreut zwei der fünf Stationen je zehn Mal.

Das Seminar wurde im Wintersemester 2019/2020 pilotiert und wird seit Februar 2020 regulär als Lehrveranstaltung angeboten. Im Wintersemester 2020/2021 konnte das Seminar trotz Einschränkungen durch die Pandemie in abgeänderter Form durchgeführt werden und findet seit dem Sommersemester 2021 wieder regulär an der LMU München statt. Zur standortübergreifenden empirischen Begleitung wurde das Schülerlabor mit seinem Begleitseminar zudem im Februar und März 2020 an der Europa-Universität Flensburg sowie im Juli 2021 an der Eberhard Karls Universität Tübingen angeboten. Inzwischen wurden von insgesamt 65 Seminarteilnehmenden über 1100 Schülerinnen und Schüler in diesem Schülerlaborprogramm betreut.

## 1.2 Konzeption des Schülerlaborprogramms

Das im Folgenden beschriebene Schülerlaborprogramm ist für Schülerinnen und Schüler der Jahrgangsstufen 8 bis 10 konzipiert. Um dem Charakter eines Schülerlabors zur Wissenschaftskommunikation Rechnung zu tragen, stehen alle fünf Experimente des Schülerlaborprogramms in engem Bezug zum Themenschwerpunkt „moderne Materialien“. Dies wird beispielsweise beim 3D-Drucker, bei umweltfreundlicherer Pyrotechnik oder bei der Synthese von Silbernanopartikeln deutlich, da die Inhalte dieser Experimentierstationen auch im Mittelpunkt aktueller chemischer Fachforschungen stehen. Die Experimente wurden dafür eigens in Kooperation mit den Fachwissenschaften entwickelt und im Sommer 2019 bzgl. ihrer Verständlichkeit und Umsetzbarkeit im Schülerlaboreinsatz geprüft oder aus der Literatur übernommen, adaptiert und mit digitalen Medien erweitert. An jeder Experimentierstation nimmt dabei je ein digitales Medium eine zentrale, lernunterstützende Funktion ein, wobei auf die spezifischen Anforderungen des Faches Chemie besonderes Augenmerk gelegt wurde. So werden die digitalen Medien entweder während des Experimentierens als Schülerwerkzeug eingesetzt oder sollen kognitiv unterstützen und den Übergang von der makroskopischen zur submikroskopischen Ebene erleichtern. Bei der Auswahl der digitalen Medien wurde zudem auf ein zeitgemäßes und breit gefächertes Repertoire an digitalen Werkzeugen sowie eine nach Möglichkeit kostengünstige und somit auch für den Schuleinsatz geeignete Umsetzung geachtet. Dies soll den Seminarteilnehmenden die Möglichkeit eröffnen, die im Seminar genutzte Hard- und Software später in Schulpraktika und Beruf einzusetzen.

Nachfolgend wird ein Überblick über die fünf Experimentierstationen (vgl. Absatz 3), die dabei eingesetzten digitalen Medien sowie die damit nach dem Orientierungsrahmen *DiKoLAN* [4] adressierten digitalen Medienkompetenzen gegeben:

- Synthese von Silbernanopartikeln (Augmented Reality & Animation, Präsentation)
- Zukunftstechnologie 3D-Druck (CAD-Programm & 3D-Druck, Kommunikation/Kollaboration)
- Energie in der Chemie (Infrarotbild, Messwert-/Datenerfassung)

- „Grüne“ Wunderkerzen (Simulation, Simulation/Modellierung)
- Nanowelten (Animation & Aufnahme einer Oberflächenstruktur mittels Rasterkraftmikroskop, Präsentation & Messwert-/Datenerfassung)

## 2. Theoretische Grundlage: Das TPACK bzw. das DPACK-Modell

Um das Wissen und die Kompetenzen, die angehende Lehrkräfte für den technisch korrekten und didaktisch gewinnbringenden Einsatz von digitalen Medien im Unterricht benötigen, identifizieren und klassifizieren zu können, wurde ein medienpädagogisches Modell benötigt. Hierfür ist das TPACK-Modell von Mishra & Koehler [2] als Grundlage gut geeignet, da es eine Weiterentwicklung des *Pedagogical Content Knowledge* (PCK) Konzepts von Shulman [5] ist und in der medienpädagogischen Forschung häufig rezipiert wird. Es enthält die drei Wissensdimensionen *Content Knowledge* (CK), *Pedagogical Knowledge* (PK) und *Technological Knowledge* (TK), welche im unterrichtlichen Kontext betrachtet werden. Die Autoren beschreiben dabei als *Technological Knowledge* (TK) sowohl das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von klassischen Medien wie einem Tafelanschrieb als auch das Wissen über die Einsatzmöglichkeiten von digitalen Medien im Unterricht, wobei der Fokus des TPACK-Modells auf dem Einsatz von digitalen Medien liegt [2]. Um der ständig fortschreitenden Entwicklung von digitalen Medien Rechnung zu tragen, wird die Konzeptualisierung des technologischen Wissens als nicht abgeschlossen betrachtet [2].

Der TPACK-Ansatz betont besonders die Schnittmengen der drei Wissensdimensionen. Im Zentrum, als zentrale Schnittmenge aller drei Dimensionen, steht dabei das *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK), welches unter Einbezug pädagogischer Determinanten die effektive Technologieintegration in den Unterricht beschreibt und so zu einem hochqualifizierten Unterrichten führt [6].

In der fachdidaktischen Forschung im Bereich des MINT-Unterrichts wird als Weiterentwicklung des TPACK-Modells die



Michael A. Martens, geb. Scheid, studierte von 2012 bis 2018 Chemie und Geographie für das gymnasiale Lehramt an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 2018 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Stefan Schwarzer in der Chemiedidaktik. Im Rahmen seiner Promotion gilt sein Interesse im Teilprojekt „DiFa<sup>M</sup>Ch“ der „Lehrerbildung@LMU“ der Visualisierung submikroskopischer Prozesse mit Hilfe von digitalen Medien sowie der Entwicklung von ökologisch und toxikologisch verträglicheren Wunderkerzen.



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 Lernwirkungsuntersuchungen der entwickelten Materialien im Vordergrund seiner Arbeit.

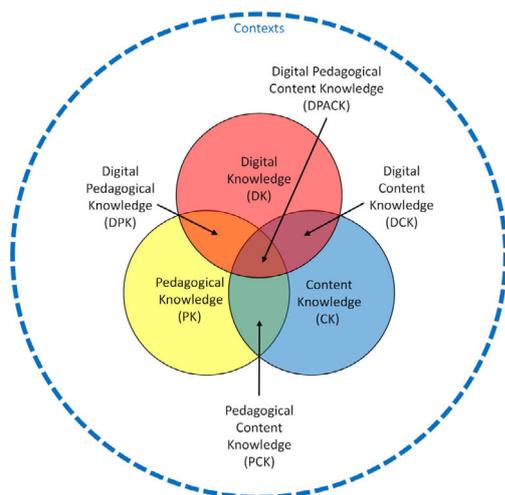


Abb. 1: Graphische Darstellung des DPACK-Modells (*Digital Pedagogical Content Knowledge*) nach Huwer et al. [7].

Substitution des *Technological Knowledge* gegen das *Digitalitätsbezogene Wissen* (DK) postuliert, wodurch das DPACK-Modell (Abb. 1) entsteht [7]. Das *Digitalitätsbezogene Wissen* weist neben dem im *Technological Knowledge* (TK) enthaltenen Wissen über Technologien auch Aspekte der Digitalität auf [7].

### 3. Experimentelle und digitale Inhalte des LMUchemlabs für die Sekundarstufe I

Im folgenden Absatz werden die fünf Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms detailliert vorgestellt. Dabei werden auch die ergänzenden digitalen Medien und deren didaktische Funktionen erläutert.

#### 3.1 Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor

Im Zentrum der Experimentierstation steht die Herstellung von Silbernanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor nach der Versuchsanleitung von Weisermann et al. [8]. Die meisten Schülerinnen und Schüler der Sekundarstufe I sind nicht mit dem Leidenfrost-Effekt oder dem Konzept des kolloidalen Wachstums von Nanopartikeln aus dem Schulunterricht vertraut, weswegen detaillierte Erklärungen zu den physikalischen und chemischen Hintergründen notwendig sind. Darüber hinaus werden an der Station die Autoprotolyse von Wasser sowie die chemische Reduktion von Silberkationen zu elementarem Silber thematisiert. Die Station enthält somit vier unterschiedliche Themengebiete aus Chemie und Physik, mit denen die Schülerinnen und Schüler konfrontiert werden. Um diese verschiedenartigen komplexen Inhalte zu veranschaulichen und so den Aufbau eines Verständnisses für die Nanopartikelsynthese bei den Schülerinnen und Schülern zu unterstützen, wurde die Station um Augmented Reality erweitert. Dazu werden je zwei Lernende der Kleingruppe mit einem Tablet ausgestattet, auf dem eine Augmented-Reality-App vorgehalten wird.

Mit Hilfe der App können sich die Schülerinnen und Schüler im Sinne einer Individualisierung die verschiedenen chemischen Prozesse und physikalischen Phänomene selbstständig erarbeiten [9] und dabei an ihr Vorwissen anknüpfen. Als app-spezifische Overlays kommen an der Station Animationen, ein Podcast sowie die Lösungen der Arbeitsblätter zum Einsatz. Angelehnt an die Theorie des didaktischen Dreiecks von Johnstone [10] kann durch die Überblendung mit einer Animation mittels Augmented Reality das Experiment und damit

die phänomenologische Ebene mit der submikroskopischen (Teilchen-)Ebene sowie mit der symbolischen Ebene (Formeln) verknüpft werden. Hiermit soll das integrative Lernen gefördert werden. Die Studierenden können diese Station sowohl mit als auch ohne die Unterstützung von Augmented Reality betreiben. Den Lehrenden soll so insbesondere der didaktische Mehrwert als auch die Limitationen von Augmented Reality, z. B. im Hinblick auf die Visualisierung der submikroskopischen Teilchenebene, verdeutlicht werden. Durch das Unterrichten in der Microteachingsituation bekommen die Lehrenden einen direkten Einblick in die Gedankengänge der Lernenden. Aufgrund dessen beginnen die meisten Seminarteilnehmenden nach einiger Zeit, die in der Augmented-Reality-App angebotenen Inhalte, für die jeweils das Schülerlabor besuchende Jahrgangsstufe und entsprechend des angenommenen Vorwissens, gezielt zu selektieren.

Als Augmented-Reality-App wird im LMUchemlab die App „Zappar“ eingesetzt, da sie kostenlos und ohne Programmierkenntnisse nutzbar ist. Im Gegensatz zu der inzwischen abgeschalteten, aber früher von vielen Lehrkräften genutzten Augmented-Reality-App „hp reveal“ nutzt Zappar in der kostenlosen Version als Trigger keine Echtbilder, sondern lediglich Symbole (Abb. 2).

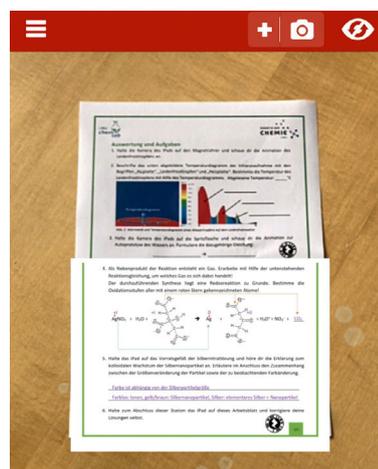
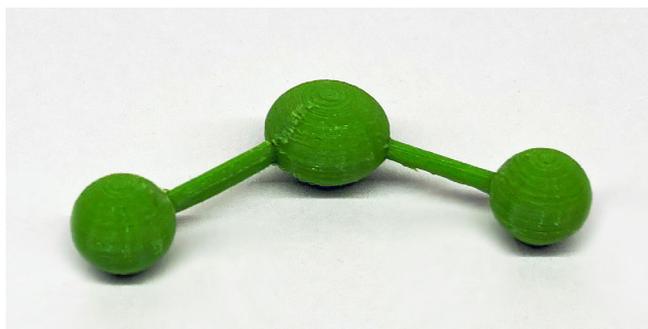


Abb. 2: Blick durch die AR-App „Zappar“ auf ein Arbeitsblatt mit Einblendung der Lösungen auf der unteren Hälfte.

#### 3.2 Station 2: Zukunftstechnologie 3D-Drucker

An dieser Experimentierstation stellen die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe eines 3D-Druckers ein Molekülmodell selbst her und erhalten dadurch einen Einblick in die Technologie des 3D-Druckens. Die selbst erstellten Molekülmodelle werden dabei von den Lernenden individuell an ihren aktuellen Fachwissensstand sowie an die aktuell im Chemieunterricht behandelten Inhalte angepasst [11]. So werden in der Schülerlaborpraxis neben Wassermolekülmodellen (Abb. 3) häufig einfache, organische Molekülmodelle realisiert. Zudem werden seltener auch andere Molekülmodelle, wie das des Bortrifluorids ( $\text{BF}_3$ ) gedruckt, wenn im Unterricht aktuell die räumliche Gestaltung von Molekülen und damit einhergehend das Elektronenpaarabstoßungsmodell (VSEPR-Modell) behandelt wird. Die Schülerlaborstation ist eine auf 45 Minuten reduzierte Form des von den Autoren bereits beschriebenen Projektunterrichts zur Erstellung eines Molekülbaukastens [12] und beinhaltet die Erstellung eines Molekülmodells mittels eines CAD-Programms (CAD: computer-aided design), den Ausdruck des erstellten Molekülmodells mit einem 3D-Drucker sowie ein Experiment, dass die unterschiedlichen



**Abb. 3:** Im Schülerlabor erstelltes und gedrucktes Wassermolekülmodell.

Drucktemperaturen der Druckfilamente aufzeigt. Letzteres ermöglicht durch den Rückbezug zur Theorie der Polymere (Thermoplasten) die Verknüpfung mit dem Basiskonzept Struktur-Eigenschaft.

Zur Bewältigung der Aufgabenstellung an dieser Station müssen die Schülerinnen und Schüler ihr Wissen aus den Schulfächern Informatik, Physik und Chemie kombinieren. Durch die Thematisierung der biologischen Abbaubarkeit des Druckfilaments PLA wird zudem fächerübergreifend der Aspekt der Nachhaltigkeit von Polymeren integriert. Das eigenständige Erstellen eines Molekülmodells mit einem CAD-Programm soll die Problemlösefähigkeit sowie das räumliche Vorstellungsvermögen der Schülerinnen und Schüler unterstützen. Die Besonderheit der Station ist dabei die Überführung eines digitalen Molekülmodells in ein reales und greifbares 3D-Molekülmodell.

Das Molekülmodell wird mit der CAD-Software „Tinkercad“ erstellt, welche kostenlos und onlinebasiert ist. Es stehen den Anwendern und Anwenderinnen geometrische Grundformen zur Verfügung, durch deren Skalierung und Drehung Molekülmodelle einfach und schnell zusammengesetzt werden können. Die Schülerinnen und Schüler benötigen zur Erstellung des Molekülmodells selten mehr als 15 Minuten. Die Studierenden erhalten dabei Rückmeldungen zum räumlichen Vorstellungsvermögen der Schülerinnen und Schüler. Die betreuenden Studentinnen und Studenten dieser Station regen zudem oft an, für die Sekundarstufe II ein umfangreicheres CAD-Programm einzusetzen. Der Ausdruck der Molekülmodelle erfolgt mit dem 3D-Drucker „Creality3D Ender-3“, der inklusive der benötigten Software im Handel für weniger als 200 € angeboten wird.

### 3.3 Station 3: Energie in der Chemie

Das Ziel der Station ist die Vermittlung eines Einblicks in Energieumsätze in physikalischen Vorgängen und chemischen Reaktionen. Als physikalische und chemische Experimente mit Energieumsätzen werden die Verdunstungskälte von Ethanol, das Phänomen der unterkühlten Flüssigkeit und die endotherme Reaktion von Brausepulver mit Hilfe einer Wärmebildkamera visualisiert. Durch die Auswahl der Experimente sollen die Schülerinnen und Schüler zudem die Unterscheidung zwischen chemischen und physikalischen Vorgängen aus dem Anfangsunterricht Chemie festigen.

Obwohl – oder gerade weil – das Energiekonzept in den drei Naturwissenschaften Biologie, Chemie und Physik eine bedeutsame Rolle spielt, ist es aufgrund seines hohen Abstraktionsgrades besonders zu Beginn des Chemieunterrichts für Schülerinnen und Schüler häufig schwer verständlich [13]. Ergänzend werden in den verschiedenen Naturwissenschaften unterschiedliche Energieformen und Definitionen an die Schülerinnen und Schüler herangetragen. Um Lernende bei

der Entwicklung ihres Energieverständnisses zu unterstützen, bietet es sich an, Energieumsätze mit Hilfe von Infrarotbildern darzustellen. Nach einer kurzen Einführung in die Theorie von Falschfarbenbildern können Energieumsätze, deren Verlauf sowie das Temperaturprofil einer Oberfläche in Echtzeit erfasst und verfolgt werden [14]. Dies vermögen Thermometer und digitale Temperaturfühler nicht zu leisten. Den Studierenden wird an dieser Station somit eine einfache und effektive Möglichkeit nähergebracht, wie sie die abstrakte Theorie von Energieumsätzen selbst Schülerinnen und Schülern aus dem Anfangsunterricht der Chemie leicht verständlich vermitteln können. Die in Absatz 5 aufgeführten Kommentare von Studierenden zeigen, dass sie diesen didaktischen Mehrwert einer Wärmebildkamera im Chemieunterricht im Laufe des Seminars erkennen.

Als Wärmebildkamera kommt im LMUchemlab die „FLIR One“ zum Einsatz, welche in Kombination mit einem iPad genutzt wird (Abb. 4). Die Wärmebildkamera selbst gibt es für etwa 220 € im Handel zu kaufen.



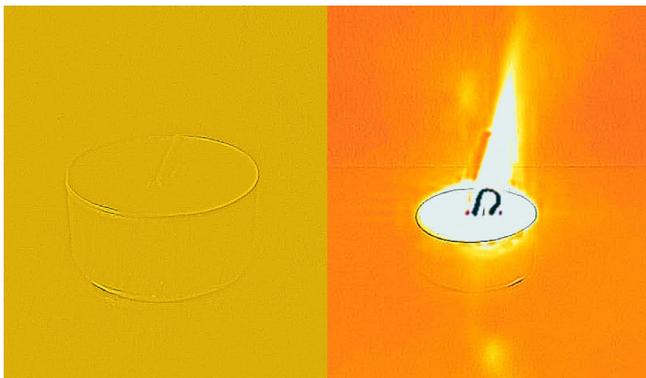
**Abb. 4:** Die Wärmebildkamera „FLIR One“ in Kombination mit einem iPad.

Die eingesetzte Wärmebildkamera hat den Vorteil, dass die Infrarotbilder als Bilddatei auf dem Tablet gespeichert und über eine Cloud oder Beamer mit den Mitschülerinnen und Mitschülern geteilt werden können. Zudem ist den Schülerinnen und Schülern der Umgang mit einem Tablet meist vertraut, weshalb nur eine kurze Einführung notwendig ist. In der „FLIR One“ befindet sich neben der Infrarotkamera auch eine optische Kamera. Hierdurch können dem Infrarotbild Konturen hinzugefügt werden, die vor Versuchsbeginn den Schülerinnen und Schülern bei der Orientierung und Ausrichtung der Kamera helfen (Abb. 5).

### 3.4 Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen

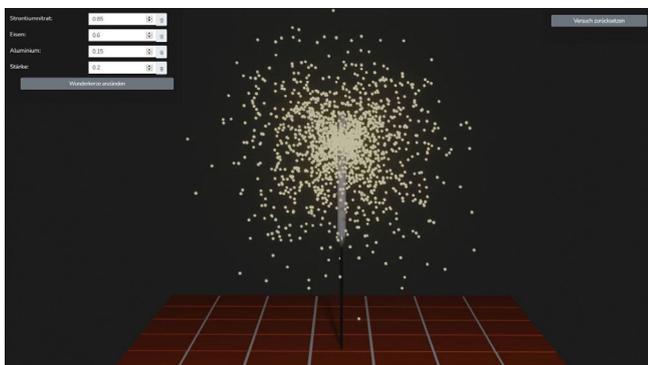
An dieser Experimentierstation entwickeln die Schülerinnen und Schüler im Sinne eines forschend-entwickelnden Ansatzes mit Hilfe einer Simulation ihre eigene Rezeptur für eine Wunderkerze, die im Anschluss hergestellt und abgebrannt wird. Um die Herstellung von zu reaktiven Mischungen, die Schülerinnen und Schüler nach der RiSU nicht herstellen dürfen, zu verhindern, werden diese von der Simulation als gefährlich eingestuft. Die praktische Herstellung der Wunderkerzen im Schülerexperiment und der fachchemische Hintergrund wurden von den Autoren bereits detailliert beschrieben [15]. Der Herstellungsprozess kann zudem als Video abgerufen werden [16].

Die Entwicklung der Wunderkerzenmischung im Rahmen eines Forschungszyklus wird durch das digitale Medium „Si-



**Abb. 5:** Überlagerung von Infrarotaufnahme und Echtbild eines Teelichts. Hierdurch können trotz fehlender Temperaturunterschiede die Konturen des Teelichts vor dem Anzünden (links) wahrgenommen werden.

mulation“ ermöglicht. Die effiziente Implementierung und das mehrmalige Durchlaufen des Forschungszyklus in digitaler Form erspart gegenüber einer papierbasierten Form Zeit. Ferner wird die digitale Erprobung von chemischen Reaktionsmischungen der Wunderkerze, die nach der RiSU aufgrund ihrer Reaktivität nicht von Schülerinnen und Schülern hergestellt werden dürfen, ermöglicht. Die Simulation wurde mit Daten aus den zahlreichen Testreihen der Wunderkerzenentwicklungsphase programmiert, sodass sie möglichst realitätsnahe Simulationsergebnisse liefert. Bei der realen Erprobung der Wunderkerzenmischung kann dann das zuvor simulierte Abbrennverhalten der Wunderkerze beobachtet werden (Abb. 6).



**Abb. 6:** Simulation zur Findung des richtigen Mischungsverhältnisses der Edukte der Wunderkerze.

Bei einem Schülerlaborbesuch entwickelt jede Schülergruppe der Klasse ihre eigene Reaktionsmischung und vergleicht am Ende des Schülerlabortages das Abbrennverhalten mit den Wunderkerzen der anderen Gruppen (Abb. 7).

Die Erkenntnisgewinnung der Schülerinnen und Schüler findet so in authentischer, da nah am Forschungsprozess orientiert, und autonomer Weise, da die Schülerinnen und Schüler unter Verwendung der Simulation selbst aktiv werden, statt. Die vier Edukte Strontiumnitrat, Aluminiumpulver, Eisenpulver und kaltlösliche Stärke werden den Schülerinnen und Schülern im Rahmen der Simulation zur Auswahl gestellt. Der didaktische Nutzen der Simulation bei der Erkenntnisgewinnung der Schülerinnen und Schüler wird in Absatz 5 in einem Zitat eines Seminarteilnehmenden nochmals dargestellt. Während des Durchlaufens des digitalen Forschungszyklus sollen die Schülerinnen und Schüler durch das Formulieren von Hypothesen im Kompetenzbereich der Erkenntnisgewin-



**Abb. 7:** Vergleich der Abbrenneigenschaften der im Schülerlabor selbst hergestellten Wunderkerzen (das Bild entstand noch vor der Corona-Pandemie).

nung geschult werden. Eine zu Beginn von den Schülerinnen und Schülern häufig aufgestellte Theorie besteht z. B. darin, dass der Aluminiumstaub für die Funken der Wunderkerze verantwortlich ist. Nach mehreren Simulationsdurchläufen kommen die Schülerinnen und Schüler aber meist zu der Erkenntnis, dass die Menge des eingesetzten Aluminiums, bei in der Simulation gut abbrennenden Wunderkerzen, für den Funkenflug nicht ausreichend ist. Folglich sorgt somit das Eisenpulver für die Funken beim Abbrennvorgang. Nach dem Durchlaufen der Experimentierstation und am Ende des digitalen Forschungszyklus wissen die Schülerinnen und Schüler zudem, dass die kaltlösliche Stärke die Wunderkerzenmischung am Stahldraht fixiert und das Aluminiumpulver für das Abfliegen der chemischen Reaktion notwendig ist. Die diesbezüglichen chemischen Hintergründe werden im Rahmen des digitalen Forschungszyklus mit den Betreuenden erarbeitet und auf dem Arbeitsblatt der Station festgehalten. Die Simulation reduziert den Forschungszyklus auf die grundlegenden Funktionen der Edukte und gibt den Schülerinnen und Schülern zugleich einen realistischen Einblick in die Entwicklung der Wunderkerzenmischung mit einem angemessenen Zeitaufwand. Nachdem die Wunderkerzenmischung mit Hilfe der Simulation entwickelt wurde, folgt der Herstellungsprozess.

Die Studierenden erhalten an dieser Station einen Eindruck über den Nutzen sowie die Grenzen von Simulationen. So müssen beispielsweise besonders Schülerinnen und Schüler aus den Jahrgangsstufen 8 und 9 von den Betreuenden mit den richtigen Fragen und Hilfestellungen bei der Entwicklung ihrer Wunderkerzenmischung unterstützt werden, da hier wichtiges Vorwissen noch nicht im Schulunterricht behandelt wurde.

Die Simulation ist unter [www.uni-tuebingen.de/de/215140](http://www.uni-tuebingen.de/de/215140) abrufbar.

### 3.5 Station 5: Nanowelten

An dieser Experimentierstation wird ein menschliches Haar mit unterschiedlicher Genauigkeit aufgelöst. Zu Beginn steht die Untersuchung des Haares mit dem bloßen Auge. Darauf folgend betrachten die Schülerinnen und Schüler das Haar unter dem Lichtmikroskop und vermessen anschließend die Oberfläche des Haares mit Hilfe eines Rasterkraftmikroskops. Die Station wurde in Vorarbeiten [17] entwickelt und für das LMUchemlab adaptiert. Die Grundlagen des Rasterkraftmikroskops, der Aufbau der Schülerlaborstation und Ergebnisse wurden vom Autor ausführlich beschrieben [17].

Zur Veranschaulichung des Funktionsprinzips eines Rasterkraftmikroskops steht den Studierenden sowohl ein klassi-

sches Modell zur Funktionsweise, z. B. des Lichtzeigerprinzips, zur Thematisierung der relevanten Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen, als auch eine Animation zur Verfügung. Durch die Verwendung der unterschiedlichen Modelle erhalten die Studierenden einen Einblick in die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Erklärungsansätze und sollen so ihre Modellkompetenz schulen können. Zudem wird den Lehrenden eine Möglichkeit aufgezeigt, wie Strukturen in den Größenordnungen von Mikro- und Nanometer für Schülerinnen und Schüler mittels Messwerterfassung und Falschfarbentbild visualisiert und somit zugänglich gemacht werden können.

Im Schülerlabor kommt das Rasterkraftmikroskop „Nai-oAFM“ der Firma Nanosurf zum Einsatz, welches mit einer Software von den Schülerinnen und Schülern direkt gesteuert wird.

#### 4. Förderung der digitalitätsbezogenen Kompetenzen der Seminarteilnehmenden

Das DPACK-Modell enthält drei Bereiche von Professionswissen (digitalitätsbezogenes, pädagogisches und fachinhaltliches Professionswissen), durch deren Schnittmengen neue Bereiche entstehen (Abb. 1) [2,7]. Das in diesem Artikel vorgestellte Seminar hat die Förderung der digitalen Kompetenzen von angehenden Lehrkräften als Ziel, weshalb im Folgenden nur die vier im Seminar zu erlernenden Wissensdimensionen

aufgeführt werden, die einen Schnittpunkt mit dem *Digitalitätsbezogenem Wissen* (DK) besitzen.

- Der Einsatz von digitaler Hard- und Software an allen fünf Experimentierstationen soll bei den Seminarteilnehmenden zu einer Steigerung des *Digital Knowledge* (DK) führen.
- Der angeleitete und im Anschluss reflektierte Einsatz der digitalen Medien in Microteachingsituationen soll darüber hinaus eine Steigerung des *Digital Pedagogical Knowledge* (DPK), des *Digital Content Knowledge* (DCK) sowie, in Kombination mit den chemischen Inhalten der Experimentierstationen und pädagogischem Wissen, des *Digital Pedagogical Content Knowledge* (DPACK) bewirken.

Eine Auswahl des an den Experimentierstationen zu vermittelnden Wissens über die eingesetzten digitalen Medien ist in Tabelle 1 (Tab. 1) nach den Wissensdimensionen des DPACK-Modells untergliedert aufgeführt:

#### 5. Wissenschaftliche Begleitforschung

Die Überprüfung der Wirksamkeit des Seminars zur Förderung digitaler Medienkompetenzen bei Lehramtsstudierenden der Chemie ist das übergeordnete Ziel der Begleitforschung. Das Forschungsvorhaben ist in den Bereich der Lehrerprofessionalisierungsforschung mit dem Fokus auf Verwendung digitaler Medien einzuordnen. Die intendierte Steigerung der digitalen Medienkompetenzen der Seminarteilnehmerinnen und

Tab. 1: Intendierte Förderung der digitalen Kompetenzen der Lehramtsstudierenden an den verschiedenen Experimentierstationen.

	Digital Knowledge (DK)	Digital Pedagogical Knowledge (DPK)	Digital Content Knowledge (DCK)	Digital Pedagogical Content Knowledge (DPACK)
<b>Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrostreaktor</b>	Anwendung von Augmented Reality (AR), Wissen um die verschiedenen Overlaymöglichkeiten	Einsatz von AR zur Individualisierung des Lernprozesses, Einsatz von AR zur Verknüpfung der makroskopischen mit der submikroskopischen und symbolischen Ebene		Einsatz verschiedener AR-Overlays, um bei den Schülerinnen und Schülern ein tieferes Verständnis für die Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrostreaktor zu generieren
<b>Station 2: Zukunfts-technologie 3D-Drucker</b>	Nutzung von CAD-Software, Nutzung eines 3D-Druckers, Überführung eines digitalen Molekülmodells in ein reales 3D-Modell	Erstellung von Molekülmodellen durch die Lehrkraft für anschauliches Unterrichten, Einsatz von CAD-Programm und 3D-Drucker als Schülerwerkzeug	Einsatz von CAD-Programm und 3D-Drucker als Alternative zu Molekülbaukästen, Möglichkeit komplexere Molekülmodelle – an die jeweilige Lerneinheit angepasst – anzufertigen	Einsatz von CAD-Programm und 3D-Drucker zur Erzeugung eines tieferen Schülerin- und Schülerverständnisses für räumliche Molekülstrukturen
<b>Station 3: Energie in der Chemie</b>	Nutzung einer Wärmebildkamera zur Erzeugung eines Infrarotbildes	Visualisierung von Energieumsätzen in physikalischen Vorgängen und chemischen Reaktionen	Möglichkeit der kontaktfreien Temperaturmessung, zeitgleiche Temperaturmessung an mehreren Messpunkten und Erstellung eines Temperaturprofils	Nutzung eines Falschfarbentbilds zur Unterstützung beim Aufbau eines Energiekonzepts anhand konkreter chem. Reaktionen seitens der Schülerinnen und Schüler
<b>Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen</b>	Verwendung von Simulationen	Forschend-entwickelnder Unterricht mit Hilfe von Simulationen	Simulation von Wunderkerzenmischungen, die aufgrund ihrer Reaktivität nicht von Schülerinnen und Schülern hergestellt werden dürfen	Durchlaufen eines digitalen Forschungszyklus zur Entwicklung einer funktionierenden Wunderkerzenmischung, Darstellung der Funktionen der einzelnen Wunderkerzenbestandteile beim Durchlaufen der Simulation
<b>Station 5: Nanowelten</b>	Bedienung eines Rasterkraftmikroskops, Animation	Einsatz von Animationen als digitale Modelle	Visualisierungsmöglichkeit von Strukturen in der Größenordnung von Mikro- und Nanometer mittels Rasterkraftmikroskop	Verwendung des Lichtzeigerprinzips zum Kennenlernen der Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskops

Seminarteilnehmer wird mit Hilfe einer quantitativen Studie im Prä-Post-Follow-Up-Design untersucht und dokumentiert. Die Ergebnisse der Erhebung aus den Jahren 2020 und 2021 sollen Gegenstand einer zukünftigen Publikation sein. Zudem führten mehrere Lehramtsstudierende im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten qualitative Studien zu videographierten Stationdurchführungen an. Diese Ergebnisse sollen ebenfalls aufgezeigt werden.

In der Pilotstudie bekräftigten die Seminarteilnehmenden den Nutzen der digitalen Medien im chemischen Experiment, was sich auch in der folgenden Auswahl an Zitaten aus erstellten Reflexionspapieren widerspiegelt:

„Neben dem sicherer werden [sic] konnte ich noch einen weiteren Vorteil der Wärmebildkamera gegenüber dem Thermometer im Laufe der Durchführungen der Station entdecken. Die Wärmebildkamera kann auch sehr gut die Energieerhaltung veranschaulichen.“

„Ziel des Einsatzes der Wärmebildkamera war es jedoch, den Schülerinnen und Schüler deutlich zu machen, dass sie Dinge, die sie fühlen können, wie zum Beispiel eine warme Schale, auch hiermit bestätigen können. Exotherme und endotherme Reaktionen lassen sich auf diese Weise für die Schülerinnen und Schüler sichtbar machen und schaffen ein besseres Verständnis.“

„Die Schülerinnen und Schüler sollen sich mit den Chemikalien im Einzelnen auseinandersetzen und über die Funktionen jeder einzelnen Chemikalie für den gesamten Versuch zu dem Schluss kommen, in welcher Menge die Chemikalien eingesetzt werden sollen. Durch das digitale Medium zeigt sich also auch der hohe Stellenwert des richtigen Mischungsverhältnisses für das sichere Gelingen des Versuches.“

## 6. Ausblick

Lehramtsstudierende müssen in Zeiten ständiger Weiterentwicklung von digitalen Medien bereits während ihres universitären Studiums in die Nutzung und das Potential von digitalen Medien eingeführt werden. Für das Unterrichtsfach Chemie ergibt es zudem die Notwendigkeit, der Integration von digitalen Medien im chemischen Experiment zur Messwerterfassung und Visualisierung besondere Beachtung zukommen zu lassen. Aufgrund der immer schneller voranschreitenden technischen Entwicklung von digitalen Medien sollte nicht mehr nur das Üben des Einsatzes eines bestimmten Mediums, sondern vielmehr die Entwicklung von grundlegenden digitalen Wissensdimensionen wie das *Digitalitätsbezogene Wissen* (DK), das *Technological Content Knowledge* (TCK), das *Technological Pedagogical Knowledge* (TPK) und das *Technological Pedagogical Content Knowledge* (TPACK) – als Voraussetzung für lebenslanges Lernen – in die Lehramtsausbildung integriert werden, damit angehende Lehrkräfte auch zukünftige digitale Medien gewinnbringend in ihrem Unterricht einsetzen können.

### Danksagung

Das Projekt „Di-Fa<sup>M</sup><sub>Ch</sub>“ wird im Rahmen der gemeinsamen „Qualitätsoffensive Lehrerbildung“ von Bund und Ländern aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Hierfür möchten wir uns recht herzlich bedanken. Ein besonderer Dank geht zudem an alle Schülerinnen und Schüler, die mit ihrer Evaluation die Entwicklung der neuartigen Wunderkerzen erst ermöglicht haben.

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Literatur

- [1] Haupt, O. J. et al. (2013). Schülerlabor – Begriffsschärfung und Kategorisierung. *Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht* 66/6, 324–330.
- [2] Mishra, P., Koehler, M. J. (2006). *Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge*. Teachers College Record 108, 1017–1054.
- [3] Klinzing, H. G. (2002). Wie effektiv ist Microteaching? Ein Überblick über fünfunddreißig Jahre Forschung. *Zeitschrift für Pädagogik* 48/2, 194–214.
- [4] Becker, S. et al. (2020). Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKoLAN. In: Becker, S., Meßinger-Koppelt, J., Thyssen, C. (Hrsg.). *Digitale Basiskompetenzen – Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*. Joachim-Herz-Stiftung, Hamburg, 14–43.
- [5] Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. *Educational Researcher* 15/2, 4–14.
- [6] Koehler, M. J., Rosenberg, J. *The TPACK Framework*. tpack.org (letzter Zugriff am 14.4.2021).
- [7] Huwer, J. et al. (2019). Von TPACK zu DPACK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen *MNU* 72/5, 358–364.
- [8] Weisermann, M., Kampschulte, L., Schwarzer, S. (2018). Silber einmal anders. Leidenfrost-Synthese und Risikobewertung von Silber-Nanopartikeln. *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie* 29/164, 27–31.
- [9] Huwer, J., Brünken, R. (2018). Naturwissenschaften auf neuen Wegen – Individualisierung mit Tablets im Chemie-Unterricht. *Computer + Unterricht* 110, 7–10.
- [10] Johnstone, A. H. (2000). Teaching Of Chemistry – Logical or Psychological? *Chem. Educ. Res. Pract.* 1/1, 9–15.
- [11] Dilling, F. (2019). Der Einsatz der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht. Theoretische Grundlagen und exemplarische Anwendungen für die Analysis. Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Spektrum, Wiesbaden.
- [12] Scheid, M., Hock, K., Schwarzer, S. (2019). 3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions – Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments. *WJCE* 7/2, 72–83.
- [13] Wagner, T., Flint, A. (2018). Energie für Chemie oder Chemie für Energie? *Chemkon* 25/3, 98–103.
- [14] Bohrmann-Linde, C., Kleefeldt, S. (2020). Der Wärme auf der Spur – Einsatz von Wärmebildkameras bei chemischen Schulversuchen. *Naturwissenschaften im Unterricht – Chemie* 177/178, 20–23.
- [15] Scheid, M. et al. (2020). Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: ein bewährter Schulversuch im neuen Licht. *Chemkon* (online first), <https://doi.org/10.1002/ckon.202000054>.
- [16] Scheid, M. (2020). Videotutorial: Herstellung von Wunderkerzen. <https://player.vimeo.com/video/464925052> (letzter Zugriff am 4.3.2021).
- [17] Schwarzer, S. et al. (2015). Using Atomic Force Microscopy in Out-of-School Settings -Two Case Studies Investigating the Knowledge and Understanding of High School Students. *Journal of Nano Education* 7/1, 10–27.

Eingegangen am 6. August 2021

Angenommen am 19. November 2021

Online veröffentlicht am ■■. ■■. 0000

5.7 Publikation 7 (in Vorbereitung): Förderung von digitalen Kompetenzen bei angehenden Chemielehrkräften. Kombination eines universitätsübergreifenden Lehr-Lern-Labors mit einem universitären Seminarsetting

Michael A. Martens, Maike Busker & Stefan Schwarzer

MARTENS, M. A., BUSKER, M. & SCHWARZER, S. (in Vorbereitung). Förderung von digitalen Kompetenzen bei angehenden Chemielehrkräften. Kombination eines universitätsübergreifenden Lehr-Lern-Labors mit einem universitären Seminarsetting.

**Beiträge der Autoren:**

Michael A. Martens erstellte unter Anleitung von Stefan Schwarzer die Interventionsstudie. Das Manuskript wurde von Michael A. Martens geschrieben. Die Seminardurchführungen und Erhebungen in München und Tübingen fanden unter der Leitung von Stefan Schwarzer statt, in Flensburg unter der Leitung von Maike Busker.

Die vollständigen, papierbasierten Fragebögen sind in den Anhängen 2-4 dieser Dissertation zu finden.

**Copyright:**

Lehrerbildung@LMU, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2022.

# Förderung von digitalen Kompetenzen bei angehenden Chemielehrkräften. Kombination eines universitätsübergreifenden Lehr-Lern-Labors mit einem universitären Seminarsetting

Michael A. Martens, Maike Busker und Stefan Schwarzer

*Die digitalisierte Welt verlangt von der universitären Lehrer:innenbildung eine Vorbereitung angehender Lehrkräfte auf das Unterrichten mit digitalen Medien bereits während ihres Studiums. Im Fach Chemie müssen hierzu chemiespezifische Besonderheiten wie bspw. der Einsatz digitaler Medien im chemischen Experiment zur Messwerterfassung und die Visualisierung submikroskopischer Prozesse berücksichtigt werden. Hierzu wurde in der Abteilung für Didaktik der Chemie an der LMU München ein Schülerlaborprogramm\* mitsamt einem universitären Seminar für Lehramtsstudierende des Fachs Chemie entwickelt, durchgeführt und evaluiert. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der begleitenden Interventionsstudie vorgestellt.*

## Einleitung

Die Entwicklung von praktischen, universitären Ausbildungsangeboten zum Unterrichten in einer digitalisierten Welt (vgl. KMK 2017) ist eine wichtige Aufgabe der Hochschuldidaktik in der universitären Lehrer:innenbildung. In der Chemiedidaktik gilt es insbesondere den Einsatz digitaler Medien im chemischen Experiment zu fördern. Dies unterstützt bei Schüler:innen z.B. den Übergang von der phänomenologischen bzw. makroskopischen zur submikroskopischen Teilchenebene (vgl. Scheid et al. 2018: 20ff). Bei der Konzeption von entsprechenden universitären Seminaren gibt es eine Vielzahl an Parametern zu beachten, die in die Kategorien Wissen, Kompetenzen und Fähigkeiten sowie Einstellungen zum Einsatz digitaler Medien im Chemieunterricht unterteilt werden können (vgl. Walpert & Wodzinski 2021: 765ff). Damit die Studierenden die für das Unterrichten in einer digitalisierten Welt benötigten Kompetenzen erwerben können (vgl. Blossfeld et al. 2018: 21f; Bertelsmann Stiftung 2018: 19ff), wurden im Rahmen des Kooperationsprojekts „DiFaM<sup>Ch</sup>“ der Mathematik- und Chemiedidaktik zwei universitäre Seminare konzipiert, durchgeführt und evaluiert, welche die Betreuung von Schüler:innen in Schülerlaboren unter Einbezug digitaler Medien fokussieren (vgl. Martens & Schwarzer, 2022). In diesem Beitrag werden Methodik und Forschungsergebnisse der begleitenden Interventionsstudie aus der Teilerhebung der Chemiedidaktik vorgestellt.

*\*Eine gendergerechte Schreibweise ist den Autoren sehr wichtig. Da es sich bei dem Wort „Schülerlabor“ allerdings um einen fest stehenden Begriff handelt, siehe [www.lernortlabor.de](http://www.lernortlabor.de), wird bei diesem Wort als auch bei daraus zusammengesetzten Wörtern auf den Gender:Doppelpunkt verzichtet.*

Das Hauptaugenmerk der begleitenden Interventionsstudie lag auf der Beobachtung, ob

- a) das *Digital Knowledge* (DK) sowie das *Digital Pedagogical Knowledge* (DPK) (vgl. Huwer et al. 2019: 358ff) bei den Seminarteilnehmer:innen durch die Intervention im Lehr-Lern-Labor einen Zuwachs aufweisen,
- b) die Selbstwirksamkeitserwartung der am Seminar teilnehmenden Lehramtsstudierenden im Umgang mit und zum Einsatz von digitalen Medien eine Steigerung aufweist und
- c) die Werteeinstellung der Seminarteilnehmer:innen gegenüber digitalen Medien eine Veränderung erfährt.

Während bei a) das Wissen von angehenden Lehrkräften im Rahmen des DPACK-Modells (vgl. Huwer et al. 2019: 358ff) betrachtet wurde, handelt es sich bei den unter den Punkten b) und c) subsummierten Konstrukten um die Einstellungen und Selbstwirksamkeitserwartungen zum Einsatz von digitalen Medien im Unterricht.

## Schülerlaborprogramm

Um die intendierten digitalen Kompetenzen den Student:innen zu vermitteln, wurde eigenes ein Schülerlaborprogramm mit fünf Experimentierstationen konzipiert sowie evaluiert (vgl. Martens & Schwarzer, 2022). Die fünf Experimentierstationen sowie die dabei eingesetzten digitalen Medien sind folgende:

- Synthese von Silbernanopartikeln (Augmented Reality, Animation)
- Zukunftstechnologie 3D-Druck (CAD-Programm, 3D-Druck)
- Energie in der Chemie (Infrarotbild)
- „Grüne“ Wunderkerzen (Simulation)
- Nanowelten (Simulation, Aufnahme einer Oberflächenstruktur mittels Rasterkraftmikroskop)

Exemplarisch für das Experimentierprogramm werden zwei der fünf Stationen im Folgenden genauer vorgestellt.

### **Synthese von Silbernanopartikeln**

Die Schüler:innen werden an dieser Station mit Hilfe von Augmented Reality digital beim chemischen Experiment sowie beim Verstehen der zugrundeliegenden Theorien unterstützt. Je zwei Schüler:innen erhalten zum Abrufen der Augmented Reality Inhalte ein iPad. Hierbei soll die Individualisierung gefördert, da die Schüler:innen in ihrem eigenen Tempo die Experimentierstation durchlaufen können. Als Overlays kommen Animationen, ein Podcast sowie die Lösungen der Stationsarbeitsblätter zum Einsatz. Mit Hilfe der Animationen können die Schüler:innen während des Experimentierens die Vorgänge auf der Teilchenebene (submikroskopische Ebene) verfolgen, wodurch ein tieferes Verständnis sowie die Verknüpfung der Theorie mit dem praktischen chemischen Experimentieren entsteht.

### **„Grüne“ Wunderkerzen**

Der fachchemische Inhalt dieser Experimentierstation ist der Herstellung sowie das Abbrennen von ökologisch und toxikologisch unbedenklicheren und somit „grünen“ Wunderkerzen (vgl. Scheid et al. 2022). Um den forschenden Charakter eines Schülerlabors Rechnung zu tragen, erarbeiten die Schüler:innen dazu vor der Herstellung ihre eigene Mischung der verschiedenen Edukte in der Wunderkerze. Hierzu steht den Schüler:innen eine selbst entwi-

ckelte Simulation (vgl. Abb. 1) zur Verfügung. Mit dieser durchlaufen die Schüler:innen mehrmals den Forschungszyklus in digitaler Form. Hierdurch ist eine zeitsparende und somit effiziente Implementierung des Forschungszyklusses möglich. Am Ende der Forschungszyklusses haben die Schüler:innen nicht nur ihre eigene „grüne“ Wunderkerzenmischung erstellt, sondern sich auch Fachwissen über die Funktionen der einzelnen Chemikalien in der Wunderkerzenmischung angeeignet. Zudem ist es den Schüler:innen mit der Simulation möglich Mischungen, die aufgrund der Vorgaben von der Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht verboten sind, in digitaler Version zu erproben und auch hieraus Erkenntnisse zu gewinnen.

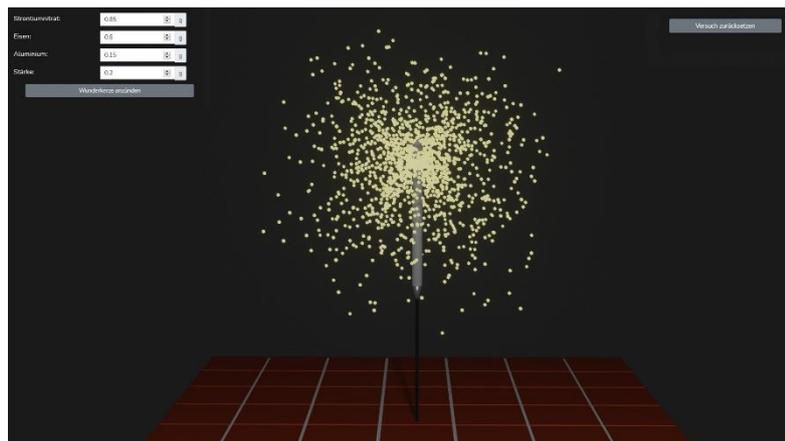


Abb. 1: Simulation des Abbrennens einer „grünen“ Wunderkerze

## Seminarsetting und Methodik

Für das Projekt „DiFaM<sup>Ch</sup>“ wurde in der Abteilung Didaktik der Chemie für das bereits existierende Schülerlabor LMU<sup>chemlab</sup> ein neues Schülerlaborprogramm entwickelt, das sich mit Experimenten aus der aktuellen fachchemischen Forschung zu modernen Materialien befasst und dabei digitale Medien einbezieht. Es besteht aus fünf Experimentierstationen, die von je einem:r Lehramtsstudent:in betreut werden. In einem begleitenden universitären Seminar konnten sich die Student:innen mit den chemischen Experimenten sowie den eingesetzten digitalen Medien vertraut machen, bei der Entwicklung didaktischer Konzepte zur Nutzung der digitalen Medien unterstützt und zur Selbstreflexion mithilfe von videographierten Microteachingsituationen im Schülerlabor zur Selbstreflexion angeregt werden (vgl. Martens & Schwarzer 2022).

Um bei der Evaluation des Seminars Standorteffekte zu vermeiden, die beispielsweise durch mögliche Vorkenntnisse der Seminarteilnehmer:innen bedingt waren, wurde das Seminar an der Ludwig-Maximilians-Universität München sowie in Zusammenarbeit mit der Abteilung für Chemie und ihre Didaktik der Europa-Universität Flensburg und der Abteilung Didaktik der Chemie der Eberhard Karls Universität Tübingen angeboten sowie evaluiert. Das Seminar wurde dreimal in München sowie je einmal in Flensburg und Tübingen realisiert. Im Sommersemester 2020 musste wegen der Covid-19-Pandemie ein viertes Seminar in München entfallen und einige Lehrveranstaltungen konnten nur in abgeänderter Form stattfinden. Grund dafür ist zum einen die Reduktion der Schüler:innenanzahl auf 50 Prozent, bedingt

durch die zum Zeitpunkt der Durchführung geltenden Hygienevorschriften, wodurch die Microteaching-Gruppen in der Mehrheit der Fälle nur aus zwei bis drei Schüler:innen bestanden. Zum anderen mussten ganze Schülerlabortage aufgrund von Schulschließungen oder kurzfristiger Quarantäne einzelner Klassen von Microteaching auf Peerteaching umgestellt werden. Beim Peerteaching nehmen Studierende die Rolle der lernenden Schüler:innen im Schülerlaborsetting ein (vgl. Klinzing 2002: 198). Das von Mitte Februar bis Anfang März 2020 in Flensburg abgehaltene Seminar war die einzige Durchführung, die nicht von Covid-19-Maßnahmen reglementiert wurde. Die drei in München veranstalteten Seminare waren alle eine Mischform aus Peer- und Microteaching und das in Tübingen angebotene Seminar konnte ausschließlich als Peerteaching angeboten werden.

Insgesamt engagierten sich im Zeitraum von Februar 2020 bis Februar 2022 63 Student:innen in fünf Seminaren. An der begleitenden Studie nahmen alle Seminarteilnehmer:innen teil, wobei nicht von allen Proband:innen Fragebögen zu allen drei Messzeitpunkten vorlagen. Die Studie wurde in einem quasi-experimentellen Kontrollgruppendesign mit Prä-, Post- und Follow-Up-Fragebögen durchgeführt. Während die Erhebung bei den Seminarteilnehmer:innen in Flensburg noch als Paper-Pencil-Test realisiert wurde, erfolgten alle weiteren Erhebungen aufgrund der Covid-19-Pandemie online.

Als Kontrollgruppe wurden in anderen Seminaren und Vorlesungen an der Ludwig-Maximilians-Universität München 58 Student:innen befragt, eine Randomisierung erfolgte dabei nicht. Es wurde aber ausgeschlossen, dass die Proband:innen der Kontrollgruppe bereits an der Intervention teilgenommen hatten. Alle Erhebungen wurden in pseudonymisierter Form vorgenommen, wodurch die Entwicklung der Einstellungen gegenüber digitalen Medien im Unterricht sowie der Wissenszuwachs der einzelnen Studierenden im Rahmen der Auswertung nachvollziehbar waren. Dementsprechend erfolgte die Berechnung der Effektstärken als verbundene Stichproben. Die genaue Proband:innenanzahl der einzelnen Seminarveranstaltungen kann Anhang 1 entnommen werden.

Der eingesetzte Fragebogen enthielt ratingskalierte Fragen, Single-Choice-Fragen und offene Antwortformate. Zur Überprüfung des Lernzuwachses des *Digital Knowledge* und *Digital Pedagogical Knowledge* sowie der Werteeinstellung gegenüber digitalen Medien wurden eigene Items entwickelt. Die Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien im Unterricht wurde mit Hilfe eines von Jerusalem und Schwarzer (1999: 13f) erstellten und eigens an digitale Medien angepassten Konstrukts erhoben, welches mit zusätzlichen, selbst entwickelten Items erweitert wurde. Darüber hinaus wurden die allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung sowie personenbezogene und soziodemographische Angaben der Student:innen abgefragt, um diese in Bezug zu den Effekten der Intervention setzen zu können. Die Onlineerhebung wurde analog dazu durchgeführt. Der Fragebogen wurde im Rahmen eines Seminars und des dazugehörigen Schülerlaborprogramms im Wintersemester 2019/2020 an der Ludwig-Maximilians-Universität München auf seine interne Konsistenz mit elf Studierenden pilotiert.

Die einzelnen Items der Fragebögen sind in Tabelle 1 unter Einordnung in das jeweilige Konstrukt dargestellt. Alle ratingskalierten Items haben eine fünfstufige Likert-Skala von trifft nicht zu (1) über trifft eher nicht zu (2), teils-teils (3) und trifft eher zu (4), bis hin zu trifft zu (5).

Tabelle 1: Konstrukte und Items des Fragebogens.

Konstrukt	Bezugsquelle	Item	Antwortformat
Allgemeine personenbezogene und soziodemographische Angaben		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alter</li> <li>• Geschlecht</li> <li>• Studiengang (Schulart)</li> <li>• Zweitfach</li> <li>• Anzahl Fachsemester Chemie</li> <li>• Letzte Note Chemiedidaktik</li> <li>• Letzte Note Anorganische Chemie</li> </ul>	Divers, an das jeweilige Item angepasst
Selbstwirksamkeitserwartung	Jerusalem und Schwarzer (1999: 13f)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Lösung schwieriger Probleme gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.</li> <li>• Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele zu verwirklichen.</li> <li>• Schwierigkeiten sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten vertrauen kann.</li> <li>• Wenn eine neue Sache auf mich zukommt, weiß ich, wie ich damit umgehen kann.</li> <li>• Wenn ein Problem auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.</li> </ul>	Ratingskaliert
Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien	Eigener Entwurf, teilweise nach der Vorlage von Jerusalem und Schwarzer (1999: 13f)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Lösung von schwierigen Problemen im Umgang mit digitalen Medien gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.</li> <li>• Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele im Umgang mit digitalen Medien zu verwirklichen.</li> <li>• Schwierigkeiten mit digitalen Medien sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien vertrauen kann.</li> <li>• Wenn ich unbekannte digitale Medien nutzen soll, weiß ich schnell, wie ich damit umgehen kann.</li> <li>• Wenn ein Problem in der Nutzung von digitalen Medien auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.</li> <li>• Ich nutze digitale Medien häufig für private Arbeiten, da diese mir meine Arbeit erleichtern.</li> <li>• Das Unterrichten von komplexen Sachverhalten gelingt mir mit Hilfe von digitalen Medien besser als ohne Unterstützung von digitalen Medien.</li> <li>• Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, digitale Medien didaktisch gewinnbringend im Unterricht einzusetzen.</li> </ul>	Ratingskaliert

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mit Hilfe von digitalen Medien kann ich meinen Unterricht bereichern.</li> </ul>	
Einstellungen gegenüber digitalen Medien im Unterricht	Eigener Entwurf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ich nutze digitale Medien gerne in meinem Unterricht.</li> <li>• Ich nutze digitalen Medien häufig in meinem Unterricht.</li> <li>• Digitale Medien sind für einen guten Unterricht unerlässlich.</li> <li>• Digitale Medien helfen mir, meinen Chemieunterricht zu verbessern.</li> <li>• Digitale Medien helfen den Schülerinnen und Schülern, komplexe Sachverhalte schneller zu verstehen.</li> <li>• Digitale Medien bieten didaktische Möglichkeiten, welche klassische Medien nicht vorzuweisen haben.</li> <li>• Digitale Medien helfen mir, meinen Unterricht individueller an die Bedürfnisse meiner Schülerinnen und Schüler anzupassen.</li> </ul>	Ratingskaliert
DPACK	Eigener Entwurf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DK: 4 Items zur Korrektheit von Aussagen zu Augmented Reality, CAD-Softwares, Wärmebildkameras sowie Animationen und Simulationen.</li> <li>• DPK: 4 Items zur Korrektheit von Aussagen zum Einsatz von Augmented Reality, CAD-Softwares und 3-Druckern, Wärmebildkameras, Animationen und Simulationen im Chemieunterricht.</li> </ul>	Single-Choice
Fragen zum Schülerlaborprogramm und universitären Begleitseminar	Eigener Entwurf	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche weiteren Anregungen und Hinweise wollen Sie dem aktuellen Schülerlaborprogramm mit auf den Weg geben?</li> <li>• Welche weiteren Anregungen und Hinweise wollen Sie dem aktuellen Seminar zum Schülerlabor mit auf den Weg geben?</li> </ul>	Offen

## Ergebnisse der Interventionsstudie

Um die Reliabilität und damit die interne Konsistenz der Konstrukte beurteilen zu können, wurden für die likert-skalierten Konstrukte die Cronbachs  $\alpha$ -Werte bei der Prä-Testung aller Teilgruppen ( $N = 113$ ) bestimmt (vgl. Tabelle 2). Die Anzahl der gültigen Fälle bei einzelnen Konstrukten ist aufgrund von ungültigen Antworten unterschiedlich groß und geringer als die Gesamtprobandenzahl aller Prä-Testungen.

Tabelle 2: Interne Konsistenz der likert-skalierten Konstrukte.

Konstrukt	Anzahl Items	Gültige Fälle	Cronbachs $\alpha$
Allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung	5	N = 113	.631
Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien	9	N = 111	.855
Einstellungen gegenüber digitalen Medien im Unterricht	7	N = 110	.819

In der Literatur hat das von Jerusalem und Schwarzer (1999: 13f) entwickelte Konstrukt „Allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung“ einen Cronbachs  $\alpha$ -Wert von .78, in der hier vorgestellten Studie liegt der Cronbachs  $\alpha$ -Wert hingegen bei .631. Die beiden Konstrukte „Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien“ sowie „Einstellungen gegenüber digitalen Medien im Unterricht“ weisen mit Cronbachs  $\alpha$ -Werten von .855 und .819 eine hohe interne Konsistenz der Items auf. Im weiteren Verlauf des Artikels wird nur auf die letzten beiden Konstrukte sowie den Wissenszuwachs beim *Digital Knowledge* und *Digital Pedagogical Knowledge* eingegangen, da hierauf der Fokus der Studie liegt.

In der Follow-Up-Erhebung war ein starker Rückgang an Teilnehmenden sowohl bei der Interventionsgruppe als auch in der Kontrollgruppe festzustellen. Aus diesem Grund wird die Follow-Up-Erhebung der Kontrollgruppe, die aus nur acht Proband:innen bestand und somit nicht repräsentativ ist, nicht dargestellt. Da für die erhobenen Skalen keine Normalverteilung angenommen werden konnte, wurde der nicht-parametrische Wilcoxon-Test zur Berechnung der Effektstärken eingesetzt.

### **Wissenszuwachs beim *Digital Knowledge* und *Digital Pedagogical Knowledge***

Mit Hilfe von Wissensfragen wurde überprüft, ob das Seminar zu dem intendierten Wissenszuwachs im Umgang mit und dem unterrichtlichen Einsatz von digitalen Medien führte. Dabei wurde zwischen Wissensfragen zur Nutzung von digitalen Medien (*Digital Knowledge*) und Wissensfragen zum digitalen-pädagogischen Wissen (*Digital Pedagogical Knowledge*) unterschieden. In beiden Bereichen konnte bei der Gruppe der Seminarteilnehmer:innen ein signifikanter Wissenszuwachs (Signifikanzniveau  $< .005$ ) festgestellt werden. Während für den Wissenszuwachs im Bereich des *Digital Knowledge* ein starker Effekt ( $r = .613$ ) identifiziert werden konnte, fiel er im Bereich des *Digital Pedagogical Knowledge* moderater aus ( $r = .394$ ) und ist somit als mittlere Effektstärke einzuordnen.

Sowohl bei der Interventionsgruppe als auch bei der Kontrollgruppe wurden im Prä-Test mehr als 30 Prozent der Wissensfragen zum *Digital Knowledge* richtig beantwortet (vgl. Abb. 2). Bei der Interventionsgruppe stieg der Anteil der richtigen Antworten in der Post-Erhebung auf über 50 Prozent, wohingegen der Anteil der richtigen Antworten bei der Kontrollgruppe sich nicht signifikant erhöhte.

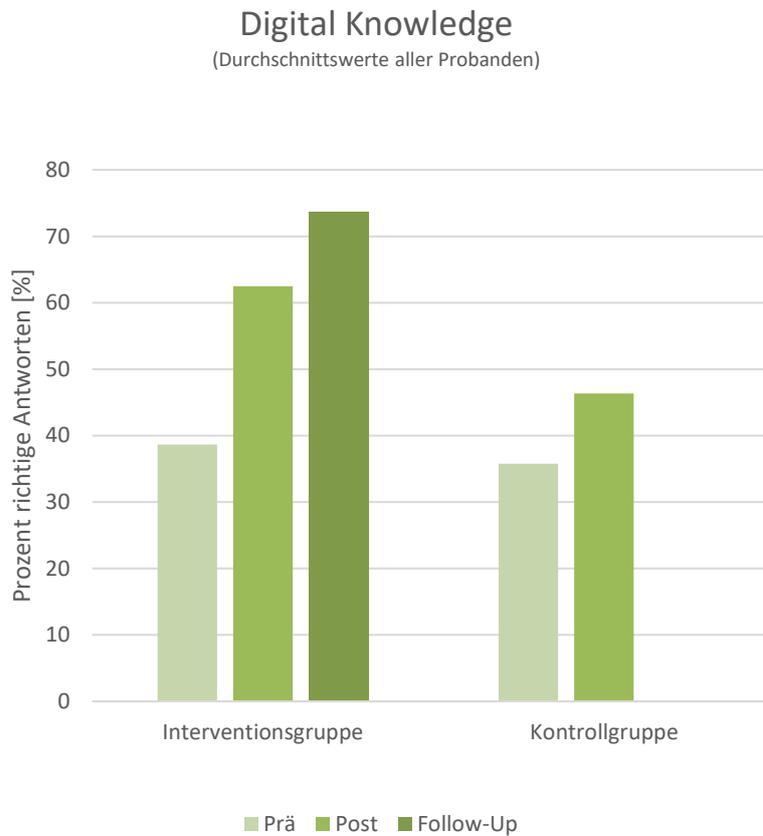


Abb. 2: Ergebnisse der Erhebung zum Digital Knowledge

Bei den Wissensfragen zum *Digital Pedagogical Knowledge* wurden in der Prä-Erhebung sowohl in der Interventions- als auch in der Kontrollgruppe etwas mehr als 25 Prozent der Fragen richtig beantwortet. Während bei der Kontrollgruppe sich hierzu in der Post-Erhebung keine signifikante Änderung zeigt, stieg der Anteil der richtig beantworteten Fragen in der Interventionsgruppe signifikant auf über 40 Prozent.

## Digital Pedagogical Knowledge

(Durchschnittswerte aller Probanden)

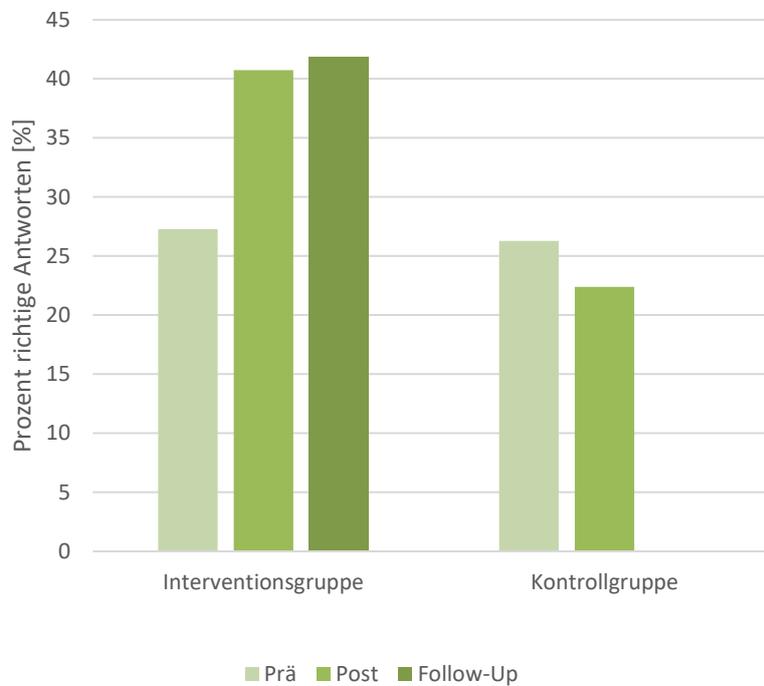


Abb. 3: Ergebnisse der Erhebung zum Digital Pedagogical Knowledge

### Steigerung der Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien:

Für die Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien konnte bei der Interventionsgruppe eine signifikante Steigerung mit mittlerer Effektstärke ( $r = .359$ ) festgestellt werden (vgl. Abb. 4). Wie bei den Wissensfragen zum *Digital Knowledge* sowie zum *Digital Pedagogical Knowledge* konnte bei der Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien bei der Kontrollgruppe keine signifikante Veränderung bei der Post-Erhebung gegenüber der Prä-Erhebung festgestellt werden.

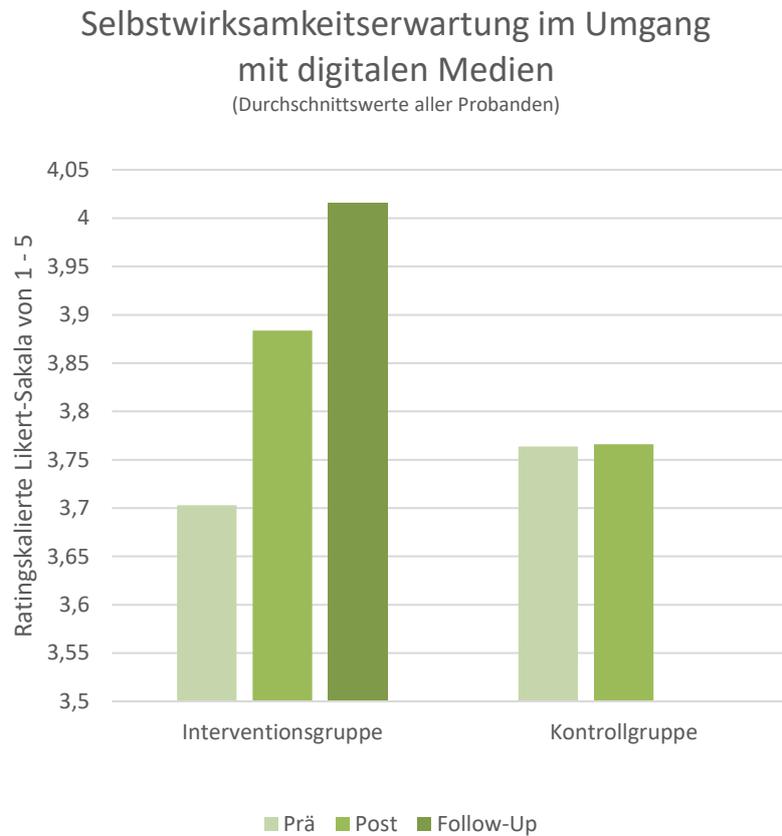


Abb. 4: Ergebnisse der Erhebung zur Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien

### Positivere Einstellung gegenüber digitalen Medien im Chemieunterricht

Die Ergebnisse der durchgeführten Interventionsstudie zeigen, dass die Teilnahme am Seminar bei den Proband:innen der Interventionsgruppe zu der intendierten Steigerung der positiven Einstellung gegenüber digitalen Medien im Chemieunterricht führte. Der Effekt mit mittlerer Effektstärke ( $r = .381$ ) war signifikant und fällt besonders im Vergleich mit der Kontrollgruppe auf, deren Einstellung sich gegenüber digitalen Medien im Chemieunterricht zwischen Prä- und Post-Test nicht signifikant unterscheidet (vgl. Abb. 5).

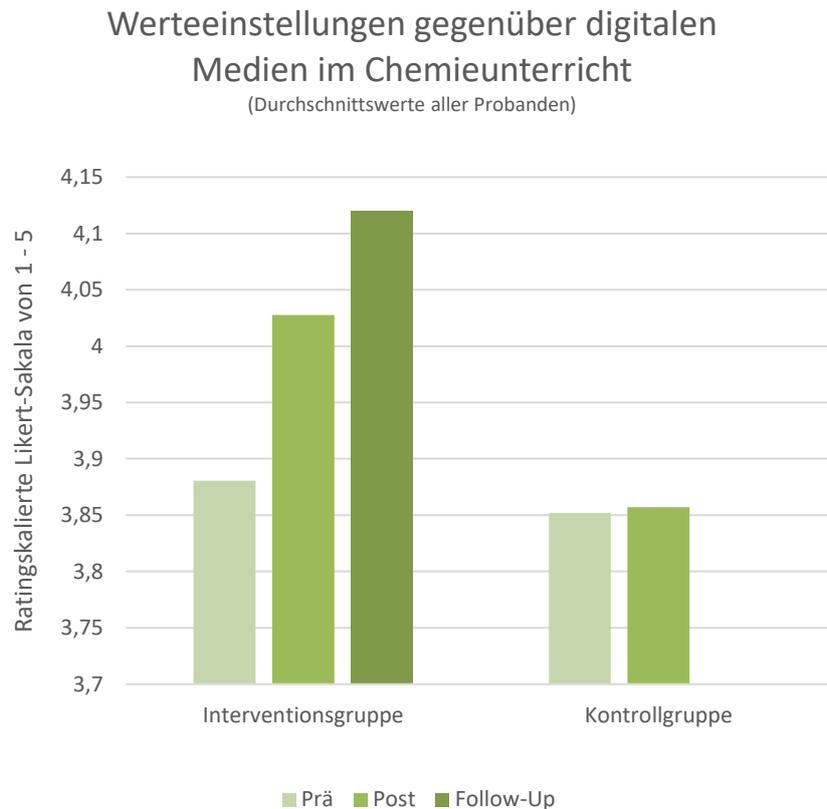


Abb. 5: Ergebnisse der Erhebung zu Einstellungen gegenüber digitalen Medien im Chemieunterricht

### Weitere Erkenntnisse

Aufgrund der Covid-19-Pandemie mussten, wie bereits erläutert, einige Schülerlabortage von Microteaching auf Peerteaching umgestellt werden. Die Seminarteilnehmer:innen begrüßten dies sowohl in direkten Gesprächen als auch in ihren Äußerungen im freien Anmerkungsfeld der Post-Erhebung. Dabei wurde deutlich, dass sich die Studierenden vor allem einen Schülerlabortag im Peerteaching-Format vor den Microteachingsituationen mit Schüler:innen wünschen. Ein reines Peerteaching, wie in der Seminardurchführung an der Universität Tübingen, wurde von den Studierenden hingegen nicht als wünschenswert betrachtet.

Die folgende Auswahl an persönlichen Zitaten von den Seminarteilnehmer:innen aus der Post-Erhebung unterstützen diese Erkenntnisse:

- „Es war schade, dass keine SuS [*Schülerinnen und Schüler, Anm. d. V.*] im Labor sein konnten, aber natürlich der Situation geschuldet. Für zukünftige Blockseminare wäre es sicher sinnvoll, den ersten Tag als Peer-Teaching zu gestalten, sodass die Studierenden in ihren Experimenten sicher werden und in den anschließenden Tagen mit den Schüler\*innen arbeiten können.“
- „Ich fand an sich die Durchführung gut. Doch habe ich festgestellt, dass mit Schülern es besser gewesen wäre [*sic*]. Wenn es mit Schülern gewesen wäre, fände ich es dennoch gut die erste oder ersten beiden Durchführungen mit Studenten zu machen. Dies hilft sehr um eine erste Routine zu bekommen. Hierbei fände ich es gut, wenn man

einmal mit einem Studenten mit der gleichen oder den gleichen Stationen macht, so kann man sich noch unterstützen und Formulierungen einüben.“

- „Vlt. ein bis zwei Tage Peerteaching, damit man in den Stationen sicher ist und dann erst die SuS ins Labor holen.“
- „Ich fände es gut nicht ins kalte Wasser geworfen zu werden, sondern den ersten Durchlauf mit einem Kommilitonen zu proben und mögliche Verbesserungsvorschläge zu erhalten.“
- „Das Peerteaching am Ende des Seminars hat mir ebenfalls gefallen, da ich zusätzlich zu meinen zwei Stationen auch die anderen Stationen erklärt bekommen habe. Zudem fand ich die Ideen meiner Kommilitonen sehr interessant und gewinnbringend.“

Zusammengefasst hat das Peerteaching vor der eigentlichen Betreuung von Schüler:innen im Microteachingformat in den Augen der Seminarteilnehmer:innen folgende Vorteile:

- Durch das Betreuen der eigenen Schüler:innenexperimentierstationen im Peerteachingformat können Probleme im Ablauf der Stationen als auch im Umgang mit den digitalen Medien sowie Experimenten im geschützten Rahmen festgestellt werden.
- Im Peerteaching bekommen die Studierenden alle Experimentierstationen des Schülerlaborprogramms gezeigt, wodurch sich ihr Erfahrungsschatz vergrößert.
- Studierende erhalten in der Rolle der Schüler:innen einen anderen Blick auf die eigenen Experimentierstationen, wenn sie dabei von anderen Studierenden angeleitet werden.

## Diskussion der Ergebnisse und Befunde

Die Ergebnisse der Interventionsstudie zeigen, dass das konzipierte Seminar einen positiven Effekt auf die Studierenden in ihrem Umgang mit und Einstellung zu digitalen Medien hatte. Ein Wissenszuwachs im Bereich des *Digital Knowledge* sowie *Digital Pedagogical Knowledge* war aufgrund der Betreuungssituationen sowie der dabei erforderlichen Handhabung von digitalen Medien bei den Seminarteilnehmer:innen erwartbar. Die Steigerung der Selbstwirksamkeitserwartung sowie der Werteeinstellung gegenüber digitalen Medien hingegen ist als ein Erfolg des Seminars zu werten, da durch möglicherweise nicht funktionierende digitale Medien oder didaktische Vorbehalte auch keine belegbaren Effekte bei den Studierenden möglich gewesen wären.

Obwohl insgesamt 63 Proband:innen an der Studie teilgenommen haben und die dargestellten Effekte signifikant sind, sollten die Ergebnisse nur als erste Anhaltspunkte für zukünftige Forschungsvorhaben angesehen werden, da sie aufgrund der unterschiedlichen Interventionssettings durch die Covid-19-Pandemie nur eine begrenzte Vergleichbarkeit besitzen. Eine Durchführung des Seminars mit begleitender Interventionsstudie unter standardisierten Bedingungen wäre somit wünschenswert.

Darüber hinaus sollten bei einer standardisierten Erhebung mit einer größeren Proband:innenzahl die Steigerung der Testergebnisse von der Post- zur Follow-Up-Erhebung genauer betrachtet werden. Teilweise wurde die Follow-Up-Erhebung in den Semesterferien durch-

geführt, was zu geringen Teilnahme an der Erhebung geführt hat. Eine Analyse der zusammenhängenden Daten zeigt, dass besonders leistungsstarke Student:innen, die auch bei der Prä- und Posttestung bereits höhere Werte als der Durchschnitt erzielten, vermehrt an den Follow-Up-Erhebungen teilnahmen. Dies kann als eine mögliche Erklärung für die Steigerung von der Post- zur Follow-Up-Erhebung herangezogen werden. Darüber hinaus sind aber auch Retest-Effekte denkbar.

## Fazit und Ausblick

Der Einsatz digitaler Medien im Lehr-Lern-Labor scheint geeignet, um die Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien bei angehenden Lehrkräften zu erhöhen und ihre Einstellungen gegenüber digitalen Medien zu verbessern. Das Setting führte zudem zu einer empirisch signifikanten Steigerung des *Digital Knowledge* sowie des *Digital Pedagogical Knowledge* in Bezug auf digitale Medien.

Die nicht geplanten Seminar-Setting-Änderungen aufgrund der Corona-Pandemie und den damit verbundenen Auswirkungen auf die beschriebenen Interventionen führten zu der Erkenntnis, dass eine Phase des Peerteachings vor dem eigentlichen Schülerlaborbetrieb mit der Betreuung von Schüler:innen im Microteaching sinnvoll erscheint und von den Seminarteilnehmer:innen gewünscht wird.

## Literaturangaben

- Bertelsmann Stiftung; CHE Centrum für Hochschulentwicklung gGmbH; Deutsche Telekom Stiftung & Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft (2018). *Lehramtsstudium in der digitalen Welt – Professionelle Vorbereitung auf den Unterricht mit digitalen Medien?! Eine Sonderpublikation aus dem Projekt »Monitor Lehrerbildung«*. Online: [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Monitor\\_Lehrerbildung\\_Broschuere\\_Lehramtsstudium\\_in\\_der\\_digitalen\\_Welt.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Monitor_Lehrerbildung_Broschuere_Lehramtsstudium_in_der_digitalen_Welt.pdf), letzter Zugriff am 31. März 2022.
- Blossfeld, Hans-Peter; Bos, Wilfried; Daniel, Hans-Dieter; Hannover, Bettina; Köller, Olaf; Lenzen, Dieter; McElvany, Nele; Roßbach, Hans-Günther; Seidel, Tina; Tippelt, Rudolf & Wößmann, Ludger (2018). *Digitale Souveränität und Bildung. Gutachten*. Münster. Waxmann.
- Huwer, Johannes; Irion, Thomas; Kuntze, Sebastian; Schaal, Steffen & Thyssen, Christoph (2019). Von TPaCK zu DPaCK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. *Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht*, 72/5, 358-364.
- Jerusalem, Matthias & Schwarzer, Ralf (1999). Allgemeine Selbstwirksamkeitserwartung (WIRKALL\_r). In: Schwarzer, Ralf & Jerusalem, Matthias (Hrsg.): *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen. Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuchs Selbstwirksame Schulen*. Berlin. 13-14.
- Klinzing, Hans Gerhard (2002). Wie effektiv ist Microteaching? Ein Überblick über fünfundsiebzig Jahre Forschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 48/2, 194-214.
- KMK - Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2017). *Bildung in der digitalen Welt. Strategiepapier der Kultusministerkonferenz*. Online: [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie\\_2017\\_mit\\_Weiterbildung.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie_2017_mit_Weiterbildung.pdf), letzter Zugriff 31. März 2022.

- Martens, Michael A. & Schwarzer, Stefan (2022). Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors. *CHEMKON* (online first). DOI: 10.1002/ckon.202100063.
- Scheid, Michael; Hock, Kristina & Schwarzer, Stefan (2018). Kunststoffe und 3D-Druck – Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaukastens. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 29(164), 20-26.
- Scheid, Michael; Rusan, Magdalena; Pohl, Laura; Klapötke, Thomas M. & Schwarzer, Stefan (2022). Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: Ein bewährter Schulversuch im neuen Licht. *CHEMKON*, 29(3), 92-101.
- Walpert, Daniel & Wodzinski, Rita (2021). Einstellungen von Studierenden zur Vermittlung digitaler Kompetenzen. In: Habig, Sebastian (Hrsg.): *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik online Jahrestagung 2020*. Duisburg-Essen. Universität Duisburg-Essen: 765-768.

## Über die Autor:innen

**Michael A. Martens**, geb. Scheid, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Projekts „DiFam<sup>Ch</sup>“. Er studierte von 2012 bis 2018 Chemie und Geographie für das gymnasiale Lehramt an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 2018 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Stefan Schwarzer in der Chemiedidaktik. Im Rahmen seiner Promotion gilt sein Interesse der Visualisierung submikroskopischer Prozesse mit Hilfe von digitalen Medien sowie der Entwicklung von ökologisch und toxikologisch unbedenklicheren Pyrotechnika.

**Korrespondenzadresse:** michael.scheid@cup.lmu.de

**Prof. Dr. Maike Busker** studierte an der Universität Oldenburg die Fächer Chemie und Mathematik für das Lehramt an Gymnasien und promovierte im Arbeitskreis von Prof. Dr. Ilka Parchmann (Oldenburg, Kiel). Nach ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am IPN in Kiel erfolgt 2010 der Ruf als Juniorprofessorin für Chemie und ihre Didaktik an die Universität Flensburg. Von 2016–2017 war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Hamburg. Seit März 2017 ist sie Professorin für Chemie und ihre Didaktik an der Europa-Universität Flensburg.

**Korrespondenzadresse:** maike.busker@uni-flensburg.de

**Prof. Dr. Stefan Schwarzer** ist Leiter des Projekts „DiFam<sup>Ch</sup>“. Er 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 Schülerlabore. Die Erschließung der gesellschaftsrelevanten Inhalte findet häufig in Kooperation mit den Fachwissenschaften statt. Ebenfalls stehen Lernwirksamkeitsuntersuchungen der entwickelten Materialien im Vordergrund seiner Arbeit.

**Korrespondenzadresse:** stefan.schwarzer@uni-tuebingen.de

## Über das Projekt „DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>“

Das Projekt „DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>“ wird im Rahmen von „Lehrerbildung@LMU“ in der Qualitätsoffensive Lehrerbildung an der Ludwig-Maximilians-Universität München unter der Leitung von Professor Dr. Stefan Ufer (Didaktik der Mathematik) und Professor Dr. Stefan Schwarzer (Didaktik der Chemie) sowie der Mitarbeit von Matthias Mohr (Didaktik der Mathematik) und Michael A. Martens (Didaktik der Chemie) realisiert. Ziel des Projekts ist die Konzeption neuer Veranstaltungskonzepte zum Aufbau von professionellem Wissen zum Potential digitaler Medien im Fachunterricht und Kompetenzen zur professionellen Wahrnehmung dieses Potentials.

## Anhang

### Anhang 1: Probandenzahlen der Teilerhebungen

Seminar	Seminarteilnehmer:innen	Prä-Erhebung	Post-Erhebung	Follow-Up-Erhebung
Flensburg Frühjahrssemester 2020	11	11	11	11
München WiSe 20/21	11	11	11	5
München SoSe 2021	15	15	14	6
Tübingen SoSe 2021	16	8	16*	7
München WiSe 21/22	10	10	10	8
<b>Interventionsgruppe gesamt</b>	<b>63</b>	<b>55</b>	<b>62</b>	<b>37</b>
München Kontrollgruppe		58	48	8

\*Die Proband:innenzahl bei der Post-Erhebung zu der Semindurchführung in Tübingen im Sommersemester 2021 war größer als die Proband:innenzahl der zugehörigen Prä-Erhebung, da den Studierenden im Vorfeld des Seminars Informationen ausschließlich online zur Verfügung gestellt werden konnten und so nur wenige Proband:innen für den Prä-Test gewonnen werden konnten.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Umgesetzte Zielsetzungen dieser Arbeit

Wie in der Einleitung dieser Dissertation dargestellt, müssen angehende (Chemie-)Lehrkräfte für das Unterrichten in einer digitalisierten Welt im Verlauf ihres Studiums sowie der anschließenden praktischen Ausbildung im Referendariat selbst digitale Kompetenzen erwerben. Im Rahmen der vom BMBF initiierten Förderlinie der *Qualitätsoffensive Lehrerbildung* und durch das *Münchner Zentrum für Lehrerbildung* getragene Projekt *DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>* wurde zu diesem Zweck in der Chemiedidaktik der *Ludwig-Maximilians-Universität München* ein universitäres Praxisseminar für Lehramtsstudierende entwickelt, welches die Studierenden im Umgang mit digitalen Medien im chemischen Experiment schult. Das Ziel dieser Arbeit war somit die Konzeption von Schülerexperimentierstationen zu modernen Materialien für ein Schülerlaborprogramm, das mit Hilfe eines universitären Begleitseminars die Studierenden des Lehramts Chemie an das Unterrichten mit digitalen Medien im chemischen Experiment heranführen sollte. Für das Schülerlaborprogramm wurden fünf Experimentierstationen mit Bezug zu *modernen Materialien* neu entwickelt oder adaptiert. Diese wurden alle mit digitalen Medien erweitert, welche dabei unterschiedliche didaktische Funktionen, wie beispielsweise Messwerterfassung, Visualisierung submikroskopischer Vorgänge und eine Simulation zum Durchlaufen eines digitalen Forschungszyklus, erfüllen (vgl. Kapitel 4.5 und 5.6). Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Entwicklung neuartiger Wunderkerzen gelegt, welche in Zusammenarbeit mit der Abteilung für hochenergetische Materialien der *Ludwig-Maximilians-Universität München* zur Sicherstellung der Anwendbarkeit im Schulunterricht auf ihr Gefährdungspotential hin untersucht wurden. Auf dieser Grundlage konnte eine Schülerexperimentierstation entwickelt werden, die den Schüler\*innen die Herstellung von Wunderkerzen in kurzer Zeit sicher ermöglicht. Weitere Schülerexperimentierstationen zu dem Thema Druckfilamente und 3D-Druck sowie zur Visualisierung von Energieumsätzen in chemischen und physikalischen Vorgängen mit Hilfe von Wärmebildkameras wurden für das Schülerlaborprogramm entwickelt. Die selbst entwickelten Experimentierstationen wurden bereits in nationalen wie internationalen fachdidaktischen Zeitschriften publiziert.

Das zweite Ziel war die Entwicklung eines universitären Seminars, in dessen Verlauf die teilnehmenden Student\*innen ihr Wissen sowie ihre Kompetenzen zum *Digital Knowledge*, *Digital Pedagogical Knowledge*, der Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien im Unterricht und der Werteeinstellungen zu digitalen Medien steigern sollten. Grundlage hierfür bildeten sowohl das DPACK als auch das DiKoLAN-Modell (vgl. Kapitel 2.3 und 2.4). Die Seminarkonzeption wurde bereits in einer fachdidaktischen Zeitschrift publiziert.

Das Schülerlaborprogramm sowie das begleitende Seminar für die Studierenden wurde im Wintersemester 2019/2020 in München pilotiert und darauffolgend an den drei Standorten Flensburg, München und Tübingen durchgeführt. Eine begleitende Interventionsstudie untersuchte die Wirkung des Seminars auf die Seminarteilnehmer\*innen. Die Durchführung und Evaluation des Seminars an drei Standorten in drei Bundesländern sollte dabei Standorteffekte auf die begleitende Interventionsforschung minimieren.

In der Interventionsforschung konnte gezeigt werden, dass das Seminar bei den Studierenden zu einem Wissenszuwachs im Umgang mit digitalen Medien führt. Darüber hinaus wurde dargestellt, dass das Seminar auch zu einer gesteigerten Selbstwirksamkeitserwartung im Umgang mit digitalen Medien im Unterricht sowie einer positiveren Werteeinstellung gegenüber digitalen Medien bei den Seminarteilnehmer\*innen führt. Damit die angehenden Lehrkräfte digitale Medien in ihrem zukünftigen Unterricht einsetzen, sind beide Aspekte gleichermaßen wichtig. Die in der Einleitung dieser Arbeit aufgestellten Forschungsfragen (vgl. Kapitel 1.1) konnten im Rahmen der Interventionsstudie bestätigt werden. Die Veröffentlichung der Ergebnisse der begleitenden Interventionsstudie (vgl. Kapitel 5.7) befindet sich im Review-Prozess.

## 6.2 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt die Arbeit die Konzeption eines Schülerlaborprogramms und eines universitären Seminars für Lehramtsstudierende auf, in dem die Seminarteilnehmer\*innen bereits während ihres Studiums den Einsatz von digitalen Medien in chemischen Experimenten praktisch in einem Schülerlabor trainierten und reflektierten. Das eigens dafür konzipierte Schülerlaborprogramm setzte ein besonderes Augenmerk auf den Einsatz von digitalen Me-

dien. Durch die Fortführung des *LMUchemlabs* an der *Ludwig-Maximilians-Universität München* sowie des Schülerlaborprogramms an der *Eberhard-Karls-Universität Tübingen* sollen auch zukünftig Studierende des Lehramts Chemie diese Erfahrungen bereits im Verlauf ihres Studiums sammeln können. Somit kann festgehalten werden, dass die Ziele dieser Arbeit erreicht werden konnten.

### 6.3 Ausblick

Die vorliegende Arbeit leistet einen Betrag zu zwei großen Aufgabenbereichen der Chemiedidaktik:

- Konzeption von innovativen Experimenten für den Chemieunterricht aus der aktuellen, fachchemischen Forschung und
- Förderung der digitalen Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften.

Mit der Konzeption von innovativen Experimenten für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schülerlaborprogramm zeigt die Arbeit verschiedene Möglichkeiten auf, aktuelle fachchemische Forschung für den Schulunterricht und für außerschulische Lernorte aufzubereiten. Dies ist eine essentielle Aufgabe der chemiedidaktischen Forschung, um den Chemieunterricht weiterzuentwickeln und so aktuelle, fachchemische Forschung didaktisch reduziert Schüler\*innen im Sinne der Wissenschaftskommunikation sowie Wissenschaftspropädeutik zugänglich zu machen. In Fortführung dieser Arbeit entsteht aktuell eine weitere Experimentierstation für das *LMUchemlab* zu umweltfreundlicherer Pyrotechnik. Die Grundlage hierfür liefert abermals die Abteilung für hochenergetische Materialien der LMU München, die umweltfreundliche Rauchsignale, sogenannte farbige *Smokes*, erforscht hat. Diese werden in einer aktuellen Arbeit auf die Anforderungen als Schülerexperiment optimiert und in Bezug zum aktuellen Lehrplan gesetzt.

Eine wichtige und sicherlich auch zukünftig bedeutsame Aufgabe der Chemiedidaktik ist die Förderung der digitalen Kompetenzen von Lehramtsstudierenden sowie der Entwicklung von Unterrichtseinheiten hierfür. Ein Hinweis auf den Stellenwert dieses Themas bildet die Vielzahl an aktuellen Publikationen hierzu. Die Konzeption, Erprobung und Evaluation des universitären Seminars, das vornehmlich durch die Microteachingsituationen sowie der Selbstreflexion geprägt ist, leistet hierzu einen wertvollen Beitrag.

## 7 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b>	Medien als Mittler zwischen Lernenden, Lehrenden und dem zu vermittelnden Stoff nach HÄRTIG ET AL. [15] (eigene Darstellung, verändert).....	9
<b>Abb. 2:</b>	Kategorisierung digitaler Medien nach ihrer didaktischen Funktion nach HUWER ET AL. [16] (eigene Darstellung).....	9
<b>Abb. 3:</b>	Graphische Darstellung des DPACK-Modells nach HUWER ET AL. [28] (aus [29]).....	12
<b>Abb. 4:</b>	Graphische Darstellung des Orientierungsrahmens DiKoLAN nach BECKER ET AL. [32] (eigene Darstellung).....	15
<b>Abb. 5:</b>	Das Logo des LMUchemlab (Quelle: LMU).....	22
<b>Abb. 6:</b>	Forschungszyklus nach WILDT [53] (eigene Darstellung, verändert).....	27
<b>Abb. 7:</b>	Blick durch das Tablet mit der AR-App Zappar auf eine Spritzflasche. Als Overlay wird hier eine Animation der Autoprotolyse von Wasser gezeigt (eigene Aufnahme).....	29
<b>Abb. 8:</b>	Ein mit der CAD-Software tinkercad selbst erstelltes Methanmolekülmodell (eigene Aufnahme).....	30
<b>Abb. 9:</b>	Erhitzen der drei Druckfilamente PVA, PLA und ABS (v. l. n. r., eigene Aufnahme).....	31
<b>Abb. 10:</b>	Nach Zugabe eines Impfkristalls erstarrt die unterkühlte Schmelze unter Wärmeentwicklung (eigene Aufnahme).....	33
<b>Abb. 11:</b>	Simulation einer idealen Wunderkerze (links) sowie einer zu reaktiven Wunderkerze aufgrund eines zu hohen Aluminiumanteils (rechts, eigene Aufnahmen).....	35
<b>Abb. 12:</b>	Programm zur Animation des Lichtzeigerprinzips eines Rasterkraftmikroskops [70] (eigene Aufnahme).....	36
<b>Abb. 13:</b>	Schematische Darstellung des Seminarverlaufs (eigene Darstellung).....	45

## 8 Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b>	Ablauf eines Schülerlabortages.....	24
<b>Tab. 2:</b>	Übersicht der Experimentierstationen im <i>LMUchemlab</i> .....	26
<b>Tab. 3:</b>	Übersicht der Experimentierstationen und die dabei geförderten digitalen Kompetenzen nach DiKoLAN.....	47

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Schulz, B. (2013). Digitale Erleuchtung. Fotos von der Papstwahl. <https://www.spiegel.de/panorama/papst-momente-bilder-zeigen-vergleich-zwischen-2005-und-2013-a-889031.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [2] Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2017). Bildung in der digitalen Welt. Strategie der Kultusministerkonferenz. [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie\\_2017\\_mit\\_Weiterbildung.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/PresseUndAktuelles/2018/Digitalstrategie_2017_mit_Weiterbildung.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [3] Ständige Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (2021). Lehren und Lernen in der digitalen Welt. Die ergänzende Empfehlung zur Strategie "Bildung in der digitalen Welt". [https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2021/2021\\_12\\_09-Lehren-und-Lernen-Digi.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2021/2021_12_09-Lehren-und-Lernen-Digi.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [4] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021). Die Finanzen im DigitalPakt Schule. <https://www.digitalpaktschule.de/de/die-finanzen-im-digitalpakt-schule-1763.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [5] Hubig, S., Berg, A. (2020). Schüler-Studie zur Digitalisierung der Bildung. [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-03/prasentation-bitkom-pk-schulerstudie-26-03-2020\\_final\\_0.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-03/prasentation-bitkom-pk-schulerstudie-26-03-2020_final_0.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [6] Wilmers, A., Anda, C., Keller, C., Kerres, M., Getto, B. (2020). Reviews zur Bildung im digitalen Wandel: Eine Einführung in Kontext und Methodik. In: Bildung im digitalen Wandel. Die Bedeutung für das pädagogische Personal und für die Aus- und Fortbildung. Wilmers, A., Anda, C., Keller, C., Rittberger, M. (Hrsg.). Waxmann, Münster, New York, 7–30.
- [7] Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021). Qualitätsoffensive Lehrerbildung. [www.qualitaetsoffensive-lehrerbildung.de](http://www.qualitaetsoffensive-lehrerbildung.de) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [8] Wirtz, B., Dietz, U., Beckmann, U. (2015). Digitale Schule - vernetztes Lernen. <https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/BITKOM-Studie-Digitale-Schule-2015.pdf> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [9] Bertelsmann Stiftung, CHE Centrum für Hochschulentwicklung GmbH, Deutsche Telekom Stiftung, Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft (2018). Lehramtsstudium in der digitalen Welt - Professionelle Vorbereitung auf den Unterricht mit digitalen Medien?!

- Eine Sonderpublikation aus dem Projekt »Monitor Lehrerbildung«. [https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Monitor\\_Lehrerbildung\\_Broschuere\\_Lehramtsstudium\\_in\\_der\\_digitalen\\_Welt.pdf](https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSt/Publikationen/GrauePublikationen/Monitor_Lehrerbildung_Broschuere_Lehramtsstudium_in_der_digitalen_Welt.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [10] Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht, RiSU, 14.6.2019. [https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen\\_beschluesse/1994/1994\\_09\\_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [11] Knüsel Schäfer, D. (2020). Überzeugungen von Lehrpersonen zu digitalen Medien. Eine qualitative Untersuchung zu Entstehung, Bedingungsfaktoren und typenspezifischen Entwicklungsverläufen. Julius Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- [12] Glöckel, H. (2003). Vom Unterricht. Lehrbuch der allgemeinen Didaktik, 4. Aufl. Klinkhardt, Bad Heilbrunn/Obb.
- [13] Petko, D. (2014). Einführung in die Mediendidaktik. Lehren und Lernen mit digitalen Medien. Beltz, Weinheim, Basel.
- [14] Pietzner, V. (2014). Computer-based learning in chemistry classes. *Eurasia Journal of mathematics, science and technology education* **10/4**, 297–311.
- [15] Härtig, H., Ropohl, M. (2018). Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. München.
- [16] Huwer, J., Banerji, A., Thyssen, C. (2020). Digitalisierung. Perspektiven für den Chemieunterricht. *Nachrichten aus der Chemie* **68/10**, 10–16.
- [17] Meßinger-Koppelt, J., Maxton-Küchenmeister, J. (Hrsg.) (2014). Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Joachim Herz Stiftung Verlag, Hamburg.
- [18] Wilhelm, T. (2014). Externe Sensoren bei Smartphones und Tablets. In: Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Meßinger-Koppelt, J., Maxton-Küchenmeister, J. (Hrsg.). Joachim Herz Stiftung Verlag, Hamburg, 156–161.
- [19] Kuhn, J., Vogt, P. (2014). Mobile Endgeräte als Experimentiermittel im naturwissenschaftlichen Unterricht. In: Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Meßinger-Koppelt, J., Maxton-Küchenmeister, J. (Hrsg.). Joachim Herz Stiftung Verlag, Hamburg, 46–63.

- [20]Tschiersch, A., Krug, M., Huwer, J., Banerji, A. (2021). ARbeiten mit erweiterter Realität im Chemieunterricht – ein Überblick über Augmented Reality in naturwissenschaftlichen Lehr-Lernszenarien. CHEMKON **28/6**, 241–244.
- [21]Lindlahr, W. (2014). Virtual-Reality-Experimente für interaktive Tafeln und Tablets. In: Digitale Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht. Meßinger-Koppelt, J., Maxton-Küchenmeister, J. (Hrsg.). Joachim Herz Stiftung Verlag, Hamburg, 90–100.
- [22]Pietzner, V., Wagner, W. (2018). Klassische und digitale Medien im Chemieunterricht. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 557–600.
- [23]Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (o. J.). LehrplanPLUS: Schulart- und fächerübergreifende Bildungs- und Erziehungsziele sowie Alltagskompetenz und Lebensökonomie. <https://www.lehrplanplus.bayern.de/uebergreifende-ziele/gymnasium> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [24]Blossfeld, H.-P., Bos, W., Daniel, H.-D., Hannover, B., Köller, O., Lenzen, D., McElvany, N., Roßbach, H.-G., Seidel, T., Tippelt, R., Wößmann, L. (Hrsg.) (2018). Digitale Souveränität und Bildung. Gutachten. Waxmann, Münster.
- [25]Mishra, P., Koehler, M. J. (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A Framework for Teacher Knowledge. Teachers College Record **108**, 1017–1054.
- [26]Shulman, L. S. (1986). Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching. Educational Researcher **15/2**, 4–14.
- [27]Koehler, M. J., Rosenberg, J. (o. J.). The TPACK Framework. [www.tpack.org](http://www.tpack.org) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [28]Huwer, J., Irion, T., Kuntze, S., Schaal, S., Thyssen, C. (2019). Von TPaCK zu DPaCK – Digitalisierung im Unterricht erfordert mehr als technisches Wissen. Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht **72/5**, 358–364.
- [29]Martens, M. A., Schwarzer, S. (2022). Digitale Medien im Chemieunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen von Lehramtsstudierenden im Kontext eines Schülerlabors. CHEMKON (online first).
- [30]Forschungsgruppe Lehrerbildung Digitaler Campus Bayern (2017). Kernkompetenzen von Lehrkräften für das Unterrichten in einer digitalisierten Welt. Merz Medien + Erziehung: Zeitschrift für Medienpädagogik **2017/4**, 65–74.

- [31]Bader, H.-J., Lühken, A. (2018). Legitimation des Experiments für den Chemieunterricht. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 461–462.
- [32]Becker, S., Bruckermann, T., Finger, A., Huwer, J., Kremser, E., Meier, M., Thoms, L.-J., Thyssen, C., Kotzebue, L. v. (2020). Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften - DiKoLAN. In: Digitale Basiskompetenzen - Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften. Becker, S., Meßinger-Koppelt, J., Thyssen, C. (Hrsg.). Joachim-Herz-Stiftung, Hamburg, 14–43.
- [33]LPO I. § 32 Erziehungswissenschaften, 2008. [https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayLPO\\_I-32](https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayLPO_I-32) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [34]Rosenberg, D., Rautenstrauch, H. (2021). Professionalisierung zur Einbindung digitaler Medien im Chemieunterricht. In: Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik online Jahrestagung 2020. Habig, S. (Hrsg.). Duisburg-Essen, 386–389.
- [35]PH Ludwigsburg. University of Education (o. J.). Erweiterungsstudium Medienpädagogik. <https://web-archiv.ph-ludwigsburg.de/1357> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [36]Fakultät für Humanwissenschaften, Universität Regensburg (o. J.). Erweiterungsstudiengang Medienpädagogik. <https://www.uni-regensburg.de/humanwissenschaften/erziehungswissenschaft-medien/erweiterungsstudiengang-medienpaedagogik/index.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [37]Fakultät für Psychologie und Pädagogik, Ludwig-Maximilians-Universität München (o. J.). Erweiterung Medienpädagogik. <https://www.psy.lmu.de/ffp/lehre/medienpaed/index.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [38]Philosophische Fakultät und Fachbereich Theologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (o. J.). Erweiterungsstudiengang Medienpädagogik. <https://www.medpaed.phil.fau.de/studium/erweiterungsstudiengang-medienpaedagogik/> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [39]Fakultät für Chemie und Pharmazie. Ludwig-Maximilians-Universität München (o. J.). Lehramtsstudium bzw. Erweiterungsfach Chemie an Realschulen. <https://www.cup.uni->

- muenchen.de/de/studiengaenge/lehramtstudium-chemie/studienplaene/realschule-neu/ (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [40] Fakultät für Chemie und Pharmazie. Ludwig-Maximilians-Universität München (o. J.). Lehramtsstudium bzw. Erweiterungsfach Chemie an Gymnasien. <https://www.cup.uni-muenchen.de/de/studiengaenge/lehramtstudium-chemie/studienplaene/gymnasium-neu/> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [41] Europa-Universität Flensburg (2020). Modulkatalog. M.ED. Lehramt an Gemeinschaftsschulen (PStO 2020). Teilstudiengang Chemie (FSA CHE-GE). <https://www.uni-flensburg.de/fileadmin/content/portal/die-universitaet/dokumente/po-studiengaenge/master-of-education/gemeinschaftsschulen/2020/modulkataloge-hese-2021-22/mk-mage-psto2020-che.pdf> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [42] Europa-Universität Flensburg (2020). Modulkatalog. B.A. Bildungswissenschaften (PStO 2020). Teilstudiengang Chemie (FSA CHE-BA). <https://www.uni-flensburg.de/fileadmin/content/portal/die-universitaet/dokumente/po-studiengaenge/bachelor-of-arts/bildungswissenschaften/2020/modulkataloge-hese-2021-22/mk-babw-psto2020-che.pdf> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [43] Mathematisch naturwissenschaftliche Fakultät, Eberhard Karls Universität Tübingen (2020). Modulhandbuch Bachelor of Education Lehramt Gymnasium Hauptfach Chemie. [http://www.echem.uni-tuebingen.de/index.html/Lehramt/BachelorOfEducation/MHB\\_BEd\\_Chemie\\_Lesefassung.pdf](http://www.echem.uni-tuebingen.de/index.html/Lehramt/BachelorOfEducation/MHB_BEd_Chemie_Lesefassung.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [44] Mathematisch naturwissenschaftliche Fakultät, Eberhard Karls Universität Tübingen (2020). Modulhandbuch Master of Education Lehramt Gymnasium Hauptfach Chemie. [http://www.echem.uni-tuebingen.de/index.html/Lehramt/MasterOfEducation/MHB\\_MEd\\_Chemie\\_Lesefassung.pdf](http://www.echem.uni-tuebingen.de/index.html/Lehramt/MasterOfEducation/MHB_MEd_Chemie_Lesefassung.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [45] LernortLabor - Bundesverband der Schülerlabore e.V. (2021). Schülerlabor-Atlas. <https://www.schuelerlabor-atlas.de/> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [46] Haupt, O. J., Domjahn, J., Martin, U., Skiebe-Corrette, P., Vorst, S., Zehren, W., Hempelmann, R. (2013). Schülerlabor - Begriffsschärfung und Kategorisierung. *Mathematischer und Naturwissenschaftlicher Unterricht* **66/6**, 324–330.
- [47] Dänhardt, D., Sommer, K., Euler, M. (2007). Lust auf Naturwissenschaft und Technik. *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie* **18/3**, 4–10.

- [48]LernortLabor - Bundesverband der Schülerlabore e.V. (o. J.). Schülerlabor - Kategorisierung. <https://www.lernortlabor.de/ueber-schuelerlabore/kategorien> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [49]Stamer, I. (2019). Authentische Vermittlung von Naturwissenschaften im Schülerlabor. Förderung der authentischen Wahrnehmung von Naturwissenschaften durch Einblicke in die Forschung des Sonderforschungsbereichs (SFB) 677 mittels Videos. Dissertation. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel.
- [50]Schwarzer, S., Parchmann, I. (2018). Schülerlabore und Schülerforschungszentren. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 666–678.
- [51]Reimann, M., Herzog, S., Parchmann, I., Schwarzer, S. (2020). Nanotechnologie in Schülerlabor und Schule – Experimenteller Zugang zu alltagsnahen nanotechnologischen Facetten. CHEMKON **27/5**, 215–223.
- [52]Schwarzer, S., Rudnik, J., Parchmann, I. (2013). Chemische Schalter als potenzielle Lernschalter - Fachdidaktische Begleitung eines Sonderforschungsbereichs. CHEMKON **20/4**, 175–181.
- [53]Wildt, J. (2009). Forschendes Lernen: Lernen im "Format" der Forschung. Journal Hochschuldidaktik **20/2**, 4–7.
- [54]Sommer, K. (2018). Unterrichtskonzeptionen und Unterrichtsverfahren. In: Konkrete Fachdidaktik Chemie. Grundlagen für das Lernen und Lehren im Chemieunterricht. Sommer, K., Wambach-Laicher, J., Pfeifer, P. (Hrsg.). Aulis, Seelze, 262–301.
- [55]Weisermann, M., Kampschulte, L., Schwarzer, S. (2018). Silber einmal anders. Leidenfrost-Synthese und Risikobewertung von Silber-Nanopartikeln. Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie **29/164**, 27–31.
- [56]Schwarzer, S., Elbahri, M., Abdelaziz, R., Wilke, T. (2016). Wenn ein Wassertropfen zum Nanolabor wird - Gold-Nanopartikel und Gold aus dem Tropfenreaktor. CHEMKON **23/4**, 188–190.
- [57]Huwer, J., Brünken, R. (2018). Naturwissenschaften auf neuen Wegen - Individualisierung mit Tablets im Chemie-Unterricht. Computer + Unterricht **2018/110**, 7–10.

- [58]Scheid, M., Hock, K., Schwarzer, S. (2018). Kunststoffe und 3D-Druck. Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion am Beispiel der Erstellung eines Molekülbaustens. *Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie* **29**/164, 20–26.
- [59]Scheid, M., Hock, K., Schwarzer, S. (2019). 3D Printing in Chemistry Teaching: From a Submicroscopic Molecule to Macroscopic Functions - Development of a Molecular Model Set and Experimental Analysis of the Filaments. *WJCE* **7**/2, 72–83.
- [60]Dilling, F. (2019). *Der Einsatz der 3D-Druck-Technologie im Mathematikunterricht. Theoretische Grundlagen und exemplarische Anwendungen für die Analysis*. Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Spektrum, Wiesbaden.
- [61]Landesinstitut für Schule und Medien Berlin-Brandenburg (o. J.). Teil C. Chemie. Jahrgangsstufe 7-10. [https://bildungserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche\\_Fassung/Teil\\_C\\_Chemie\\_2015\\_11\\_10\\_WEB.pdf](https://bildungserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/Rahmenlehrplanprojekt/amtliche_Fassung/Teil_C_Chemie_2015_11_10_WEB.pdf) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [62]Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (2004). Lehrplan des achtjährigen Gymnasiums. [http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserver/3.1.neu/g8.de/id\\_1.html](http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserver/3.1.neu/g8.de/id_1.html) (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [63]Wagner, T., Flint, A. (2018). Energie für Chemie oder Chemie für Energie? *CHEMKON* **25**/3, 98–103.
- [64]Barke, H.-D. (2006). *Chemiedidaktik. Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [65]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* **3**/3, 285-294.
- [66]Scheid, M., Pohl, L., Rusan, M., Klapötke, T. M., Schwarzer, S. (2020). Ökologisch und toxikologisch unbedenklichere Wunderkerzen: ein bewährter Schulversuch im neuen Licht. *CHEMKON* (online first).
- [67]Scheid, M., Rusan, M., Klapötke, T. M., Schwarzer, S. (2021). Chemiedidaktik: Funken selbstgemacht. *Nachrichten aus der Chemie* **69**/9, 27–30.
- [68]Scheid, M. (2020). Videotutorial: Herstellung von Wunderkerzen. <https://player.vimeo.com/video/464925052> (letzter Zugriff am 31.3.2022).

- [69]Schwarzer, S., Akaygun S., Sagun-Gokoz, B., Anderson, S., Blonder, R. (2015). Using Atomic Force Microscopy in Out-of-School Settings—Two Case Studies Investigating the Knowledge and Understanding of High School Students. *Journal of Nano Education* **7/1**, 10–27.
- [70]Griffith, J. (2003). Atomic Force Microscopy Lehigh Microscopy School. NC State University.
- [71]Roth, J., Priemer, B. (2020). Das Lehr-Lern-Labor als Ort der Lehrpersonenbildung - Ergebnisse der Arbeit eines Forschungs- und Entwicklungsverbunds. In: Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 1–10.
- [72]Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.) (2020). Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [73]Priemer, B. (2020). Ein kurzer Überblick über den Stand der fachdidaktischen Forschung der MINT-Fächer an Lehr-Lern-Laboren. In: Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 159–171.
- [74]Dohrmann, R., Nordmeier, V. (2020). Die Verknüpfung von Theorie und Praxis im Lehr-Lern-Labor-Blockseminar als Unterstützung der Professionalisierung angehender Lehrpersonen. In: Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 191–207.
- [75]Ernst, G., Priemer, B., Schulz, J. (2020). Frühe Praxiserfahrungen in einem Lehr-Lern-Labor. In: Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 113–122.
- [76]Neumann, I., Sorge, S., Neumann, K., Parchmann, I., Schwanewedel, J. (2020). Die Kieler Forschungswerkstatt - ein Lehr-Lern-Labor mit Fokus auf aktuelle Forschungsthemen. In: Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 85–97.
- [77]Hoppe-Graff, S., Schroeter, R., Flaggmeyer, D. (2008). Universitäre Lehrerausbildung auf dem Prüfstand. Wie beurteilen Referendare das Theorie-Praxis-Problem? *Empirische Pädagogik* **22/3**, 353–381.

- [78] Simon, M., Woest, V. (2020). Die Ausbildung professioneller Handlungskompetenzen von Chemielehramtsstudierenden im Lehr-Lern-Labor. In: Naturwissenschaftliche Kompetenz in der Gesellschaft von morgen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik Jahrestagung in Wien 2019. Habig, S. (Hrsg.). Duisburg-Essen, 170–173.
- [79] Simon, M., Woest, V. (2021). Lehr-Lern-Labore als Orte der Professionalisierung in der Ausbildung von Chemielehrkräften. In: Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik online Jahrestagung 2020. Habig, S. (Hrsg.). Duisburg-Essen, 318–321.
- [80] Sorge, S., Neumann, I., Neumann, K., Parchmann, I., Schwanewedel, J. (2020). Lehr-Lern-Labore als Vorbereitung auf den Lehrberuf - die Perspektive der Studierenden. In: Lehr-Lern-Labore. Konzepte und deren Wirksamkeit in der MINT-Lehrpersonenbildung. Priemer, B., Roth, J. (Hrsg.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 285–297.
- [81] Stender, A. (2021). Lehr-Lern-Labor BinEx: Konzeption und Evaluation eines Lehr-Lern-Labor-Seminars zum binnendifferenzierenden Experimentieren. In: Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch? Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik online Jahrestagung 2020. Habig, S. (Hrsg.). Duisburg-Essen, 434–437.
- [82] Klinzing, H. G. (2002). Wie effektiv ist Microteaching? Ein Überblick über fünfunddreißig Jahre Forschung. Zeitschrift für Pädagogik **48/2**, 194–214.
- [83] Fernández, M. L. (2005). Learning through Microteaching Lesson Study in Teacher Preparation. *Action in Teacher Education* **26/4**, 37–47.
- [84] Aarsal, Z. (2014). Microteaching and pre-service teachers' sense of self-efficacy in teaching. *European Journal of Teacher Education* **37/4**, 453–464.
- [85] Lehrstuhl für Grundschulpädagogik und -didaktik, Fakultät für Psychologie und Pädagogik, Ludwig-Maximilians-Universität Chemie (o. J.). Unterricht e<sup>3</sup>.  
<https://www.edu.lmu.de/uni-klassen/unterricht/index.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [86] Lehrstuhl für Grundschulpädagogik und -didaktik, Fakultät für Psychologie und Pädagogik, Ludwig-Maximilians-Universität Chemie (o. J.). Projekte.  
<https://www.edu.lmu.de/uni-klassen/projekte/index.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).
- [87] Lehrstuhl für Grundschulpädagogik und -didaktik, Fakultät für Psychologie und Pädagogik, Ludwig-Maximilians-Universität Chemie (o. J.). Beobachtung.

---

<https://www.edu.lmu.de/uni-klassen/beobachtung/index.html> (letzter Zugriff am 31.3.2022).

[88] Kahlert, J., Kirch, M., Nitsche, K. (o. J.). UNI-Klassen. <https://www.edu.lmu.de/uni-klassen/downloaddocs/plakat-uni-klasse-final.pdf> (letzter Zugriff am 31.3.2022).

## 10 Anhang

Anhang 1: Arbeitsblätter der Schülerlaborstationen

## Station 1

Silber übt seit jeher aufgrund seines Aussehens eine große Faszination auf den Menschen aus. Typische Eigenschaften, die wir mit diesem Edelmetall verbinden, sind seine Beständigkeit und seine silberne Farbe mit seinem typisch metallischen Glanz. Dass nanodimensioniertes Silber diese bekannten Eigenschaften nicht mehr aufweist, soll im folgenden Versuch gezeigt werden.

### Materialien:

- Magnetrührer mit Aluminiumscheibe und Aluminiumring
- Zwei Bechergläser 50-100 mL
- Zwei Spritzen 2 mL
- iPad mit der App „Zappar“

### Chemikalien:

- Silbernitrat-Lösung (0,001 Mol/L)
- 4 %-ige Trinatriumcitrat-Dihydrat-Lösung
- Demineralisiertes Wasser



### Schutz- ausrüstung:



## Versuchsdurchführung

1. Schalte die Heizplatte an und stelle eine Temperatur von 300 °C ein.
2. Überprüfe die Temperatur der Aluminiumscheibe, indem du ein paar Tropfen demineralisiertes Wasser darauf gibst. Beginne mit dem Experiment erst, wenn die Wassertropfen über die Oberfläche gleiten.
3. Gib nun nacheinander 2 mL Citrat-Lösung und 2 mL Silbernitrat-Lösung mit Hilfe der Spritze tropfenweise auf die Aluminiumscheibe.



Achte darauf, Verunreinigungen der Lösungen zu vermeiden, damit der Versuch gut funktioniert!

4. Zum Schluss wird der Tropfen, bevor er vollständig verdampfen kann, mit einem Tuch aufgenommen.



Abb. 1: Leidenfrosttropfen auf dem Leidenfrostreaktor

## Beobachtung

Notiere deine Beobachtungen:

---



---



---



## Station 2

1964 beschrieb der britische Physiker und Science-Fiction-Autor Arthur C. Clarke erstmals seine Vision vom 3D-Druck. Heute, über 50 Jahre später, ist seine Vision zur Realität geworden. 3D-Modelle werden am Computer mit 3D-Zeichenprogrammen erstellt und mit 3D-Druckern gedruckt. Als Druckmaterial kommen verschiedene Stoffe zum Einsatz. Am häufigsten werden dabei Kunststofffilamente eingesetzt, die an dieser Station näher betrachtet werden sollen.

### Materialien:

- Laptop mit Internetzugang zum Öffnen des CAD-Programms
- 3D-Drucker
- Stativ
- Klemmvorrichtung für die Kunststofffilamente
- Heißluftföhn mit Haltevorrichtung und Breitstrahldüse 75 mm
- Drei 20 g Gewichte mit Draht
- Tesafilm
- Seitenschneider und Lineal zum Ablängen der Filamente



### Chemikalien:

### Schutz-

### ausrüstung:



## Versuchsdurchführung

Vorversuch: Entwerft jeweils zu zweit mit Hilfe des Programms „Tinkercad“ ein Modell des Wassermoleküls. Hierfür habt ihr 20 Minuten Zeit. Solltet ihr noch Zeit haben, designed auf das Sauerstoffatommodell einen Smiley. 😊

1. Schneide von den drei Kunststofffilamenten je 20 cm ab. Diese werden oben mit Hilfe der Klemmvorrichtung fixiert, unten werden mit einem Stück Tesafilm die Gewichte mit einem Haken im Draht daran befestigt.
2. Spanne den Heißluftföhn in die Haltevorrichtung ein und richte ihn mittig auf die drei Filamente aus. Seine Düse sollte einen Abstand von etwa 5 cm zu den Filamenten haben. Schalte den Heißluftföhn an.

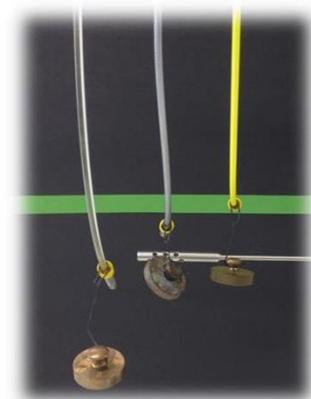


Abb. 1: PVA, PLA und ABS eingespannt in der Haltevorrichtung

## Beobachtung

Notiere deine Beobachtungen:

---



---



---

## Auswertung und Aufgaben

1. Notiere, welches Filament als erstes nachgegeben hat und welches Filament am längsten seine Form behielt.

Als erstes nachgegeben hat: \_\_\_\_\_

Am längsten seine Form behalten hat: \_\_\_\_\_

2. Erläutere, welche Schlussfolgerung man aus dieser Beobachtung ziehen kann.

---



---



---

3. Beschreibe, wie die in diesem Versuch gewonnenen Erkenntnisse dir für den 3D-Druck helfen können.

---



---



---

4. PLA ist ein sogenannter Biokunststoff. Er ist ein Polymer der Milchsäure, die durch die Fermentation von Zucker und Stärke durch Milchsäurebakterien entsteht. Erkläre den Vorteil eines Kunststoffes, der so gewonnen werden kann. Kannst du dir auch Nachteile durch die Nutzung dieses Kunststoffes vorstellen?

Vorteile: \_\_\_\_\_

---



---

Nachteile: \_\_\_\_\_

---



---



---



Abb. 2: 3D-Drucker

## Station 3

Aggregatzustandsänderungen sowie chemische Reaktionen gehen mit Energieumsätzen einher. Dafür wird die Wärme bei Versuchen zur Wirkungsweise von Taschenwärmer und Brausepulver mit Hilfe einer Wärmebildkamera sichtbar gemacht.

### Materialien:

- iPad mit der Wärmebildkamera „FLIR One Pro“
- Bunsenbrenner und Feuerzeug
- Reagenzglas und Reagenzglasständer
- Reagenzglasklammer
- Feststofftrichter
- Zwei Petrischalen aus Glas Ø mind. 5 cm
- Spatel
- Schwarzer Untergrund
- Spritzflasche

### Chemikalien:

- Natriumthiosulfat Pentahydrat
- Natriumhydrogencarbonat
- Zitronensäure
- Ethanol



### Schutz- ausrüstung:



## Versuchsdurchführung „Taschenwärmer“

1. Gib mit Hilfe des Feststofftrichters drei Spatel Natriumthiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) in ein Reagenzglas. Halte das Reagenzglas in die Flamme des Bunsenbrenners, bis das Natriumthiosulfat vollständig geschmolzen ist und einmal kurz aufkocht. Schütte dann das flüssige Natriumthiosulfat in einem Schwung in eine Petrischale und stelle diese auf den schwarzen Untergrund.
2. Mach dich mit der Funktion der Wärmebildkamera vertraut. Lies dazu die Anleitung (Extra-Blatt) der „FLIR ONE Pro“ durch und führe den darauf beschriebenen Vorversuch zur Temperaturmessung durch.
3. Miss die Temperatur des geschmolzenen Natriumthiosulfats in der Petrischale. Wenn diese bei etwa  $25\text{ }^\circ\text{C}$  liegt, kannst du mit dem Versuch fortfahren.
4. Gib einen einzigen Kristall festes Natriumthiosulfat in die Petrischale. Miss dabei die Temperatur und beobachte die Veränderung.



Durch leichtes Schütteln des Reagenzglases vermeidest du den sogenannten „Siedeverzug“.



Abb. 1: „FLIR“-Wärmebildkamera auf iPad

## Beobachtung

Notiere deine Beobachtungen:

---



---



---

## Auswertung und Aufgaben

1. Erläutere stichpunktartig, warum sich die Flüssigkeit nach Zugabe des Impfkristalls erhitzt.  
Nenne das Prinzip, das sich dahinter verbirgt.

---



---



---



---

2. Auf der Verpackung eines Taschenwärmers steht: „Keine Batterien erforderlich! Die Wärmeerzeugung erfolgt durch eine chemische Reaktion“. Stimmt du diesem Satz zu? Begründe deine Antwort!

---



---



Abb. 2: Taschenwärmer, links ist der Inhalt in fester Form, rechts in flüssiger Form

3. Erläutere den Grund, warum man einen Handwärmer im Winter in der Tasche tragen kann, ohne dass dieser erstarzt.

---



---

## Versuchsdurchführung „Brausepulver“

1. Gib zwei Spatelspitzen Natriumhydrogencarbonat ( $\text{NaHCO}_3$ ) in eine Petrischale. Gib danach zwei Spatelspitzen Zitronensäure ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ , kurz  $\text{H}_3\text{Cit}$ ) hinzu.
2. Miss mit der Wärmebildkamera die Temperatur der Mischung und notiere den gemessenen Wert.
3. Mische die beiden Chemikalien mit dem Spatel und miss danach mit der Wärmebildkamera die Temperatur der Mischung.
4. Gib ein paar Tropfen destilliertes Wasser hinzu und miss erneut die Temperatur der Mischung.



Abb. 2: Wasser wird zu der Mischung aus Natriumhydrogencarbonat und Zitronensäure gegeben

## Beobachtung

Notiere deine gemessenen Temperaturen:

\_\_\_\_ °C vor Versuchsbeginn

\_\_\_\_ °C nach Wasserzugabe

Notiere deine Beobachtungen:

---



---

## Auswertung und Aufgaben

1. Stelle eine Vermutung auf, um welches Gas es sich handeln könnte.

---



---

2. Formuliere die Reaktionsgleichung der Reaktion.



3. Erkläre, weshalb die Gasentwicklung erst nach Wasserzugabe beobachtet werden kann.

---



---

## Station 4

Wunderkerzen werden ganzjährig zu festlichen Anlässen verwendet, wobei auf Verpackungen stets folgender Hinweis zu finden ist: „Enthält Bariumnitrat, beim Einatmen vom Rauch und beim Verschlucken gesundheitsschädlich“. An der Fakultät für Chemie und Pharmazie der LMU München wurde nun erstmals eine bariumnitratfreie Wunderkerze entwickelt, welche du an dieser Station selbst herstellen wirst.

### Materialien:

- Spatel
- Feinwaage mit Wägeschiffchen
- Zwei Bechergläser 100 mL
- Spritze 1 mL
- Stahldraht 0,8 mm
- Einmalhandschuhe
- Trockenschrank
- iPad oder Multi-Touch-Tisch für die Wunderkerzensimulation

### Chemikalien:

- Strontiumnitrat
- Eisenpulver
- Aluminiumpulver
- Kaltlösliche Stärke
- Demineralisiertes Wasser



### Schutz- ausrüstung:



## Versuchsdurchführung

1. Bestimme mit Hilfe der Wunderkerzensimulation auf dem iPad, welches Mischungsverhältnis der Chemikalien für deine Wunderkerze verwendet werden soll. Insgesamt soll das Gewicht der Wunderkerzenmischung zwischen 1,5 g und 2 g betragen. Mischungsverhältnis:

Strontiumnitrat: \_\_\_\_\_ g  
 Eisenpulver: \_\_\_\_\_ g  
 Aluminiumpulver: \_\_\_\_\_ g  
 Kaltlösliche Stärke: \_\_\_\_\_ g

2. Wiege die trockenen Chemikalien ab und gib diese in ein Becherglas.



Nach jedem Einwiegen einer Chemikalie muss der Spatel zuerst mit einem feuchten und dann mit einem trockenen Tuch gereinigt werden, um eine Verunreinigung der anderen Chemikalien zu vermeiden.

3. Vermenge die Chemikalien mittels Schwenkbewegungen, bis augenscheinlich eine nahezu homogene Mischung entstanden ist.



Bevor du mit dem nächsten Schritt fortfährst: Wenn du das Wasser zugegeben hast, musst du schnell arbeiten, damit die Wunderkerze nicht austrocknet bevor du sie fertig geformt hast.

4. Gib 0,3 mL demin. Wasser hinzu und verknete die Mischung mit Hilfe des Spatels im Becherglas zu einem Klumpen, bis dieser am Spatel „kleben bleibt“. Drücke beim Vermische die Masse mit dem Spatel immer wieder mit etwas Druck gegen die Wand des Becherglases.
5. Zieh einen Einmalhandschuh an und knete den Klumpen mit der Hand.
6. Rolle die Masse zu einem kurzen Zylinder aus und drücke den Stahldraht in die Mitte der Masse. Rolle die Wunderkerze danach weiter, bis sie die gewünschte Form hat.



Rolle die Masse so dünn und so gleichmäßig wie möglich aus, um das bestmögliche Ergebnis zu erzielen.

7. Stecke die fertige Wunderkerze in den dafür vorbereiteten Sandbehälter (Gruppennummer beachten!).
8. Anschließend kommt die Wunderkerze für zwei Stunden bei 70 °C in den Trockenschrank
9. Entzünde die getrocknete Wunderkerze im Abzug. Beobachte die Wunderkerze beim Abbrennen genau!



Abb. 1: Abwiegen von Eisenpulver in einem Wägeschiffchen



Abb. 2: Vermischen der Chemikalien



Abb. 3: Fester Klumpen

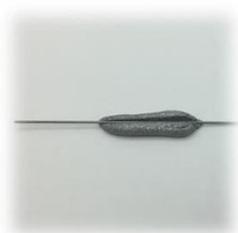


Abb. 4: Eindrücken des Stahldrahtes in die Wunderkerze



Abb. 5: Ausrollen der Wunderkerze



Abb. 6: Fertige Wunderkerze

## Beobachtung

Notiere deine Beobachtungen der brennenden Wunderkerzen:

---



---



---

## Auswertung und Aufgaben

1. Nenne den Namen der unten aufgelisteten Stoffe und erkläre kurz die Funktionen der einzelnen Komponenten in der Wunderkerze.

$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ : \_\_\_\_\_, Funktion: \_\_\_\_\_

Fe: \_\_\_\_\_, Funktion: \_\_\_\_\_

Al: \_\_\_\_\_, Funktion: \_\_\_\_\_

$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ : \_\_\_\_\_, Funktion: \_\_\_\_\_

2. Fülle den Lückentext mit folgenden Begriffen aus:

*Metalle, Redoxreaktion, Reduktion, Strontiumnitrat, reduziert, Sauerstoff*

Wenn in der Chemie etwas verbrannt wird, findet eine \_\_\_\_\_ statt.

Für eine Verbrennung braucht man \_\_\_\_\_, welchen man aus der Luft

oder auch aus sogenannten Oxidationsmitteln erhält. Das hier verwendete Oxidati-

onsmittel ist \_\_\_\_\_. Immer wenn eine Oxidation stattfindet, läuft im

Gegenzug auch eine \_\_\_\_\_ ab. Somit werden die \_\_\_\_\_

Aluminium und Eisen oxidiert und das Nitrat-Ion wird \_\_\_\_\_.

3. Chemisch betrachtet laufen in der Wunderkerze mehrere Redoxreaktionen parallel ab. Bringe die unten angegebenen Edukte und Produkte in die richtige Reihenfolge und formuliere dadurch stöchiometrisch korrekte Reaktionsgleichungen.

Edukte und Produkte:  $Sr(NO_3)_2$ ,  $O_2$ ,  $Fe$ ,  $Al$ ,  $O_2$ ,  $Sr(NO_2)_2$ ,  $O_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$

Reaktion 1: \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_

Reaktion 2: \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_

Reaktion 3: \_\_\_\_\_ → \_\_\_\_\_

4. Erläutere kurz deine Beobachtungen beim Verbrennen der Wunderkerze und stelle Vermutungen auf, welche chemischen Produkte nach dem Abbrennen der Wunderkerze entstanden sein könnten.

---



---



---



---



Abb. 7: Fertige, selbst hergestellte Wunderkerze

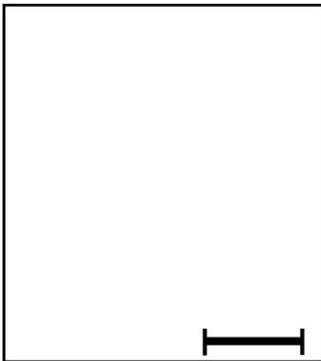
## Station 5

Mit einer Lupe oder einem Mikroskop kann man dem Auge ganz schön auf die Sprünge helfen. Was aber, wenn die Dinge die man betrachten möchte noch viel kleiner sind? Hier hilft das Rasterkraftmikroskop. Es scannt mit einer Abtastspitze und einem Laser die Oberfläche einer Probe ab und misst v. a. die atomaren und molekularen Wechselwirkungen zwischen Oberfläche und Abtastspitze. Aus den gemessenen Daten wird dann ein Bild der Oberfläche erzeugt.

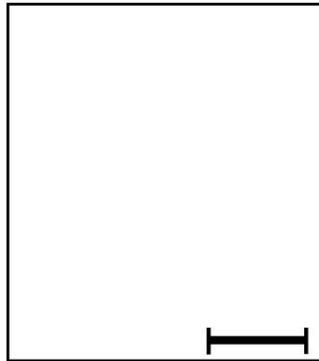
### Aufgaben

1. Zeichne die mit dem Auge, dem Lichtmikroskop und dem Rasterkraftmikroskop (kurz AFM für „Atomic Force Microscope“) erkennbare Oberfläche der Haarprobe.

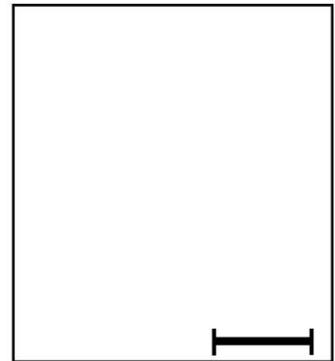
Auge



Lichtmikroskop



AFM



Trag am Maßstab jeweils die Größenordnung ein, die mit der jeweiligen Technik vergrößert und damit sichtbar gemacht werden kann.

2. Erläutere die Funktionsweise eines Rasterkraftmikroskops und fertige dazu eine kleine Skizze an. Worin besteht der elementare Funktionsunterschied zu einem Lichtmikroskop?

---



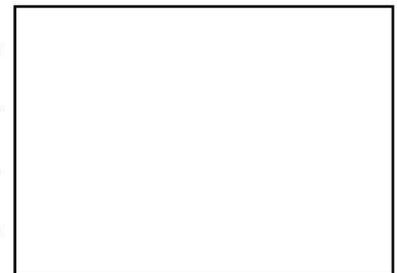
---



---



---



3. Erkläre, wie Schwingungen die Abtastspitze des AFMs beeinflussen und welche Probleme sich dabei ergeben können.

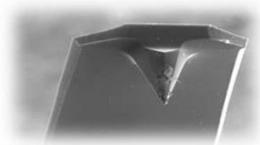


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer AFM-Messspitze  
(Foto: physik.uni-bielefeld.de)

---



---



---

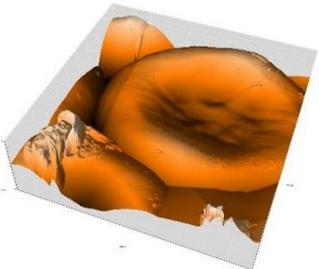
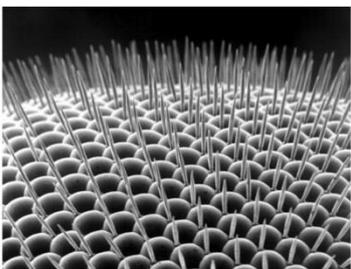


---

4. Nenne Vor- und Nachteile der drei Hilfsmittel zur Vergrößerung aus Aufgabe 1.

Hilfsmittel	Vorteile	Nachteile
Auge		
Lichtmikroskop		
AFM		

5. In der Nanotechnologie wird sehr oft das Rasterelektronenmikroskop (REM) verwendet. Vergleiche die abgebildeten AFM und REM-Aufnahmen eines Facettenaugenausschnittes.

	AFM-Aufnahme	REM-Aufnahme
	 <p>Abb. 2: Facettenauge</p>	 <p>Abb. 3: Facettenauge (Foto: wikipedia.de)</p>
Gemeinsamkeiten		
Spezifisches/ Unterschiede		

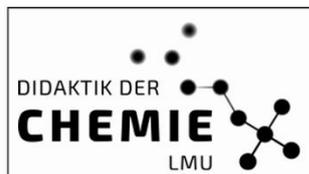
## Anhang 2: Prä-Fragebogen



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

DIDAKTIK DER CHEMIE  
BUTENANDTSTR. 5-13  
81377 MÜNCHEN

PRÄ-FRAGEBOGEN



## Prä-Erhebung

Liebe Studentinnen und Studenten,

herzlich willkommen im Seminar zur „Betreuung von Schülerinnen und Schülern im Schülerlabor unter Einbezug digitaler Medien“. Das Seminar möchte Ihnen als Lehramtsstudierenden die Möglichkeit bieten, den Einsatz von Experimenten unter Einbezug digitaler Medien zu erfahren und dabei die eigenen Unterrichtskompetenzen sowie die Kompetenzen für das Unterrichten mit digitalen Medien zu stärken. Um die Veränderungen Ihrer Kompetenzen im Verlauf dieses Seminars nachzuvollziehen und zukünftig noch besser an die Bedürfnisse von Lehramtsstudierenden anpassen zu können, benötigen wir Ihre Hilfe! Alles was Sie dafür tun müssen, ist den folgenden Fragebogen gewissenhaft auszufüllen!

Der vorliegende Fragebogen dient lediglich der wissenschaftlichen Begleitforschung des Seminars und hat keinerlei weitere Funktion, die in irgendeiner Weise Ihre universitären Noten oder Laufbahn beeinflussen würde.

Die Erhebung ist anonym, wertefrei und freiwillig. Dennoch ist es wichtig, Ihre in zeitlichem Abstand erhobenen Fragebögen einander zuordnen zu können. Damit das möglich ist, bitten wir Sie aus den in der Tabelle erfragten Aspekten ein Kürzel zu bilden. Ein Rückschluss auf Ihre Person ist ausgeschlossen.

<b>Zweiter Buchstabe des Vornamens des Vaters</b>	<b>Dritter Buchstabe des Vornamens der Mutter</b>	<b>Erster Buchstabe des Mädchennamens der Mutter</b>	<b>Dritter Buchstabe des Vornamens der Oma väterlicherseits</b>	<b>Geburtsmonat des Vaters z.B. 03 für März oder 11 für November</b>

**Bitte beantworten Sie die Ihnen vorliegenden Fragen ehrlich und sorgfältig, nur so kann das Seminar vollständig wissenschaftlich evaluiert und weiterentwickelt werden. Bei allen Fragen handelt es sich um Single Choice Fragen. Setzen Sie bitte bei jeder Frage klar ein Kreuz auf die vorgesehenen Kreise, nicht dazwischen!**

Dauer: ca. 10 Minuten

Für Rückfragen zu dieser Untersuchung stehe ich Ihnen gerne unter der aufgeführten E-Mail-Adresse zur Verfügung. Vielen Dank im Voraus für Ihre Mithilfe!

Mit freundlichen Grüßen  
Michael Scheid

Michael Scheid  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Didaktik der Chemie  
Tel: 089/2180-77394  
michael.scheid@cup.uni-muenchen.de  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Butenandtstr. 5-13  
81377 München

## 1. Allgemeine Informationen

Alter: \_\_\_\_ Jahre

Geschlecht:     weiblich             männlich             divers

Studiengang:     Gymnasium             Realschule             Sonstiges: \_\_\_\_\_

Zweifach: \_\_\_\_\_

Anzahl Fachsemester Lehramt Chemie: \_\_\_\_

Note der letzten Klausur einer Chemiedidaktikvorlesung: \_\_\_\_

Note der Klausur zur Vorlesung „Anorganische Chemie 1“: \_\_\_\_

Folgende Stationen werden im Schülerlabor betreut:

- Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrostreaktor
- Station 2: Zukunftstechnologie 3D-Druck
- Station 3: Energie in der Chemie
- Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen
- Station 5: Nanowelten

## 2. Selbsteinschätzung bei der Lösung von Problemen

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Die Lösung schwieriger Probleme gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele zu verwirklichen.	<input type="radio"/>				
Schwierigkeiten sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten vertrauen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn eine neue Sache auf mich zukommt, weiß ich, wie ich damit umgehen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ein Problem auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.	<input type="radio"/>				

### 3. Selbsteinschätzung im Umgang mit digitalen Medien

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Die Lösung von schwierigen Problemen im Umgang mit digitalen Medien gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele im Umgang mit digitalen Medien zu verwirklichen.	<input type="radio"/>				
Schwierigkeiten mit digitalen Medien sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien vertrauen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ich unbekannte digitale Medien nutzen soll, weiß ich schnell, wie ich damit umgehen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ein Problem in der Nutzung von digitalen Medien auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.	<input type="radio"/>				
Ich nutze digitale Medien häufig für private Arbeiten, da diese mir meine Arbeit erleichtern.	<input type="radio"/>				
Das Unterrichten von komplexen Sachverhalten gelingt mir mit Hilfe von digitalen Medien besser als ohne der Unterstützung von digitalen Medien.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, digitale Medien didaktisch gewinnbringend im Unterricht einzusetzen.	<input type="radio"/>				
Mit Hilfe von digitalen Medien kann ich meinen Unterricht bereichern.	<input type="radio"/>				

#### 4. Einschätzung von digitalen Medien im Unterricht

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Ich nutze digitale Medien gerne in meinem Unterricht.	<input type="radio"/>				
Ich nutze digitale Medien häufig in meinem Unterricht.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien sind für einen guten Chemieunterricht unerlässlich.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen mir, meinen Chemieunterricht zu verbessern.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen den Schülerinnen und Schülern, komplexe Sachverhalte schneller zu verstehen.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien bieten didaktische Möglichkeiten, welche klassische Medien nicht vorzuweisen haben.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen mir, meinen Unterricht individueller an die Bedürfnisse meiner Schülerinnen und Schüler anzupassen.	<input type="radio"/>				

5. Wissensfragen zum Umgang mit und Einsatz von digitalen Medien

**Bitte beachten Sie, dass es sich bei allen Fragen um Single Choice Fragen handelt, das heißt es ist nur eine Antwort pro Frage anzukreuzen. Bitte achten Sie darauf, ob nach einer richtigen oder falschen Antwort gefragt wird!**

Frage 1: Welche der folgenden Aussagen über Augmented Reality (deutsch: Erweiterte Realität) ist korrekt?

- a. Lehrkräften stehen keine kostenlosen Augmented Reality Apps zur Verfügung, mit denen sie selbst Augmented Reality Anwendungen für den Unterricht erstellen können.
- b. Die „Erweiterung der Realität“ kann nur mit Hilfe von Videos und Animationen erfolgen.
- c. Die Einblendung der virtuellen Hilfslinie zur Ermittlung eines Abseitsverstoßes bei einer Fußballfernsehübertragung ist eine Anwendung von Augmented Reality.
- d. Keine der drei oben genannten Antwortmöglichkeiten ist korrekt.

Frage 2: Welche der folgenden Aussagen zu CAD-Softwares (kurz für computer-aided design software) ist korrekt?

- a. Um ein mit einem CAD-Programm selbst entworfenes 3D-Oberflächenmodell mit dem 3D-Drucker auszudrucken ist kein Slicing notwendig.
- b. CAD-Programme eignen sich zur Erstellung von einfachen Molekülmodellen wie beispielsweise einem Wassermolekül, nicht aber zur Erstellung komplexer Molekül- oder Proteinmodelle.
- c. CAD-Programme eignen sich zur Erstellung von Modellen wie beispielsweise Molekül- oder Proteinmodellen.
- d. Mit CAD-Programmen werden 3D-Drucker programmiert, um einen möglichst hochauflösenden Ausdruck zu erhalten.

Frage 3: Welche der folgenden Aussagen zu Wärmebildkameras ist korrekt?

- a. Wärmebildkameras visualisieren die kurzwellige Strahlung.
- b. In Wärmebildern werden kalte Gegenstände immer blau und warme oder heiße Gegenstände immer rot dargestellt.
- c. Wärmebilder können nicht durch die Reflexionen verfälscht werden.
- d. Wärmebilder gehören zur Gruppe der Falschfarbenbilder.

Frage 4: Welche der folgenden Aussagen zu Animationen und Simulationen ist korrekt?

- Auf die Parameter einer Animation können die Anwender keinen Einfluss nehmen, auf die Parameter einer Simulation hingegen schon.
- Eine Animation enthält nur statische Bilder, während in einer Simulation auch Bewegungen dargestellt werden.
- In einer Animation wird nur die phänomenologische Ebene dargestellt, in einer Simulation hingegen nur die Teilchenebene.
- Es gibt keinen Unterschied zwischen einer Animation und einer Simulation. Beide Begriffe beschreiben das gleiche digitale Medium.

Frage 5: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Augmented Reality im Chemieunterricht ist falsch?

- Augmented Reality kann sowohl im Theorieunterricht als auch im chemischen Experiment eingesetzt werden.
- Augmented Reality kann für die Schülerinnen und Schüler anschaulich die phänomenologische mit der submikroskopischen Ebene verknüpfen.
- Augmented Reality kann vor der Versuchsdurchführung zur Simulation eines Experiments genutzt werden.
- Augmented Reality ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern sich die Lerninhalte in ihrem individuellen Lerntempo anzueignen.

Frage 6: Welche der folgenden Aussagen zum Einsatz von CAD-Softwares und 3D-Druckern im Chemieunterricht ist falsch?

- Durch den Einsatz von CAD-Software und 3D-Drucker kann die Valenzstruktur-Theorie vertieft werden.
- Die Erstellung von Molekülmodellen führt zu einer besseren räumlichen Vorstellung von den erstellten Molekülen bei den Schülerinnen und Schülern.
- Durch die selbstständige Erstellung von Molekülmodellen vertiefen Schülerinnen und Schüler ihre Kenntnisse über die VSEPR-Theorie.
- Durch den Einsatz eines 3D-Druckers im Chemieunterricht wird den Schülerinnen und Schülern der Beitrag der Chemie zu modernen Techniken aufgezeigt.

Frage 7: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Wärmebildkameras im Chemieunterricht ist falsch?

- Mit Hilfe von Wärmebildkameras kann die Wärmekapazität von unterschiedlichen Metallen visualisiert werden.
- Wärmebildkameras eignen sich zur Visualisierung des Energie-Konzeptes.
- Mit Wärmebildkameras kann das Konzept der Energieerhaltung den Schülerinnen und Schüler aufgezeigt werden.
- Wärmebildkameras eignen sich nicht zur Visualisierung von endothermen und exothermen Reaktionen.

Frage 8: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Animationen und Simulationen im Chemieunterricht ist falsch?

- a. Animationen und Simulationen ermöglichen es, Vorgänge im submikroskopischen Bereich zu visualisieren.
- b. Simulationen ermöglichen das Durchlaufen von potentiell gefährlichen Experimenten.
- c. Mit Hilfe von Animationen und Simulationen können Themengebiete aller fünf Basiskonzepte der Chemie vertieft werden.
- d. Animationen, welche die makroskopische mit der submikroskopischen Ebene kombinieren helfen Schülerinnen und Schüler Fehlvorstellungen zu überwinden.

*Vielen Dank für Ihre Mithilfe!*

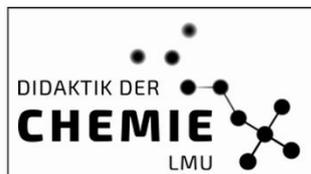
## Anhang 3: Post-Fragebogen



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

DIDAKTIK DER CHEMIE  
BUTENANDTSTR. 5-13  
81377 MÜNCHEN

POST-FRAGEBOGEN



## Post-Erhebung

Liebe Studentinnen und Studenten,

um die Veränderungen Ihrer Kompetenzen im Verlauf dieses Seminars nachzuvollziehen und zukünftig noch besser an die Bedürfnisse von Lehramtsstudierenden anpassen zu können, benötigen wir Ihre Hilfe! Alles was Sie dafür tun müssen, ist den folgenden Fragebogen gewissenhaft auszufüllen!

Der vorliegende Fragebogen dient lediglich der wissenschaftlichen Begleitforschung des Seminars und hat keinerlei weitere Funktion, die in irgendeiner Weise Ihre universitären Noten oder Laufbahn beeinflussen würde.

Die Erhebung ist anonym, wertefrei und freiwillig. Dennoch ist es wichtig, Ihre in zeitlichem Abstand erhobenen Fragebögen einander zuordnen zu können. Damit das möglich ist, bitten wir Sie aus den in der Tabelle erfragten Aspekten ein Kürzel zu bilden. Ein Rückschluss auf Ihre Person ist ausgeschlossen.

Zweiter Buchstabe des Vornamens des Vaters	Dritter Buchstabe des Vornamens der Mutter	Erster Buchstabe des Mädchennamens der Mutter	Dritter Buchstabe des Vornamens der Oma väterlicherseits	Geburtsmonat des Vaters z.B. 03 für März oder 11 für November

**Bitte beantworten Sie die Ihnen vorliegenden Fragen ehrlich und sorgfältig, nur so kann das Seminar vollständig wissenschaftlich evaluiert und weiterentwickelt werden. Bei allen Fragen handelt es sich um Single Choice Fragen. Setzen Sie bitte bei jeder Frage klar ein Kreuz auf die vorgesehenen Kreise, nicht dazwischen!**

Dauer: ca. 10 Minuten

Für Rückfragen zu dieser Untersuchung stehe ich Ihnen gerne unter der aufgeführten E-Mail-Adresse zur Verfügung. Vielen Dank im Voraus für Ihre Mithilfe!

Mit freundlichen Grüßen  
Michael Scheid

Michael Scheid  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Didaktik der Chemie  
Tel: 089/2180-77394  
michael.scheid@cup.uni-muenchen.de  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Butenandtstr. 5-13  
81377 München

## 1. Allgemeine Informationen

Folgende Stationen wurden im Schülerlabor betreut:

- Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrostreaktor
- Station 2: Zukunftstechnologie 3D-Druck
- Station 3: Energie in der Chemie
- Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen
- Station 5: Nanowelten

## 2. Selbsteinschätzung bei der Lösung von Problemen

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Die Lösung schwieriger Probleme gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele zu verwirklichen.	<input type="radio"/>				
Schwierigkeiten sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten vertrauen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn eine neue Sache auf mich zukommt, weiß ich, wie ich damit umgehen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ein Problem auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.	<input type="radio"/>				

### 3. Selbsteinschätzung im Umgang mit digitalen Medien

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Die Lösung von schwierigen Problemen im Umgang mit digitalen Medien gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele im Umgang mit digitalen Medien zu verwirklichen.	<input type="radio"/>				
Schwierigkeiten mit digitalen Medien sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien vertrauen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ich unbekannte digitale Medien nutzen soll, weiß ich schnell, wie ich damit umgehen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ein Problem in der Nutzung von digitalen Medien auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.	<input type="radio"/>				
Ich nutze digitale Medien häufig für private Arbeiten, da diese mir meine Arbeit erleichtern.	<input type="radio"/>				
Das Unterrichten von komplexen Sachverhalten gelingt mir mit Hilfe von digitalen Medien besser als ohne der Unterstützung von digitalen Medien.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, digitale Medien didaktisch gewinnbringend im Unterricht einzusetzen.	<input type="radio"/>				
Mit Hilfe von digitalen Medien kann ich meinen Unterricht bereichern.	<input type="radio"/>				

#### 4. Einschätzung von digitalen Medien im Unterricht

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Ich nutze digitale Medien gerne in meinem Unterricht.	<input type="radio"/>				
Ich nutze digitale Medien häufig in meinem Unterricht.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien sind für einen guten Chemieunterricht unerlässlich.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen mir, meinen Chemieunterricht zu verbessern.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen den Schülerinnen und Schülern, komplexe Sachverhalte schneller zu verstehen.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien bieten didaktische Möglichkeiten, welche klassische Medien nicht vorzuweisen haben.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen mir, meinen Unterricht individueller an die Bedürfnisse meiner Schülerinnen und Schüler anzupassen.	<input type="radio"/>				

5. Wissensfragen zum Umgang mit und Einsatz von digitalen Medien

**Bitte beachten Sie, dass es sich bei allen Fragen um Single Choice Fragen handelt, das heißt es ist nur eine Antwort pro Frage anzukreuzen. Bitte achten Sie darauf, ob nach einer richtigen oder falschen Antwort gefragt wird!**

Frage 1: Welche der folgenden Aussagen über Augmented Reality (deutsch: Erweiterte Realität) ist korrekt?

- a. Lehrkräften stehen keine kostenlosen Augmented Reality Apps zur Verfügung, mit denen sie selbst Augmented Reality Anwendungen für den Unterricht erstellen können.
- b. Die „Erweiterung der Realität“ kann nur mit Hilfe von Videos und Animationen erfolgen.
- c. Die Einblendung der virtuellen Hilfslinie zur Ermittlung eines Abseitsverstoßes bei einer Fußballfernsehübertragung ist eine Anwendung von Augmented Reality.
- d. Keine der drei oben genannten Antwortmöglichkeiten ist korrekt.

Frage 2: Welche der folgenden Aussagen zu CAD-Softwares (kurz für computer-aided design software) ist korrekt?

- a. Um ein mit einem CAD-Programm selbst entworfenes 3D-Oberflächenmodell mit dem 3D-Drucker auszudrucken ist kein Slicing notwendig.
- b. CAD-Programme eignen sich zur Erstellung von einfachen Molekülmodellen wie beispielsweise einem Wassermolekül, nicht aber zur Erstellung komplexer Molekül- oder Proteinmodelle.
- c. CAD-Programme eignen sich zur Erstellung von Modellen wie beispielsweise Molekül- oder Proteinmodellen.
- d. Mit CAD-Programmen werden 3D-Drucker programmiert, um einen möglichst hochauflösenden Ausdruck zu erhalten.

Frage 3: Welche der folgenden Aussagen zu Wärmebildkameras ist korrekt?

- a. Wärmebildkameras visualisieren die kurzwellige Strahlung.
- b. In Wärmebildern werden kalte Gegenstände immer blau und warme oder heiße Gegenstände immer rot dargestellt.
- c. Wärmebilder können nicht durch die Reflexionen verfälscht werden.
- d. Wärmebilder gehören zur Gruppe der Falschfarbenbilder.

Frage 4: Welche der folgenden Aussagen zu Animationen und Simulationen ist korrekt?

- Auf die Parameter einer Animation können die Anwender keinen Einfluss nehmen, auf die Parameter einer Simulation hingegen schon.
- Eine Animation enthält nur statische Bilder, während in einer Simulation auch Bewegungen dargestellt werden.
- In einer Animation wird nur die phänomenologische Ebene dargestellt, in einer Simulation hingegen nur die Teilchenebene.
- Es gibt keinen Unterschied zwischen einer Animation und einer Simulation. Beide Begriffe beschreiben das gleiche digitale Medium.

Frage 5: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Augmented Reality im Chemieunterricht ist falsch?

- Augmented Reality kann sowohl im Theorieunterricht als auch im chemischen Experiment eingesetzt werden.
- Augmented Reality kann für die Schülerinnen und Schüler anschaulich die phänomenologische mit der submikroskopischen Ebene verknüpfen.
- Augmented Reality kann vor der Versuchsdurchführung zur Simulation eines Experiments genutzt werden.
- Augmented Reality ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern sich die Lerninhalte in ihrem individuellen Lerntempo anzueignen.

Frage 6: Welche der folgenden Aussagen zum Einsatz von CAD-Softwares und 3D-Druckern im Chemieunterricht ist falsch?

- Durch den Einsatz von CAD-Software und 3D-Drucker kann die Valenzstruktur-Theorie vertieft werden.
- Die Erstellung von Molekülmodellen führt zu einer besseren räumlichen Vorstellung von den erstellten Molekülen bei den Schülerinnen und Schülern.
- Durch die selbstständige Erstellung von Molekülmodellen vertiefen Schülerinnen und Schüler ihre Kenntnisse über die VSEPR-Theorie.
- Durch den Einsatz eines 3D-Druckers im Chemieunterricht wird den Schülerinnen und Schülern der Beitrag der Chemie zu modernen Techniken aufgezeigt.

Frage 7: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Wärmebildkameras im Chemieunterricht ist falsch?

- Mit Hilfe von Wärmebildkameras kann die Wärmekapazität von unterschiedlichen Metallen visualisiert werden.
- Wärmebildkameras eignen sich zur Visualisierung des Energie-Konzeptes.
- Mit Wärmebildkameras kann das Konzept der Energieerhaltung den Schülerinnen und Schülern aufgezeigt werden.
- Wärmebildkameras eignen sich nicht zur Visualisierung von endothermen und exothermen Reaktionen.

Frage 8: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Animationen und Simulationen im Chemieunterricht ist falsch?

- a. Animationen und Simulationen ermöglichen es, Vorgänge im submikroskopischen Bereich zu visualisieren.
- b. Simulationen ermöglichen das Durchlaufen von potentiell gefährlichen Experimenten.
- c. Mit Hilfe von Animationen und Simulationen können Themengebiete aller fünf Basiskonzepte der Chemie vertieft werden.
- d. Animationen, welche die makroskopische mit der submikroskopischen Ebene kombinieren helfen Schülerinnen und Schüler Fehlvorstellungen zu überwinden.

6. Anregungen und Wünsche

Welche weiteren Anregungen und Hinweise wollen Sie dem aktuellen Schülerlaborprogramm mit auf den Weg geben?

---

---

---

---

---

Welche weiteren Anregungen und Hinweise wollen Sie dem aktuellen Seminar zum Schülerlabor mit auf den Weg geben?

---

---

---

---

---

*Vielen Dank für Ihre Mithilfe!*

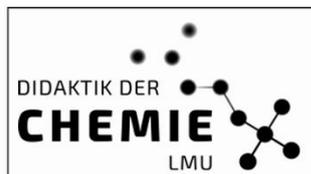
## Anhang 4: Follow-Up-Fragebogen



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

DIDAKTIK DER CHEMIE  
BUTENANDTSTR. 5-13  
81377 MÜNCHEN

FOLLOW-UP-FRAGEBOGEN



## Follow-Up-Erhebung

Liebe Studentinnen und Studenten,

um die Veränderungen Ihrer Kompetenzen im Verlauf dieses Seminars nachzuvollziehen und zukünftig noch besser an die Bedürfnisse von Lehramtsstudierenden anpassen zu können, benötigen wir Ihre Hilfe! Alles was Sie dafür tun müssen, ist den folgenden Fragebogen gewissenhaft auszufüllen!

Der vorliegende Fragebogen dient lediglich der wissenschaftlichen Begleitforschung des Seminars und hat keinerlei weitere Funktion, die in irgendeiner Weise Ihre universitären Noten oder Laufbahn beeinflussen würde. Der Ihnen vorliegende dritte und letzte Fragebogen der Reihe ist für uns in der Begleitforschung besonders wichtig.

Die Erhebung ist anonym, wertefrei und freiwillig. Dennoch ist es wichtig, Ihre in zeitlichem Abstand erhobenen Fragebögen einander zuordnen zu können. Damit das möglich ist, bitten wir Sie aus den in der Tabelle erfragten Aspekten ein Kürzel zu bilden. Ein Rückschluss auf Ihre Person ist ausgeschlossen.

Zweiter Buchstabe des Vornamens des Vaters	Dritter Buchstabe des Vornamens der Mutter	Erster Buchstabe des Mädchennamens der Mutter	Dritter Buchstabe des Vornamens der Oma väterlicherseits	Geburtsmonat des Vaters z.B. 03 für März oder 11 für November

**Bitte beantworten Sie die Ihnen vorliegenden Fragen ehrlich und sorgfältig, nur so kann das Seminar vollständig wissenschaftlich evaluiert und weiterentwickelt werden. Bei allen Fragen handelt es sich um Single Choice Fragen. Setzen Sie bitte bei jeder Frage klar ein Kreuz auf die vorgesehenen Kreise, nicht dazwischen!**

Dauer: ca. 10 Minuten

Für Rückfragen zu dieser Untersuchung stehe ich Ihnen gerne unter der aufgeführten E-Mail-Adresse zur Verfügung. Vielen Dank im Voraus für Ihre Mithilfe!

Mit freundlichen Grüßen  
Michael Scheid

Michael Scheid  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Didaktik der Chemie  
Tel: 089/2180-77394  
michael.scheid@cup.uni-muenchen.de  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
Butenandtstr. 5-13  
81377 München

## 1. Allgemeine Informationen

Folgende Stationen wurden im Schülerlabor betreut:

- Station 1: Synthese von Silbernanopartikeln im Leidenfrostreaktor
- Station 2: Zukunftstechnologie 3D-Druck
- Station 3: Energie in der Chemie
- Station 4: „Grüne“ Wunderkerzen
- Station 5: Nanowelten

## 2. Selbsteinschätzung bei der Lösung von Problemen

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Die Lösung schwieriger Probleme gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele zu verwirklichen.	<input type="radio"/>				
Schwierigkeiten sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten vertrauen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn eine neue Sache auf mich zukommt, weiß ich, wie ich damit umgehen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ein Problem auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.	<input type="radio"/>				

### 3. Selbsteinschätzung im Umgang mit digitalen Medien

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Die Lösung von schwierigen Problemen im Umgang mit digitalen Medien gelingt mir immer, wenn ich mich darum bemühe.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, meine Absichten und Ziele im Umgang mit digitalen Medien zu verwirklichen.	<input type="radio"/>				
Schwierigkeiten mit digitalen Medien sehe ich gelassen entgegen, weil ich meinen Fähigkeiten im Umgang mit digitalen Medien vertrauen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ich unbekannte digitale Medien nutzen soll, weiß ich schnell, wie ich damit umgehen kann.	<input type="radio"/>				
Wenn ein Problem in der Nutzung von digitalen Medien auftaucht, kann ich es aus eigener Kraft meistern.	<input type="radio"/>				
Ich nutze digitale Medien häufig für private Arbeiten, da diese mir meine Arbeit erleichtern.	<input type="radio"/>				
Das Unterrichten von komplexen Sachverhalten gelingt mir mit Hilfe von digitalen Medien besser als ohne der Unterstützung von digitalen Medien.	<input type="radio"/>				
Es bereitet mir keine Schwierigkeiten, digitale Medien didaktisch gewinnbringend im Unterricht einzusetzen.	<input type="radio"/>				
Mit Hilfe von digitalen Medien kann ich meinen Unterricht bereichern.	<input type="radio"/>				

#### 4. Einschätzung von digitalen Medien im Unterricht

Aussage	trifft zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft nicht zu
Ich nutze digitale Medien gerne in meinem Unterricht.	<input type="radio"/>				
Ich nutze digitale Medien häufig in meinem Unterricht.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien sind für einen guten Chemieunterricht unerlässlich.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen mir, meinen Chemieunterricht zu verbessern.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen den Schülerinnen und Schülern, komplexe Sachverhalte schneller zu verstehen.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien bieten didaktische Möglichkeiten, welche klassische Medien nicht vorzuweisen haben.	<input type="radio"/>				
Digitale Medien helfen mir, meinen Unterricht individueller an die Bedürfnisse meiner Schülerinnen und Schüler anzupassen.	<input type="radio"/>				

5. Wissensfragen zum Umgang mit und Einsatz von digitalen Medien

**Bitte beachten Sie, dass es sich bei allen Fragen um Single Choice Fragen handelt, das heißt es ist nur eine Antwort pro Frage anzukreuzen. Bitte achten Sie darauf, ob nach einer richtigen oder falschen Antwort gefragt wird!**

Frage 1: Welche der folgenden Aussagen über Augmented Reality (deutsch: Erweiterte Realität) ist korrekt?

- a. Lehrkräften stehen keine kostenlosen Augmented Reality Apps zur Verfügung, mit denen sie selbst Augmented Reality Anwendungen für den Unterricht erstellen können.
- b. Die „Erweiterung der Realität“ kann nur mit Hilfe von Videos und Animationen erfolgen.
- c. Die Einblendung der virtuellen Hilfslinie zur Ermittlung eines Abseitsverstoßes bei einer Fußballfernsehübertragung ist eine Anwendung von Augmented Reality.
- d. Keine der drei oben genannten Antwortmöglichkeiten ist korrekt.

Frage 2: Welche der folgenden Aussagen zu CAD-Softwares (kurz für computer-aided design software) ist korrekt?

- a. Um ein mit einem CAD-Programm selbst entworfenes 3D-Oberflächenmodell mit dem 3D-Drucker auszudrucken ist kein Slicing notwendig.
- b. CAD-Programme eignen sich zur Erstellung von einfachen Molekülmodellen wie beispielsweise einem Wassermolekül, nicht aber zur Erstellung komplexer Molekül- oder Proteinmodelle.
- c. CAD-Programme eignen sich zur Erstellung von Modellen wie beispielsweise Molekül- oder Proteinmodellen.
- d. Mit CAD-Programmen werden 3D-Drucker programmiert, um einen möglichst hochauflösenden Ausdruck zu erhalten.

Frage 3: Welche der folgenden Aussagen zu Wärmebildkameras ist korrekt?

- a. Wärmebildkameras visualisieren die kurzwellige Strahlung.
- b. In Wärmebildern werden kalte Gegenstände immer blau und warme oder heiße Gegenstände immer rot dargestellt.
- c. Wärmebilder können nicht durch die Reflexionen verfälscht werden.
- d. Wärmebilder gehören zur Gruppe der Falschfarbenbilder.

Frage 4: Welche der folgenden Aussagen zu Animationen und Simulationen ist korrekt?

- Auf die Parameter einer Animation können die Anwender keinen Einfluss nehmen, auf die Parameter einer Simulation hingegen schon.
- Eine Animation enthält nur statische Bilder, während in einer Simulation auch Bewegungen dargestellt werden.
- In einer Animation wird nur die phänomenologische Ebene dargestellt, in einer Simulation hingegen nur die Teilchenebene.
- Es gibt keinen Unterschied zwischen einer Animation und einer Simulation. Beide Begriffe beschreiben das gleiche digitale Medium.

Frage 5: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Augmented Reality im Chemieunterricht ist falsch?

- Augmented Reality kann sowohl im Theorieunterricht als auch im chemischen Experiment eingesetzt werden.
- Augmented Reality kann für die Schülerinnen und Schüler anschaulich die phänomenologische mit der submikroskopischen Ebene verknüpfen.
- Augmented Reality kann vor der Versuchsdurchführung zur Simulation eines Experiments genutzt werden.
- Augmented Reality ermöglicht es den Schülerinnen und Schülern sich die Lerninhalte in ihrem individuellen Lerntempo anzueignen.

Frage 6: Welche der folgenden Aussagen zum Einsatz von CAD-Softwares und 3D-Druckern im Chemieunterricht ist falsch?

- Durch den Einsatz von CAD-Software und 3D-Drucker kann die Valenzstruktur-Theorie vertieft werden.
- Die Erstellung von Molekülmodellen führt zu einer besseren räumlichen Vorstellung von den erstellten Molekülen bei den Schülerinnen und Schülern.
- Durch die selbstständige Erstellung von Molekülmodellen vertiefen Schülerinnen und Schüler ihre Kenntnisse über die VSEPR-Theorie.
- Durch den Einsatz eines 3D-Druckers im Chemieunterricht wird den Schülerinnen und Schülern der Beitrag der Chemie zu modernen Techniken aufgezeigt.

Frage 7: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Wärmebildkameras im Chemieunterricht ist falsch?

- Mit Hilfe von Wärmebildkameras kann die Wärmekapazität von unterschiedlichen Metallen visualisiert werden.
- Wärmebildkameras eignen sich zur Visualisierung des Energie-Konzeptes.
- Mit Wärmebildkameras kann das Konzept der Energieerhaltung den Schülerinnen und Schüler aufgezeigt werden.
- Wärmebildkameras eignen sich nicht zur Visualisierung von endothermen und exothermen Reaktionen.



LUDWIG-  
MAXIMILIANS-  
UNIVERSITÄT  
MÜNCHEN

DIDAKTIK DER CHEMIE  
BUTENANDTSTR. 5-13  
81377 MÜNCHEN

FOLLOW-UP-FRAGEBOGEN



Frage 8: Welche der folgenden Aussagen über den Einsatz von Animationen und Simulationen im Chemieunterricht ist falsch?

- a. Animationen und Simulationen ermöglichen es, Vorgänge im submikroskopischen Bereich zu visualisieren.
- b. Simulationen ermöglichen das Durchlaufen von potentiell gefährlichen Experimenten.
- c. Mit Hilfe von Animationen und Simulationen können Themengebiete aller fünf Basiskonzepte der Chemie vertieft werden.
- d. Animationen, welche die makroskopische mit der submikroskopischen Ebene kombinieren helfen Schülerinnen und Schüler Fehlvorstellungen zu überwinden.

*Vielen Dank für Ihre Mithilfe!*

## Anhang 5: Übersicht weiterer Veröffentlichungen

### Beiträge in unterrichtspraktischen Fachzeitschriften, Akademieberichten und Schulbüchern

- Scheid, M. & Schwarzer, S. (2021). Herstellung von umweltfreundlichen Wunderkerzen. *Naturwissenschaften im Unterricht: Chemie*, 32(183), 49–50.
- Scheid, M. & Schwarzer, S. (2021). Herstellung von Wunderkerzen. In: *Chemie? – Aber sicher! Experimente kennen und können!* 5. Aufl., 27-1–27-2.
- Scheid, M. & Schwarzer, S. (2021). Wunderkerzen. In Hollweck E. & Weingand, T. (Hrsg.): *Chemie 9 NTG*. Gymnasium Bayern. C.C.Buchner-Verlag, Bamberg. 74.

### Posterbeiträge

- Poster „Digitale Medien im Fachunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen in einer UNI-Klasse“ auf der Fachtagung zu digitalen Medien im naturwissenschaftlichen Unterricht der Joachim-Herz-Stiftung am 12.03.2019 in Kaiserslautern (M. Scheid & S. Schwarzer).
- Poster „Digitale Medien im Fachunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen in einer UNI-Klasse“ auf dem Kick-Off-Treffen *Lehrerbildung@LMU* am 22.07.2019 in München (M. Scheid & S. Schwarzer).
- Poster „Digitale Medien im Fachunterricht (DiFa<sub>M</sub><sup>Ch</sup>). Aufbau professioneller Handlungskompetenzen in der UNI-Klasse Mathematik/Chemie“ auf dem Kick-Off-Treffen *Lehrerbildung@LMU* am 22.07.2019 in München (T. Kosiol, M. Mohr, M. Scheid, S. Schwarzer & S. Ufer).
- Poster „‘Grüne’ Wunderkerzen im Chemieunterricht“ auf der FGCU-Tagung Aachen am 16.09.2019 (M. Scheid, M. Rusan & S. Schwarzer).

*Nominierung als Spitzenposter*

### Vorträge

- Vortrag „Entwicklung eines Molekülbaukastens mit dem 3D-Drucker. Vom submikroskopischen Molekül zur makroskopischen Funktion“ auf der FGCU-Tagung Karlsruhe am 14.09.2018 (M. Scheid & S. Schwarzer).
- Vortrag „Ein Ausflug zu den Materialien von morgen: Chemische Experimente mit Bezug zur Nachhaltigkeit aus dem Schülerlabor“ auf der FGCU-Tagung Karlsruhe am 16.09.2019 (S. Schwarzer, D. Diekemper, S. Hollweck & M. Scheid).
- Vortrag „Digitale Medien im Fachunterricht: Aufbau professioneller Handlungskompetenzen in der UNI-Klasse Chemie im Kontext eines Schülerlabors“ auf der digitalen FGCU-Tagung am 23.09.2021 (M. Scheid).