

# KONZEPTUALISIERUNG DES THEMAS „NANO“ FÜR DEN CHEMIEUNTERRICHT

## **Dissertation**

zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades

„Doctor rerum naturalium“

der Georg-August-Universität Göttingen

im Promotionsprogramm Chemie

der Georg-August University School of Science (GAUSS)

vorgelegt von

**TIMM WILKE**

aus Brüssel

**Göttingen, 2016**

Die vorliegende Arbeit wurde im Zeitraum von September 2012 bis Oktober 2016 in der Abteilung für Fachdidaktik Chemie in der Arbeitsgruppe von Herrn PROF. DR. THOMAS WAITZ am Institut für Anorganische Chemie der Georg-August-Universität Göttingen angefertigt.

### **Betreuungsausschuss**

1. Betreuer: PROF. DR. THOMAS WAITZ  
Abteilung für Fachdidaktik Chemie  
Institut für Anorganische Chemie  
Georg-August-Universität Göttingen
2. Betreuer: PROF. DR. DIETMAR STALKE  
Institut für Anorganische Chemie  
Georg-August-Universität Göttingen

### **Mitglieder der Prüfungskommission**

- Referent PROF. DR. THOMAS WAITZ, Abteilung für Fachdidaktik Chemie, Institut für Anorganische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen
- Korreferent PROF. DR. DIETMAR STALKE, Institut für Anorganische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen

### **Weitere Mitglieder der Prüfungskommission**

- PROF. DR. DIRK FELZMANN, Geographie und Didaktik, Geographisches Institut, Georg-August-Universität Göttingen
- PROF. DR. VERENA PIETZNER, Didaktik der Chemie, Institut für Chemie, Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg
- PROF. DR. SUSANNE SCHNEIDER, Didaktik der Physik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen
- PROF. DR. INKE SIEWERT, Institut für Anorganische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen

Tag der Disputation: 07.11.2016



*„Die Neigung der Menschen,  
kleine Dinge für wichtig zu halten,  
hat sehr viel Großes hervorgebracht.“*

**GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG**

## DANKSAGUNG

Als erstes möchte ich mich bei PROF. DR. THOMAS WAITZ für die interessante Themenstellung und herausragende Betreuung während der Promotion bedanken. Die Möglichkeit, jederzeit ein offenes Ohr für Fragen, Vorschläge und Ideen zu finden, hat ebenso sehr zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen, wie die wertvollen Anregungen und Ratschläge, an denen es nie gefehlt hat.

Herrn PROF. DR. DIETMAR STALKE danke ich sehr herzlich für die Bereitschaft, diese Arbeit als Zweitgutachter zu betreuen.

Des Weiteren möchte ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe für die immer ausgesprochen angenehme Atmosphäre danken: ALEX, ANNIKA, ANNA, ANNA-MARIA, ANNE, BASTI, BENJAMIN, BENSON, CONNI, DENNIS, ELINA, ISABEL, ISABELLE, JAKOB, JANA, JOHANNA, MARC, MARIE-LENA, NELE, NICOLAI, RAMONA, SEBASTIAN, SINA, STEVIE, THOMAS und TOBI. Besonders danken möchte ich hierbei ADDI, BENE, ELLE, JANINA, KAI und STEFANIE für all die gemeinsam bewältigten Abende und Nächte mit viel Arbeit – und noch mehr für die ohne. Ihr alle seid der Grund, warum ich auch bei dem üblichen Hochbetrieb immer gerne ins Büro gegangen bin. Noch ein weiteres Mal möchte ich KAI für das kritische Korrekturlesen des Manuskripts dieser Arbeit danken, die noch dazu so viel umfangreicher ausgefallen ist, als ursprünglich geplant.

Auch wenn diese Arbeit ein „Göttinger Werk“ ist, sind hierbei sind auch Ergebnisse eingeflossen, die in Zusammenarbeit mit anderen Forschungsgruppen entwickelt wurden. In diesem Sinne danke ich dem Florida Institute of Technology, namentlich PROF. DR. KURT WINKELMANN, für die herzliche und unkomplizierte Kooperation, die kleinen Einblicke hinter die Kulissen der NASA sowie die großen Forschungsfreiräume während der Zeit im Sunshine State.

Besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle aber das IPN in Kiel. Ein ganz herzlicher Dank für die Zusammenarbeit und darüber hinaus geht an PROF. DR. STEFAN SCHWARZER und PROF. DR. ILKA PARCHMANN sowie an die Arbeitsgruppe: ANJA, HENRIKE, HILDA, INSA, JANET, JULIA, JURA, KATRIN, KATRIN, KLAUS, LARS, LORENZ, MARGOT, MARIA, MATHIAS, SASCHA, STEFANIE, TIM und WILLI – für die herzliche Aufnahme, für die CoKos, für ein tolles halbes Jahr in Kiel.

Alle in dieser Arbeit vorgestellten Projekte gründen natürlich auf theoretischen Vorüberlegungen; dass sie ihren Weg in die Praxis gefunden haben, ist an der Erprobung an den Partnerschulen der Universität Göttingen (Otto-Hahn-Gymnasium, IGS Geismar), dem Göttinger XLAB SCHÜLERLABOR, dem Institut für Anorganische Chemie sowie dem KLICK!LABOR des IPN Kiel zu verdanken. Ein großer Dank gehen hierbei an REGINE und ERHARD IRMER, DAGMAR BUERSCHAPER, CHRISTOPH MATHIES, BIRGIT DRABENT und FRAU PROF. DR. EVA-MARIA NEHER.

Dem FONDS DER CHEMISCHEN INDUSTRIE, der GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER, dem MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT UND KULTUR sowie insbesondere der STIFTUNG DER DEUTSCHEN

WIRTSCHAFT danke ich für die großzügige finanzielle Unterstützung und die ideelle Förderung während des Promotionsstipendiums.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie für den Rückhalt und Unterstützung während des Studiums, der Promotion und darüber hinaus. Eure Hilfe und Unterstützung bedeutet mir unendlich viel.

MARIEKE, dir danke ich für deine Motivation und deine Engelsgeduld, wenn ich wieder mal lange im Büro bleibe, auf Dienstreise oder sogar im Forschungssemester bin. Ohne dich, so wie du bist, wäre diese Arbeit, so wie sie ist, nicht möglich gewesen.

## ABSTRACT

In der heutigen Zeit wie auch in der Zukunft steht die Menschheit vor dem Hintergrund einer rapide steigenden Weltbevölkerung und dem Klimawandel vor vielfältigen gesellschaftlichen Herausforderungen. Die Nanowissenschaften bzw. -technologie stellen hierbei ein aktuelles und bedeutendes Forschungsfeld dar, dem ein signifikanter Beitrag zur Bewältigung dieser Problemstellungen zugeschrieben wird.

Ungeachtet ihrer großen Bedeutung in Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft werden Inhalte aus diesem Themenfeld bislang jedoch nur zögerlich in formale und non-formale Bildungszusammenhänge implementiert. Dies eröffnet eine Reihe von Fragestellungen, allen voran ob dieses Thema für eine Vermittlung außerhalb der Universität geeignet ist und auf welche Weise es didaktisch aufgearbeitet werden kann. Anknüpfend hieran soll in der vorliegenden Arbeit zunächst aus verschiedenen Blickwinkeln untersucht werden, welches Potenzial die Nanotechnologie für eine Vermittlung in Schule, Schülerlabor und Hochschule bietet. Hierbei wird herausgestellt, dass die Nanowissenschaften vielfältige Chancen für den Chemieunterricht bieten.

Aufbauend auf diese Grundlage werden anschließend Beiträge zur fachdidaktischen Konzeptualisierung dieses Themenfeldes vorgestellt. Im Rahmen einer didaktischen Rekonstruktion, welche den methodischen Rahmen der Konzeptualisierung bereitstellt, wird hierbei eine Klärung der Sachstruktur vorgenommen, um die elementaren Konzepte für eine Vermittlung herauszustellen. Von ebenso großer Bedeutung sind darüber hinaus die Perspektiven und Präkonzepte von Lernenden und Lehrenden, welche ebenso wie intrinsische und extrinsische Barrieren für eine unterrichtliche Behandlung empirisch erhoben bzw. identifiziert werden sollen.

Die ermittelten fachlichen Konzepte sowie die Perspektiven der Lernenden und Lehrenden werden schließlich miteinander verknüpft, sodass hieraus Leitlinien für die didaktische Strukturierung abgeleitet werden. Auf dieser Basis werden in dem Hauptteil der vorliegenden Arbeit nun in einem zyklischen Design Konzepte, Unterrichtseinheiten, -materialien sowie Lehrangebote für Schulen, Schülerlabore und Lehrer(fort)bildungen entwickelt, praktisch durchgeführt, evaluiert und weiter optimiert. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird dabei systematisch und in Anlehnung an die Basiskonzepte der Chemie erfolgen, um einen optimalen Anschluss an die Bildungsstandards bundesdeutscher Kerncurricula zu gewährleisten.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Motivation</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Chancen und Status Quo einer Nanoscience Education</b> .....	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>Chancen einer Nanoscience Education?</b> .....	<b>4</b>
3.1.1	Nanotechnologie im Bildungssystem: Katalysator für curriculare Reformen? .....	4
3.1.2	Nanotechnologie in Wirt- und Wissenschaft .....	5
3.1.3	Nanotechnologie in unserer Gesellschaft.....	9
<b>3.2</b>	<b>Bildungsinitiativen zur Nanotechnologie</b> .....	<b>11</b>
3.2.1	Mobile Ausstellungen .....	11
3.2.2	Schülerlabore .....	13
3.2.3	Experimentierkoffer, Websites und Unterrichtsmaterialien.....	14
<b>3.3</b>	<b>Nanotechnologie im formalen Bildungsbereich</b> .....	<b>16</b>
3.3.1	Nano-Studiengänge in Deutschland.....	16
3.3.2	Nanotechnologie in Schulcurricula .....	20
<b>3.4</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Didaktische Rekonstruktion des Themas „Nano“</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Grundzüge des Modells</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Struktur des weiteren Vorgehens</b> .....	<b>26</b>
<b>5</b>	<b>Klärung der Sachstruktur</b> .....	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>29</b>
<b>5.2</b>	<b>Nanotechnologie – Eine (Arbeits-)Definition</b> .....	<b>29</b>
<b>5.3</b>	<b>Nanomaterialien – Definition, Partikelgröße, Morphologien und Strukturen</b> .....	<b>31</b>
<b>5.4</b>	<b>Eigenschaften</b> .....	<b>33</b>
5.4.1	Oberflächenvergrößerung.....	33
5.4.2	Quanteneffekte .....	35
5.4.3	Steigerung der (katalytischen) Aktivität.....	37

<b>5.5</b>	<b>Synthesestrategien und Stabilisierung.....</b>	<b>38</b>
5.5.1	Synthesestrategien.....	39
5.5.2	Partikelwachstum.....	41
5.5.3	Stabilisierung von Nanopartikeln.....	41
<b>5.6</b>	<b>Charakterisierungsmethoden von Nanomaterialien .....</b>	<b>42</b>
<b>5.7</b>	<b>Anwendungsfelder .....</b>	<b>44</b>
<b>5.8</b>	<b>Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt.....</b>	<b>46</b>
5.8.1	Einfluss der Partikelgröße auf die Wirkung.....	46
5.8.2	Expositionsquellen und Aufnahmepfade.....	48
5.8.3	Umwelt.....	49
<b>5.9</b>	<b>Konzepte für die Vermittlung von „Nano“.....</b>	<b>50</b>
<b>6</b>	<b>Erfassung von Lerner- und Lehrerperspektiven.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1</b>	<b>Empirische Studie zu Lernerperspektiven .....</b>	<b>57</b>
6.1.1	Theoretische Überlegungen, Methodenwahl und Forschungsfragen.....	57
6.1.2	Forschungs- und Fragebogendesign.....	58
6.1.3	Resultate .....	59
6.1.4	Lernerperspektiven für die Vermittlung von „Nano“ .....	65
<b>6.2</b>	<b>Empirische Studie zu Perspektiven von Lehrkräften .....</b>	<b>68</b>
6.2.1	Theoretische Überlegungen und Forschungsfragen.....	68
6.2.2	Stichprobe .....	70
6.2.3	Resultate und Auswertung.....	70
6.2.4	Fazit.....	78
<b>7</b>	<b>Didaktische Strukturierung: Konstruktion von Unterricht.....</b>	<b>79</b>
<b>7.1</b>	<b>Angebote für den Chemieunterricht .....</b>	<b>82</b>
7.1.1	Projekt 1: Nanomaterialien im Alltag - Isolierung von und Experimente mit Titandioxid-Nanopartikeln .....	83
7.1.2	Projekt 2: Zinkoxid-Nanopartikel: Fluoreszierend, Faszinierend, Innovierend .	112
7.1.3	Projekt 3: Von der Sonnencreme zur Solarzelle – Ein Schule-Hochschule-Projekt	136
7.1.4	Projekt 4: Nanochemie und Katalyse .....	152

---

<b>7.2</b>	<b>Angebote für Schülerlabore.....</b>	<b>168</b>
7.2.1	Projekt 5: Nanotechnologie – ein experimentelles Kursdesign für das Schülerlabor 169	
7.2.2	Projekt 6: Synthese von Nanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor .....	179
7.2.3	Projekt 7: Funktionserweiterung durch Porosität - Synthese und Eigenschaften von nanostrukturierten Materialien.....	194
<b>7.3</b>	<b>Angebote für die Lehrerbildung.....</b>	<b>235</b>
7.3.1	Projekt 8: Integration in die grundständige Lehramtsausbildung.....	235
7.3.2	Projekt 9: Konzeption von Lehrerfortbildungen .....	240
<b>7.4</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>254</b>
<b>8</b>	<b>Abschlussbetrachtung und Ausblick .....</b>	<b>255</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>258</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>285</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>291</b>

# 1 Einleitung

Für den technologischen und gesellschaftlichen Wandel im 21. Jahrhundert, für die Versorgung einer rapide wachsenden Weltbevölkerung mit Nahrung und sauberem Trinkwasser, sowie für die Bereitstellung von technischen Endgeräten und Rechenleistung nehmen die Resultate naturwissenschaftlich-technischer Forschung eine essentielle Position ein. Die Wertschöpfung dieser Technologien und Produkte, die einer Vielzahl von Bereichen zuzuordnen ist, werden sowohl auf nationaler als auch auf globaler Ebene von großer Bedeutung sein für unseren Wohlstand, unsere wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit und unsere Sicherheit <sup>[1]</sup>.

Das gerade erst begonnene Jahrhundert stellt unsere Gesellschaft vor vielfältige Herausforderungen. Seit 1950 hat sich die Weltbevölkerung auf 7,32 Milliarden Menschen beinahe verdreifacht, für 2050 werden beinahe 10 Milliarden erwartet <sup>[2]</sup>. Jeder dieser Menschen besitzt ein Recht auf eine Grundversorgung mit Nahrung und Trinkwasser. Die zunehmende Industrialisierung zieht zudem einen beinahe ebenso großen Hunger nach Energie und weiteren Ressourcen (bspw. Seltene Erden) mit sich, der bereits heute in Schwellenländern wie Brasilien, Indien und insbesondere China deutlich spürbar ist. Dieser Energiehunger steht wiederum in einem starken Spannungsfeld mit der Ausbeute unseres Planeten und dem Klimawandel.

Es ist sicherlich unbestreitbar, dass mit den Methoden der Gegenwart die Probleme der Zukunft nicht gelöst werden können. Für die Bewältigung dieser technischen, gesellschaftlichen und sozioökonomischen Herausforderungen werden Menschen und Technologien benötigt, die über die klassischen Grenzen ihrer Disziplinen hinweg in fächerverbindenden Kontexten denken und arbeiten können.

Diese Anforderungen werden starke Auswirkungen auf das Bildungssystem nach sich ziehen und sollten idealerweise bereits in der schulischen Ausbildung reflektiert werden. Ein interdisziplinärer Ansatz würde weniger die Ausbildung von „Spezialisten“ fokussieren, sondern vielmehr eine fächerübergreifende Betrachtung neuer Technologien und den Entwurf multiperspektivischer Lösungsstrategien fördern <sup>[3]</sup>.

Eine besondere Rolle kommt in diesem Zusammenhang der Nanotechnologie bzw. den Nanowissenschaften<sup>1</sup> zu <sup>[6]</sup>. Ebenso wie die Genetik und künstliche Intelligenz wird sie als eine Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts bezeichnet und Kritiker sowie Befürworter gleichermaßen schreiben ihr das Potenzial zu, dieses Jahrhundert entscheidend zu prägen. Aufgrund ihres fächerübergreifenden Ansatzes kann sie darüber hinaus als Katalysator für eine stärker interdisziplinär ausgerichtete naturwissenschaftliche Ausbildung in Schule und Hochschule fungieren,

---

<sup>1</sup> „Nanotechnologie“ ist ein Oberbegriff für eine Vielfalt von Technologien, die sich mit Strukturen und Prozessen in nanoskaligen Dimensionen sowie deren Produktion und Anwendung befassen <sup>[4]</sup>. Unter dem Begriff „Nanowissenschaften“ wird darüber hinaus das Studium der Eigenschaften und Umgang mit Materialien in diesem Größenbereich verstanden, dessen Eigenschaften sich von den Materialien größerer Abmessungen signifikant unterscheiden <sup>[5]</sup>. Aufgrund der inhaltlichen Überschneidung dieser beiden Begriffe und aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit für Nanotechnologie und Nanowissenschaften in vielen Fällen gleichermaßen die Abkürzung „Nano“ verwendet. Gemeint ist dabei stets die in diesem Abschnitt beschriebene Bedeutung.



---

um auf diese Weise zukünftigen Absolventen neue Berufsperspektiven zu eröffnen und sie besser auf anstehende Herausforderungen vorzubereiten <sup>[7, 8]</sup>.

## 2 Motivation

Anknüpfend an dieses Potenzial werden in der vorliegenden Arbeit zunächst multiperspektivisch die Chancen einer Nanoscience Education<sup>2</sup> für den deutschen Bildungssektor untersucht und auch, welche Chancen dieses Themengebiet für den Chemieunterricht bietet (Kap. 3). Inwiefern sind entsprechende Inhalte bereits in der formalen und non-formalen Bildung verankert? Wie stellt sich die Situation in anderen Bildungssystemen dar, existieren im Ausland schon konkrete (Best-Practice-)Ansätze für eine dauerhafte curriculare Implementierung?

Aufbauend auf diese Ergebnisse werden im Hauptteil dieser Arbeit Beiträge zur fachdidaktischen Konzeptualisierung des Themenfeldes „Nano“ entwickelt. Im Rahmen einer didaktischen Rekonstruktion, welche den methodischen Rahmen dieses Abschnittes bereitstellt (Kap. 4), werden hierbei eine Klärung der Sachstruktur vorgenommen (Kap. 5) sowie Perspektiven von Lernenden und Lehrenden (Kap. 6) erhoben und anschließend der didaktischen Strukturierung (Kap. 7) zugrunde gelegt. Strukturiert in didaktische Projekte werden schließlich Konzepte, Unterrichtseinheiten, –materialien sowie Lehrangebote für Schulen, Schülerlabore, Hochschulen und die Lehrerbildung entwickelt. Kooperationspartner der Abteilung für Fachdidaktik Chemie ermöglichen dabei die praktische Erprobung sowie die Evaluation und Optimierung der Projekte. Hierbei soll auch stets der Transfer von der fachdidaktischen Forschung in die unterrichtliche Praxis beachtet werden.

Abschließend soll in einem Ausblick auf zukünftige Projekte und Entwicklungen innerhalb des Themenfeldes der Nanoscience Education eingegangen werden (Kap. 8).

---

<sup>2</sup> Die unterrichtliche Behandlung von Nanotechnologie bzw. den Nanowissenschaften wird im englischsprachigen Raum unter dem Begriff „Nanoscience Education“ zusammengefasst.

### 3 Chancen und Status Quo einer Nanoscience Education

Wie in der Einleitung beschrieben, erhält die Forschung im Bereich der Nanotechnologie gegenwärtig viel Zuspruch und es ist anzunehmen, dass ihr Einfluss zukünftig noch weiter wachsen wird. In diesem Sinne erscheint die Förderung einer Nanoscience Education und ihre Implementierung in schulische Vermittlungszusammenhänge als logische Konsequenz, um bereits junge Menschen für dieses Themengebiet zu sensibilisieren – von der Notwendigkeit einer curricularen Implementierung kann auf dieser Basis aber nicht per se ausgegangen werden. Hierzu muss im Vorfeld reflektiert werden, ob überhaupt ein Bedarf an einem weiteren Themengebiet in unserem Bildungssystem besteht und ob die „überfüllten Bildungspläne“<sup>[9]</sup> und Curricula auch Möglichkeiten bieten, dieses zu implementieren.

Die aktuelle naturwissenschaftliche Forschung bietet eine Fülle spannender und geeigneter Themengebiete und Fragestellungen, welche für eine unterrichtliche Behandlung in der Schule infrage kommen. Was unterscheidet die Nanotechnologie hiervon und konkreter: Welche Chancen bietet eine Nanoscience Education?

Diese Fragestellung kann auf mehreren Ebenen beantwortet werden; eine Betrachtung des Potenzials dieses Themengebietes im engeren (fachdidaktischeren) Sinne wird in Kapitel 5 dieser Arbeit erfolgen. Der vorliegende Abschnitt 3.1 zielt auf eine Beantwortung im weiteren Sinne ab – hierbei werden über den Lerngegenstand hinaus weitere Chancen betrachtet. Von großer Relevanz hierfür sind insbesondere Erkenntnisse aus den Sichtweisen von Bildungssystem, der Wirt- und Wissenschaft sowie der Gesellschaft, was nachfolgend in einer multiperspektivischen Untersuchung aufgezeigt werden soll.

#### 3.1 Chancen einer Nanoscience Education?

##### 3.1.1 Nanotechnologie im Bildungssystem: Katalysator für curriculare Reformen?

Sowohl hierzulande als auch in Bildungssystemen anderer Länder stehen naturwissenschaftliche Curricula insbesondere nach Schulleistungsstudien wie TIMSS<sup>3</sup><sup>[10]</sup> vermehrt in der Kritik<sup>[11–14]</sup>. Bereits 1991 bezeichnete die AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE diese als „overstuffed and undernourished“<sup>[15]</sup> und selbst das aktuelle niedersächsische Kerncurriculum für Naturwissenschaften spricht von „einer großen Themenfülle (...) bei gleichzeitig engem Zeitrahmen“<sup>[16]</sup>.

TRETTNER<sup>[13]</sup> und HURD<sup>[17]</sup> stellten in diesem Zusammenhang fest, dass viele Unterrichtsthemen nur ansatzweise und im engen Kontext ihrer Fächer vermittelt werden. Ein möglicher Lösungsvorschlag bestünde laut ihrer Aussage in der verstärkten Entwicklung und Behandlung sogenannter „unifying themes“, welche sich über die Grenzen der klassischen Naturwissenschafts-

---

<sup>3</sup> Die THIRD INTERNATIONAL MATHEMATICS AND SCIENCE STUDY ist eine internationale Schulleistungsuntersuchung für Mathematik und Naturwissenschaften aus dem Jahre 1997, durchgeführt von der INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR THE EVALUATION OF EDUCATIONAL ACHIEVEMENT (IEA).

disziplinen hinaus erstrecken und damit einen Zusammenhang zwischen den Naturwissenschaften herstellen sollen. Unterschiedlicher Meinung sind sie hingegen in der Frage, ob die Themen dennoch verstärkt in ihren bisherigen Fächern verortet bleiben sollten oder ob weitergehende Reformen im Sinne eines interdisziplinären naturwissenschaftlichen Faches angestrebt werden sollen. Ähnliche Tendenzen sind auch bei europäischen Forschern zu finden <sup>[12]</sup>.

In diesem Kontext könnte eine Nanoscience Education folglich als Katalysator für curriculare Reformen wirken, welche mittelfristig Inhalte verschiedener Fächer vernetzen und somit Schülerinnen und Schülern<sup>4</sup> einen interdisziplinären Zugang zu Naturwissenschaften bieten können. Auf diese Weise kann sie ihnen frühzeitig ermöglichen, Beziehungen zwischen den vormals getrennten Fächern zu erkennen und damit gleichzeitig der Bildung von inertem bzw. „trägem“ Wissen entgegenwirken:

*„Interdisciplinary big ideas [in nanotechnology] encourage learners to build integrated knowledge structures, to apply their knowledge to a range of situations, and to develop deeper conceptual understanding than is likely when concepts and ideas are presented in more isolated contexts.“* <sup>[18]</sup>

Langfristig wird ihr darüber hinausgehend das Potenzial zugesprochen, einen großen Beitrag zu der Entwicklung eines naturwissenschaftlichen Curriculums zu leisten <sup>[6]</sup>. Erste Ansätze befinden sich bereits gegenwärtig in der Entwicklung – in dem Projekt NANOBINE <sup>[19]</sup> etwa wird das Themengebiet „Nano“ im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung fächerverbindend untersucht.

Zuletzt gilt es zu beachten, dass nanotechnologische Inhalte gemäß dieser Sichtweise nicht als zusätzliches, konkurrierendes Themengebiet für die Bildungspläne und Curricula aufzufassen sind, sondern vielmehr als Möglichkeit zur Verbindung der bestehenden. Somit kann auch auf die eingangs aufgeworfene Fragestellung der überfüllten Bildungspläne bereits eine Antwort gegeben werden.

### **3.1.2 Nanotechnologie in Wirt- und Wissenschaft**

*„Driven by the seemingly limitless applications, nanoscience and nanotechnology will revolutionize the industry.“* <sup>[20]</sup>

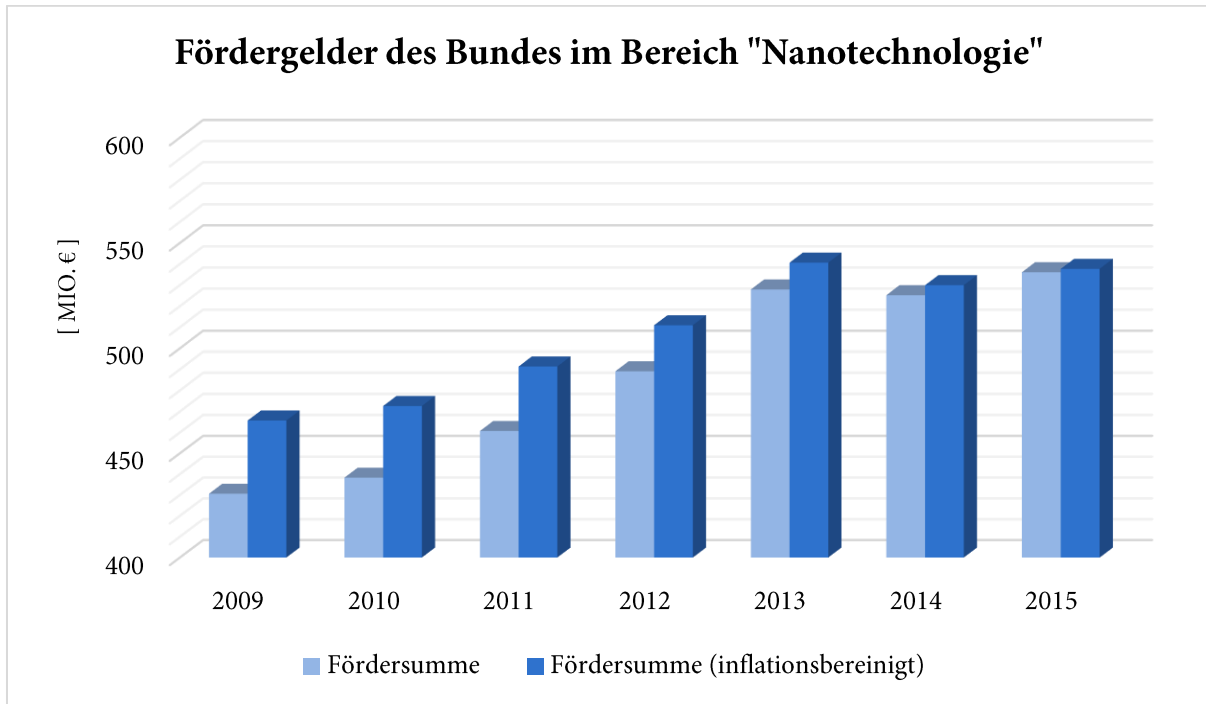
Nanotechnologie wird oftmals und aus einer Vielzahl an Gründen das Potenzial zugesprochen, das 21. Jahrhunderts entscheidend zu prägen. Im Folgenden wird aus den Perspektiven von Wirtschaft und Wissenschaft die Bedeutung von Nanowissenschaften und Nanotechnologie untersucht.

Die Nanowissenschaften sind ein Forschungsfeld, welches insbesondere im vergangenen Jahrzehnt ein starkes Wachstum erfahren hat. Ein Indikator für das wissenschaftliche Interesse sind die Fördergelder, die zur Erforschung dieser Technologie investiert wurden. Aktuelle Daten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung belegen eine stetig wachsende Förderung

---

<sup>4</sup> Im Folgenden durch „SuS“ abgekürzt.

durch Bundes- und Ländermitteln, welche seit 2009 um 25 % von 430 Mio. € auf 536 Mio. € angestiegen sind <sup>[21]</sup>. Damit bezieht sich der Anteil an den Gesamtausgaben im Bereich Forschung und Entwicklung auf 14 %, wodurch der Nanotechnologiesektor zu den innovativsten Technologiefeldern Deutschlands zählt (siehe Abbildung 1). Die Investitionen privater Unternehmen in Deutschland werden 2013 mithilfe einer Umfrage (konservativ) auf ca. 370 Mio. € geschätzt <sup>[22-26]</sup>.



**Abbildung 1 – Ausgaben des Bundes für Forschung und Entwicklung im Bereich Nanotechnologie in Millionen Euro <sup>[21]</sup>. Die Werte für 2014 und 2015 sind Soll-Werte. Die angegebenen Daten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurden für eine bessere Vergleichbarkeit inflationsbereinigt.**

Neben den bereitgestellten Forschungsgeldern kann weiterhin die Anzahl der Publikationen zu diesem Thema als Indikator herangezogen werden. Die Ergebnisse zu diesem Thema in der Suchmaschine SCIFINDER (siehe Abbildung 2) verdeutlichen das steigende Forschungsinteresse; im Jahr 2015 wurden knapp 200.000 Publikationen zu diesem Thema veröffentlicht und damit mehr als in den 14 Jahren von 1990 – 2003 insgesamt. Selbst unter Berücksichtigung der Tatsache, dass durch mehrere Faktoren die Anzahl der Veröffentlichungen insgesamt steigt <sup>[27]</sup>, bleibt der Trend klar erkennbar.

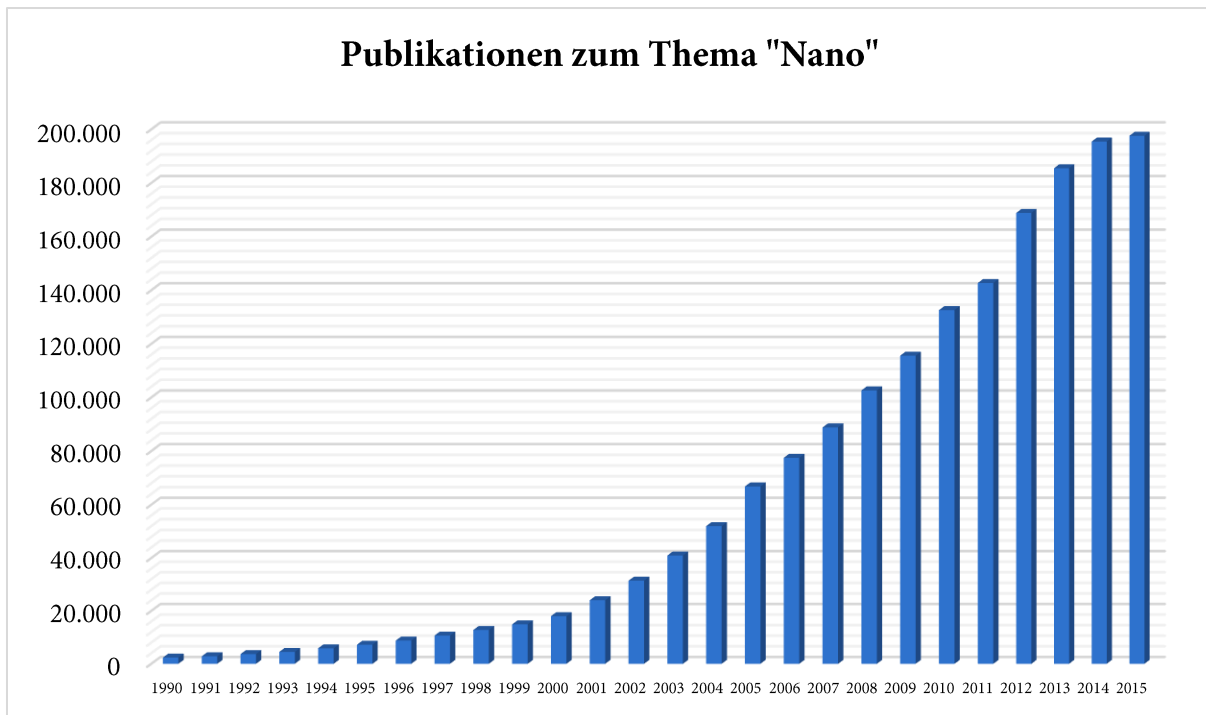


Abbildung 2 – Publikationen zum Thema „Nano“ in der Suchmaschine SciFinder.

Im internationalen Vergleich bekleidet Deutschland aktuell eine führende Rolle in der Entwicklung der Nanotechnologie. Hinsichtlich Publikationsdichte, Patentanmeldungen, Stärke der Netzwerke und wirtschaftlicher Umsatz ist es europaweit führend. Weltweit belegt es im Falle der Publikationen den vierten Platz (1. USA, 2. China, 3. Japan) und hinsichtlich der Patente Platz 3 (1. USA, 2. Japan) <sup>[28–30]</sup>. Unter Berücksichtigung dieser Daten ist die Nanotechnologie eine wichtige Säule für den Hochtechnologiestandort Deutschland.

Ebenso, wie die Nanowissenschaften als Querschnittstechnologie in der Forschung Einzug in die klassischen naturwissenschaftlichen Disziplinen (und einige interdisziplinäre Forschungsfelder) gehalten haben, umspannt analog dazu die Nanotechnologie eine Vielzahl an Branchen und Industrien. Insgesamt umfasst sie hierzulande (Stand 2014) ca. 1.800 Institutionen mit geschätzten 70.000 Mitarbeitern <sup>[31]</sup>; eine Tendenz, die seit Jahren stetig ansteigt. Die Verteilung der Anwendungsgebiete der verschiedenen Institutionen zeigt folgende Grafik:

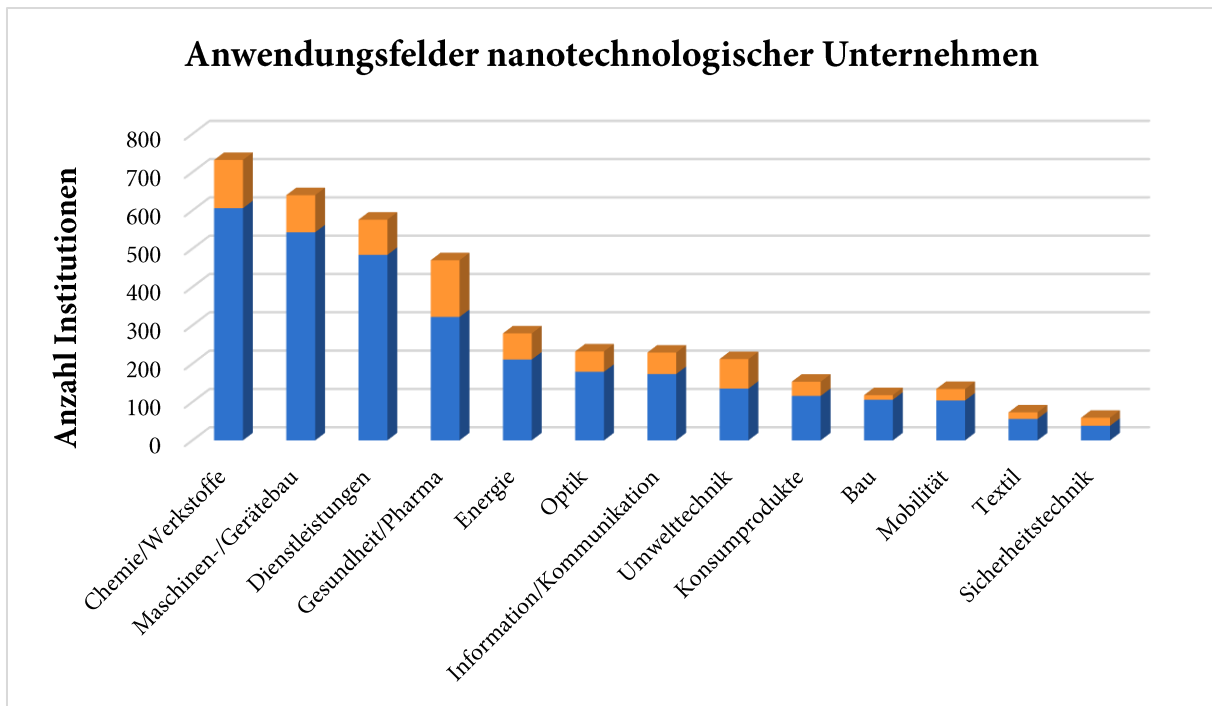


Abbildung 3 – Verteilung der Anwendungsfelder nanotechnologischer Unternehmen <sup>[32]</sup>. Die blauen Balken markieren den Stand im Juli 2012, die roten Balken das Wachstum seit diesem Zeitpunkt bis Januar 2016.

Besonders ausgeprägt ist die Bedeutung von Nanotechnologie im Bereich Werkstoffe und innovative Materialien, welcher unter anderem die Automobil- und Luftfahrtindustrie, den Maschinenbau sowie die Erzeugung optischer und elektronischer Erzeugnisse umfasst. In diesem verarbeitenden und produzierenden Gewerbe wurde laut den aktuellsten Zahlen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung ein Anteil von 28 % des Bruttoinlandsproduktes erwirtschaftet. Deutschland liegt damit im weltweiten Vergleich mit großem Abstand vor anderen Industrienationen, wie den USA, Großbritannien und Frankreich <sup>[31]</sup>. Das Beispiel dieser Branche soll stellvertretend für viele andere die Bedeutung von Innovationen aus dem Bereich Nanotechnologie für die exportorientierte, hochtechnologisch ausgerichtete Industrie in Deutschland verdeutlichen. Das weltweite Marktvolumen, welches Nanotechnologie zu beeinflussen vermag, wurde für das Jahr 2015 zwischen einer <sup>[33]</sup> und 1,375 Billionen Euro <sup>[31]</sup> geschätzt – zu diesem Markt kann weitere Erforschung und Förderung der Nanotechnologie einen weiterhin exzellenten Zugang ermöglichen und somit internationale Wettbewerbsfähigkeit in vielen technologischen und materialwissenschaftlichen Sektoren erhalten und ausbauen.

Ein limitierender Faktor für das weitere Wachstum ist allerdings der in den letzten Jahren deutlich gewordene Fachkräftemangel. Aufgrund der Vielfalt an Anwendungsfeldern, der wachsenden Anzahl an Unternehmen und der hohen Zukunftssicherheit bietet Nanotechnologie interessante Berufsperspektiven. Gemäß den Daten eines Branchenbarometers des Netzwerkes NANOBIONET <sup>[34]</sup> haben ungeachtet der Wirtschaftskrise der größte Teil (86 %) der befragten Unternehmen ihre Personalbestände unverändert belassen oder sogar erhöht – knapp 40 % planen auch für die Zukunft, weiter zu expandieren. Schwierig hingegen gestaltete sich die Suche nach Fachpersonal und die Rekrutierung verlief nach eigener Aussage für keines der befragten Un-

ternehmen unproblematisch. Umgekehrt halten es 40 % sogar für schwierig, geeignete Mitarbeiter einzustellen. In einer vergleichbaren europaweiten Studie von YAWSON fürchten dies sogar 68 % der Befragten, falls sich an der gegenwärtigen Ausbildung nichts ändert<sup>[7]</sup>. Wie bereits 2003 von ROCCO prognostiziert, droht sich folglich die mangelnde Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses als Flaschenhals für den Fortschritt der Nanotechnologie zu erweisen<sup>[35]</sup>; in neuen Prognosen für das Jahr 2020 hat er den ursprünglich veranschlagten Bedarf an Fachkräften von 2 Millionen Menschen weltweit auf 6 Millionen erhöht<sup>[36]</sup>.

Insgesamt unterstreichen die Untersuchungen aus wirt- und wissenschaftlicher Perspektive<sup>5</sup> einen Bedarf nach einer verstärkten Nanoscience Education. Die Forschungsergebnisse aus den Nanowissenschaften und die entsprechenden Innovationen der Nanotechnologie sind tragende Säulen des Hochtechnologiestandorts Deutschland und von signifikanter Bedeutung für den Erhalt von internationaler Wettbewerbsfähigkeit. Besonders deutlich wird die Relevanz der Nanoscience Education allerdings im Zusammenhang mit dem Fachkräftemangel; an dieser Stelle bietet sie Chancen, einerseits Qualifikationslücken zu vermeiden und andererseits jungen Menschen interessante und zukunftsichere Berufsperspektiven aufzuzeigen.

### 3.1.3 Nanotechnologie in unserer Gesellschaft

Nanotechnologie umfasst viele Bereiche des Alltags; die Anwendungsgebiete sind vielfältig und reichen von Wandfarben und Lacken, Kunststoffen, Silicium-Solarzellen über eine Vielzahl an Gebrauchsgegenständen wie Tennisschlägern, Schuhsprays, Funktionsbekleidung und Autokatalysatoren bis hin zu Kosmetikprodukten wie Sonnencremes, Zahnpasta und Lebensmitteln wie Rieselhilfen in Kochsalz. Aufgrund dieser Tatsache ergeben sich für den allergrößten Teil der Bevölkerung im alltäglichen Leben viele Berührungspunkte.

Im vorherigen Abschnitt wurde vor allem auf die hohe wissenschaftliche und ökonomische Bedeutung von Nanotechnologie hingewiesen; in diesem Abschnitt soll hinzugefügt werden, dass trotz des hohen prognostizierten Nutzens der Einsatz von relativ jungen Technologien Risiken bergen kann. Viele politische und rechtliche Regulatorien, beispielsweise die Kosmetik- und Lebensmittelverordnungen, waren in den vergangenen Jahren nur sehr bedingt geeignet<sup>6</sup>, den Einsatz von „Nano“-Innovationen sinnvoll und sicher zu beurteilen. In vielen Fällen konnten aufgrund der kurzen Einsatzzeit noch keine Langzeitstudien zum bedenkenlosen Einsatz oder entsprechenden Grenzwerten vollendet werden; zudem lag bis zum Oktober 2011 schlicht keine rechtsverbindliche Definition vor, welche Materialien überhaupt als „Nanomaterial“ gelten.

---

<sup>5</sup> Die dargelegten Resultate in diesem Abschnitt präsentieren nur einige ausgewählte Informationen über die Lage der Nanotechnologie in Deutschland. Ein ausführlicher Überblick findet sich in den regelmäßigen Reporten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, insbesondere den nano.DE-Reporten<sup>[23, 26, 37]</sup>, den Aktionsplänen Nanotechnologie 2010<sup>[24]</sup> und 2015<sup>[25]</sup> sowie weiteren Veröffentlichungen<sup>[31]</sup>.

<sup>6</sup> Beispielsweise galt bei den genannten zwei Verordnungen der Grundsatz, dass in nicht nanoskaliger Form zugelassene Materialien auch in nanoskaliger Form ohne weitere Prüfung eingesetzt werden durften. Erst in den letzten Jahren wurde durch großen Verbraucherdruck zudem eine Kennzeichnungspflicht für Nahrungsmittel und Kosmetika beschlossen.



Zahlreiche nationale und europäische Expertengruppen, wie die NANOKOMMISSION DER BUNDESREGIERUNG oder das SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS teilen diese Ansicht und bescheinigten dem gegenwärtigen regulatorischen Instrumentarium ein erhebliches Verbesserungspotenzial <sup>[38-40]</sup>.

Diesen vielen Berührungspunkten im Alltag einerseits und den gesundheitlichen Unsicherheiten andererseits steht ein eher rudimentäres Wissen der Verbraucher gegenüber <sup>[40]</sup>. Eine Studie der VERBRAUCHERZENTRALE BUNDESVERBAND E.V. in Deutschland und der Schweiz hat im Jahr 2008 <sup>[41]</sup> gezeigt, dass Verbraucherinnen und Verbraucher ihr Wissen als „gering“ einstufen und darüber hinaus große Schwierigkeiten hatten, Nanotechnologie zu definieren. Zwar konnten sie im Durchschnitt 7 – 8 Anwendungsgebiete nennen, allerdings waren die Mehrzahl der genannten Produkte eher selten im Alltag zu finden (bspw. „eine Krebstherapie mit eisenhaltigen Nanopartikeln“). Eine Vergleichsstudie aus dem Jahr 2011 zeigte darüber hinaus, dass die Qualität des Wissens im Zeitraum nach der letzten Studie insgesamt „deutlich“ zurückgegangen sei. Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer wüssten weniger, und was sie wissen, sei weniger präzise, formulieren die Autoren <sup>[42]</sup>. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt auch eine große Umfrage auf gesamter europäischer Ebene (EUROBAROMETER) der EUROPÄISCHEN KOMMISSION <sup>[43]</sup>.

Auf der anderen Seite ist die generelle Einstellung der Verbraucherinnen und Verbraucher gegenüber „Nano“ positiv – 64 % befürworten den Einsatz, nur 5 % geben eine negative Einstellung an. Eine Ursache hierfür wird in der generellen „Pro-Innovation“-Einstellung der Bevölkerung gesehen. Allerdings ist diese Befürwortung insbesondere bei „Nano“ an Bedingungen geknüpft: Gefordert wird nicht nur ein verantwortungsvoller, transparenter Umgang mit Risiken, sondern auch ein breites und einfach verständliches Informationsangebot <sup>[41]</sup>.

Bemerkenswert ist an dieser Stelle die Rolle des naturwissenschaftlichen Unterrichts als Wissensquelle; nur etwa 5 % der Befragten nannten „Schulen“ als Informationsquelle zu diesem Thema <sup>[42]</sup>. Mehr als die Hälfte (55 %) der Teilnehmer war 44 Jahre alt oder jünger, sodass an dieser Stelle der in den Kerncurricula <sup>[44]</sup> vermerkte Anspruch des naturwissenschaftlichen Unterrichts, relevante technische Prozesse und Entwicklungen abzubilden sowie unter gesellschaftlichen Fragestellungen zu analysieren und zu bewerten, kritisch hinterfragt werden muss. Die Umfrageergebnisse verdeutlichen, dass die „gesellschaftliche Kommunikation und Meinungsbildung über technische Entwicklungen und Forschung“ <sup>[44]</sup> zumindest für Fragen im Zusammenhang mit der Nanotechnologie nur sehr eingeschränkt möglich ist.

Aus diesen Ergebnissen kann also auch aus gesellschaftlicher Sicht ein Bedarf nach einer Nanoscience Education abgeleitet werden; in der fachdidaktischen Literatur finden sich darüber hinaus ähnliche Forderungen <sup>[8]</sup>. Im Bewusstsein, dass Nanotechnologie bereits fest im Alltag vieler Menschen verankert ist, sollte auch aufgrund der möglichen Sicherheitsbedenken ein entsprechendes (Grund-)Wissen zu dieser Thematik im naturwissenschaftlichen Unterricht aufgenommen und reflektiert werden. Eine solche Intervention kann einer weiteren Wissensabnahme effektiv entgegenwirken. Zukünftig würde sie einem größeren Teil der Bevölkerung eine aktive Teilhabe am gesellschaftlichen Diskurs ermöglichen sowie gleichzeitig das Wissen verleihen, nanotechnologische Produkte bewusst und reflektiert zu nutzen – oder auch nicht.

Abschließend wird an dieser Stelle aus den vier Perspektiven Bildungssystem, Wirt- und Wissenschaft sowie Gesellschaft ein Bedarf nach einer Nanoscience Education deutlich. In den folgenden Kapiteln soll nun untersucht werden, in welchem Ausmaß nanotechnologische Inhalte bereits Einzug in non-formale, semi-formale und formale Bildungsangebote gehalten haben.

### 3.2 Bildungsinitiativen zur Nanotechnologie<sup>7</sup>

Während der Fortschritt nanotechnologischer Entwicklungen in wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Bereichen in Deutschland systematisch erfasst wird<sup>[23]</sup>, werden diese im Bildungsbereich weniger systematisch erhoben und ausgewertet. Eine solche Übersicht über den Status Quo der Nanoscience Education in Deutschland ist für die Zielsetzung dieser Arbeit jedoch von großer Bedeutung, um so punktgenau wie möglich hieran anknüpfen zu können. Diese Überlegung ist natürlich insbesondere gültig für formale Bildungszusammenhänge (schulische Bildung), aber ebenso wichtig im Hinblick auf die Ausbildung von Lehrkräften sowie non-formale Bildungszusammenhänge (Bildungsinitiativen und Schülerlabore). Letztere können aufgrund ihrer besonderen Ausgangssituation abseits der curricularen Bindung über die didaktische Erschließung forschungsnaher Themengebiete als Katalysator für den Transfer in die formale Bildung fungieren. Aus diesen Gründen soll im Folgenden ein Überblick über die bereits vorhandenen formalen und non-formalen Bildungsangebote einer Nanoscience Education gegeben werden.

Im deutschsprachigen Raum hat sich in den letzten Jahren nicht zuletzt aufgrund des Fachkräftemangels und der wirtschaftlichen Relevanz verstärkt ein Bewusstsein für die Notwendigkeit entwickelt, die Vermittlung von Nanotechnologie zu unterstützen. Wie bereits in Kap. 3.1.2 angesprochen, wurde die Erforschung von Nanotechnologien im Jahr 2015 mit 536 Mio. € aus Bundesmitteln gefördert<sup>[21]</sup>. Neben der Forschung wurden zudem auch diverse außerschulische Bildungsangebote finanziert, von denen die bekanntesten Angebote im Folgenden vorgestellt werden sollen.

#### 3.2.1 Mobile Ausstellungen

##### **nanoTruck**

Das BMBF schuf mit dem NANOTRUCK ein mobiles Ausstellungs- und Kommunikationszentrum, das auf zwei Ebenen vielfältige Nanotechnologien präsentierte (siehe Abbildung 4)<sup>[45]</sup>. Schulen konnten den Truck dabei zu eigenen Veranstaltungen einladen. An Bord waren über sechzig Ausstellungsobjekte, Multimedia-Terminals und eine Laborfläche, wobei die Vermitt-

---

<sup>7</sup> Die Inhalte der Kapitel 3.2-3.3 wurden teilweise bereits vom Autor in dem Fachbuch GLOBAL PERSPECTIVES OF NANOSCIENCE AND ENGINEERING EDUCATION veröffentlicht<sup>[1]</sup>. Mit freundlicher Genehmigung der Verlage (siehe Anhang A4.1) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

lung von Wissen zur Nanotechnologie sowie die beruflichen Ausbildungsmöglichkeiten im Mittelpunkt standen. Der Nanotruck beinhaltete im Einzelnen diverse Themenstationen mit Exponaten; Tabelle 1 stellt eine Auswahl der vorgestellten Themengebiete dar.

Tabelle 1 – Ausgewählte Themenfelder des NANOTRUCKS

<b>Ausgewählte Themenfelder des NANOTRUCKS</b>	
Materialien	Nanokeramikpulver, CarbonNanoTubes, kolloidales Gold, Ferrofluide
Sport & Freizeit	Leichteres und leistungsfähigeres Sportequipment
Architektur	Brandschutz, Dämmstoffe, Hochleistungsbaustoffe
Gesundheit	Neue Diagnosesysteme, Tumorbehandlung mit Nanoteilchen
Textilien	„Easy-to-clean“-Stoffe (wasser- und schmutzabweisend), antimikrobielle (Funktions-)Kleidung
Informatik	Verbesserte Informationsverarbeitung, Speichermedien mit großer Informationsdichte
Mobility	Reduktion von Kraft- und Schadstoffen, Kratzfestlacke

Im Zuge der Deutschland-Tour des Trucks bot das BMBF zudem in Kooperation mit dem Verein SCHULEN ANS NETZ regelmäßige Workshops für Lehrkräfte an, um diese bei der Unterrichtsvorbereitung zum Thema zu unterstützen. Nach einer Projektlaufzeit von 10 Jahren und über einer Million Besuchern wurde das Projekt NANOTRUCK am 31.03.2015 beendet, inwieweit es ein Folgeprojekt geben wird, ist derzeit nicht abzusehen.

**nanotruck**  
Treffpunkt Nanowelten



Abbildung 4 – NANOTRUCK-Projekt des BMBF <sup>[46]</sup>

### Nanoshuttle

Weitere Facetten von Nanotechnologie konnten in den vergangenen drei Jahren über 40.000 SuS an den Schulen untersuchen, an denen das NANOSHUTTLE (siehe Abbildung 5) zu Besuch

war<sup>[47]</sup>. Das NANOSHUTTLE ist mit verschiedenen Hightech-Mikroskopen und Experimentiermaterialien ausgestattet und der Besuch eines eigens konzipierten, mobilen Nanolabors ist für Schulen kostenfrei. Es ermöglicht den SuS, sich einerseits über diese Zukunftstechnologie zu informieren und andererseits an den Experimentierstationen selbst aktiv werden. Dabei ist das NANOSHUTTLE jedoch nur als regionales Angebot in Bayern zugänglich. Neben Versuchen, gezielt Oberflächeneigenschaften einzustellen, liegt ein großer Schwerpunkt darin, mit geeigneten Mikroskopen die Welt der Nanoteilchen bzw. der Nanoemulsionen sichtbar zu machen.



Abbildung 5 – NANOSHUTTLE-Projekt der Nanoinitiative Bayern<sup>[48]</sup>.

### 3.2.2 Schülerlabore

Das Themengebiet „Nano“ wird aufgrund seiner Aktualität zurzeit von mehreren Schülerlaboren schwerpunktmäßig aufgegriffen. Ein Beispiel ist das EVONIK-SCHÜLERLABOR NORDRHEIN-WESTFALEN der Universität Duisburg-Essen. In einem Tageskurs „Winzige Welten“ führen die SuS technische Experimente unter „annähernd professionellen Bedingungen“ durch und erfahren Bezüge zur aktuellen naturwissenschaftlichen Forschung. Die Experimentierreihen umfassen Physik, Chemie und Ingenieurwissenschaften<sup>[49]</sup>.

Ein weiteres Beispiel ist das KLICK!LABOR des IPN in Kiel, welches den SuS methodische und experimentelle Zugänge zu dem Themenfeld „Nano“ anbietet. Die Teilnehmenden können somit moderne Charakterisierungsmethoden kennenlernen, den Durchmesser nanoskaliger Schichten berechnen (am Beispiel einer Seifenblase) und chemische Schalter exemplarisch untersuchen (siehe Abbildung 6)<sup>[50]</sup>.



Abbildung 6 – KLIICK!LABOR der Kieler Forschungswerkstatt am IPN Kiel <sup>[50]</sup>

Zuletzt zu erwähnen sind noch die Schülerlabore der Universitäten Göttingen und Hildesheim (in Kooperation mit Oldenburg und dem IPN Kiel), welche seit Juni 2016 im Rahmen des NANOBINE-Projektes <sup>[19]</sup> die Themenfelder „Nanotechnologie“ und die Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) verknüpfen. Gegenstand des Projektes ist die Entwicklung von Schülerlaborkonzepten, die aktuelle Forschungsfragen im Themenfeld der Nanowissenschaften und –technik mit Fragen gesellschaftlicher Zukunftsgestaltung verbinden und dafür Kriterien einer BNE heranziehen <sup>[51]</sup>. Beispiele für experimentelle Themen sind etwa die toxische Wirkung von Nanopartikeln auf Mikroorganismen sowie die Bewertung des Einsatzes von Silber-Nanopartikeln unter Aspekten der Umwelt und Nachhaltigkeit. Eine genauere Beschreibung erfolgt in Kap. 7.3.2.5.

Darüber hinaus werden weiterhin Inhalte unter anderem an dem

- NANOBIO LAB (Universität des Saarlandes) <sup>[52]</sup>
- CENTRUM FÜR NANOANALYTIK (Universität des Saarlandes) <sup>[53]</sup>
- MACH-MIT-LABOR-BIOTECHNOLOGIE (Universität des Saarlandes) <sup>[54]</sup>
- SINNTEC-SCHÜLERLABOR (Universität des Saarlandes) <sup>[55]</sup> und dem
- EMULSIONEN UND MAKROMOLEKÜLE LAB (Universität Ulm) <sup>[56]</sup>

angeboten.

### 3.2.3 Experimentierkoffer, Websites und Unterrichtsmaterialien

2001 hat der VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE das Programm „Schulpartnerschaft Chemie“ begründet, in dessen Rahmen die naturwissenschaftliche Bildung an den Schulen im Bereich des Chemieunterrichts gefördert wird <sup>[57]</sup>. Durch die Gründung eines Fonds, der seit seinem Start über 25 Mio. € in die Säulen Unterricht, Lehrer und Schüler investiert hat, wird insbesondere der experimentelle Unterricht gefördert. Maximal 5.000,- € können allgemeinbildende Schulen in Deutschland erhalten, an denen Chemie unterrichtet wird, um sich geeignete Unterrichtsmaterialien zu kaufen <sup>[58]</sup>. Ein Beispiel für auf diese Weise geförderte Unterrichtsmaterialien ist die NANOSCHOOLBOX <sup>[59]</sup>. Die ADVANCED MATERIAL SCIENCE GMBH, die bereits mit dem KOSMOS Verlag in Stuttgart einen Nanotechnologie-Experimentierkoffer für Kinder herausge-



bracht hat, stellt diese speziell für den Unterricht an Schulen her. Der Experimentierkoffer enthält 14 Experimente, die die Nanotechnologie begreifbar machen. Die Versuche wurden dabei für den Chemie- und Physikunterricht ab Klassenstufe 9 konzipiert und können von den SuS im Rahmen von Schülerpraktika oder Arbeitsgemeinschaften selbstständig durchgeführt werden. Eine ausführliche Broschüre bietet genaue Anleitungen zu den Experimenten und zu einer optimalen Vorbereitung. Die meisten der Versuche wurden in kleinen Filmen festgehalten, die die Versuchsdurchführung, die Ergebnisse und die dahinterliegenden Effekte erklären und auf der zugehörigen Website ([www.nanoschoolbox.de](http://www.nanoschoolbox.de)) abgerufen werden können.

Mit der Bereitstellung einer kostenfreien NanoBoX<sup>[60]</sup> bietet der FONDS DER CHEMISCHEN INDUSTRIE (FCI) einen Einstieg in das Thema Nanotechnologie. Strukturiertes didaktisches Material (Textheft und CD-ROM) vermittelt die Grundlagen ebenso wie die Anwendungen der chemischen Nanotechnik. Zuletzt sind Anschauungsmodelle, die für einfache Schulexperimente genutzt werden können, ebenfalls in der Box zu finden. Aktuell erschienen an der Universität Ulm ist zudem ein Experimentierkoffer zum Thema Nanotechnologie mit Experimenten in den Bereichen "Nano auf Oberflächen", "Nano bei Farben", "Nano in der Medizin" und "Nano im Alltag". Zielgruppe ist hauptsächlich die Oberstufe<sup>[56]</sup>. Abbildung 7 zeigt die drei genannten Experimentiersets bzw. -koffer.



Abbildung 7 – NanoSchoolBox<sup>[59]</sup> (links), NanoBoX<sup>[61]</sup> (Mitte) und Experimentierkoffer zur Nanotechnologie<sup>[56]</sup> (rechts).

Ergänzend zu diesen Unterrichtsangeboten finden sich im Internet Unterrichtsmaterialien, die Lehrer für ihren Unterricht verwenden können. Die VDI Technologiezentrum GmbH bietet beispielsweise auf einer eigens geschaffenen Internetseite [www.nanoreisen.de](http://www.nanoreisen.de) eine „Reise in die Nanowelt“ an. In interaktiven Flash-Animationen können hier die Themenfelder „Menschlicher Körper“, „Elektronik“ sowie „Optik“ erkundet werden.

Die angeführten Beispiele belegen, dass das Thema „Nanotechnologie“ bereits seit einigen Jahren in vielen außerschulischen Bildungsinitiativen aufgegriffen wird. Es existieren bislang allerdings keine vergleichenden und flächendeckenden empirischen Untersuchungen über Einfluss,

Reichweite und Nachhaltigkeit dieser Projekte. Einige Initiativen, wie etwa das NANOSHUTTLE, sind zudem ausschließlich regional zugänglich.

Ob diese Angebote folglich alleine genügen, einen Effekt auf den dem bereits erwähnten Fachkräftemangel entgegen zu wirken und das Themengebiet Nanoscience Education systematisch in die naturwissenschaftliche Aus- und Weiterbildung zu implementieren, bleibt vorläufig offen. Gleichzeitig wird hier auch der Nutzen einer Verankerung von Nanotechnologie in den formalen Bildungsbereichen deutlich. BYBEE<sup>[62]</sup> und FALK et al.<sup>[63]</sup> betonen in diesem Zusammenhang, dass formale und non-formale Bildungsangebote nicht als Konkurrenz zu sehen sind; vielmehr komplementieren sie sich gegenseitig und eine effiziente unterrichtliche Implementierung kann nur gelingen, wenn sich beide Seiten sinnvoll ergänzen.

### 3.3 Nanotechnologie im formalen Bildungsbereich

Nach der Untersuchung des non-formalen Bildungsbereiches soll im nun folgenden Kapitel dargestellt werden, wie eine Nanoscience Education bereits im formalen Bereich, d.h. in schulischen Curricula, aber auch in den Programmen der Hochschulen, reflektiert wird. Sind nanotechnologische Inhalte bereits flächendeckend verbreitet – und wenn ja, welche? Existieren an Hochschulen bereits entsprechende (Teil-)Module oder Inhalte – insbesondere in der Lehrerbildung? Diese Fragen sollen nachfolgend untersucht werden unter der Zielsetzung, einen entsprechenden Bedarf oder etwaige Anknüpfungspunkte für die weitere Arbeit zu identifizieren.

#### 3.3.1 Nano-Studiengänge in Deutschland

Ziel des deutschen Aktionsplans „Nanotechnologie 2015“ ist es, Studienangebote zu initiieren, diese transparent zu machen und zu deren Attraktivität beizutragen, so lautet es im Bericht des Bundesministeriums für Bildung und Forschung<sup>[37]</sup>. Mittlerweile existieren über 30 interdisziplinär ausgerichtete Nano-Studiengänge in Deutschland, unter denen sich konsekutive Bachelor- und Masterstudiengänge (12), grundständige Bachelorstudiengänge (7) und Masteraufbaustudiengänge (11) befinden<sup>[64]</sup>.

Allgemein lässt sich die Tendenz feststellen, dass einerseits naturwissenschaftlich ausgerichtete Nano-Studiengänge angeboten werden und andererseits solche, die stärker ingenieurtechnisch orientiert sind<sup>[37]</sup>. Erstere sind meist auf die Grundlagenforschung spezialisiert, wie der Masterstudiengang „Nanowissenschaften“ an der Universität Bielefeld, in welchem die experimentelle und theoretische Physik Schwerpunkte darstellen. Ein grundlagenorientierter Bachelorstudiengang wird beispielsweise von der Fachhochschule Iserlohn angeboten. Der Fokus in dem Studium „Bio- und Nanotechnologien“ liegt auf der Umwelttechnik, der Nano- und Oberflächentechnik sowie der Biotechnologie<sup>[64]</sup>.

Die ingenieurtechnischen Nano-Studiengänge hingegen sind oftmals anwendungsorientiert und bieten Praxissemester in verschiedenen Unternehmen an. So lernen Studierende der Fachhochschule Nürnberg im Studiengang „Neue Materialien, Nano- und Produktionstechnik“

Werkstoffsysteme, Produktionsverfahren und Verfahren zur Herstellung neuer Werkstoffe kennen und übertragen die Erkenntnisse aus dem Labormaßstab in die Produktion<sup>[64]</sup>. Ein weiteres Beispiel eines anwendungsorientierten Studienganges ist an der Universität Ulm zu finden, an welcher ein Master of Science in „Advanced Materials“ erworben werden kann<sup>[64]</sup>. In diesem Programm lernen Studierende Nanofunktions- und Biomaterialien kennen und können am Ulmer Zentrum für Mikro- und Nanomaterialien Top-Down und Bottom-Up Strukturierungsmethoden sowie Lithografiertechniken praktisch anwenden<sup>[64]</sup>.

Diese Beispiele zeigen, dass die angebotenen Nano-Studiengänge in ihrer Ausrichtung sowie ihrer inhaltlichen Struktur stark variieren. Einige sind grundlagen- andere anwendungsorientiert, wiederum andere sind eine Mischung aus beidem; meist werden dabei im Bachelor Grundlagen vermittelt, während im Master Anwendungsbezüge hergestellt werden. Das Spektrum reicht von den traditionellen Naturwissenschaften bis hin zur Elektronik, der Umwelttechnik oder dem Maschinenbau. Die Fülle an inhaltlich völlig unterschiedlichen Studienrichtungen spiegelt die Branchenvielfalt wider, die typisch für den Nanosektor ist<sup>[37]</sup>. Eine Übersicht über die Bildungslandschaft „Nano“ aufgeschlüsselt nach Bundesländern befindet sich in Tabelle 2.

**Tabelle 2 – Anzahl an eigenständigen Nano-Studiengängen sowie Anzahl an Fachhochschulen und Universitäten, die nanotechnologische Inhalte in Vorlesungen oder Seminaren anbieten. Die Darstellung erfolgt pro Bundesland. Für die Länderkürzel siehe Abkürzungsverzeichnis. Der Datensatz basiert auf Angaben des VDI Technologiezentrums, gefördert vom BMBF<sup>[65]</sup>.**

### Übersicht über Nano-Studiengänge geordnet nach Bundesländern

	Baden-Württemberg	Bayern	Berlin/ Brandenburg	Niedersachsen/ Bremen	Hamburg/ Schleswig-Holstein	Hessen	Mecklenburg-Vorpommern	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Saarland	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Thüringen
<b>Eigenständige Studiengänge</b>	3	6	0	4	1	1	0	7	2	1	4	0	1
<b>Universität</b>	20	25	8	23	17	22	2	41	4	5	28	1	5
<b>Fachhochschule</b>	5	8	4	6	3	4	1	11	1	1	2	3	0

Aus der Tabelle geht hervor, dass neben den interdisziplinären Studiengängen auch nanospezifische Vorlesungen und Seminare an Universitäten und Fachhochschulen besucht werden können. Diese sind auf vielfältige Art und Weise in die traditionellen Studiengänge integriert. Unter anderem können Nano-Sommerkurse, Angebote im Optionalbereich oder Module, die der Spezialisierung im Master dienen, absolviert werden. Die Seminare und Kurse werden je nach Universität und thematischer Ausrichtung an verschiedenen Fakultäten angeboten<sup>[65]</sup>. Aus diesem Grund beläuft sich die Anzahl an Studiengängen, die nanospezifische Schwerpunkte setzen laut Angaben des Verbands Deutscher Ingenieure (VDI) auf 250, wovon 49 an Fachhochschulen und 201 an deutschen Universitäten angesiedelt sind<sup>[65]</sup>. Anhand dieser Zahlen lässt sich zeigen, dass



die Mehrheit der Hochschulen eher dazu tendiert, Nano-Module in bestehende naturwissenschaftliche und ingenieurtechnische Studiengänge zu integrieren. Scheinbar ist ein Großteil der deutschen Bildungsangebote (250) nach dem „T Approach“ (Abbildung 8, Mitte) strukturiert, während bislang nur 30 interdisziplinär ausgerichtete Nano-Studiengänge entstanden sind („Inverted T Approach“, siehe Abbildung 8, rechts) <sup>[20]</sup>. Dies kann als Folge der Ressourcenaufwendung interpretiert werden, die wesentlich geringer ausfällt, wenn nanorelevante Inhalte in bestehende Studiengänge eingeführt werden.

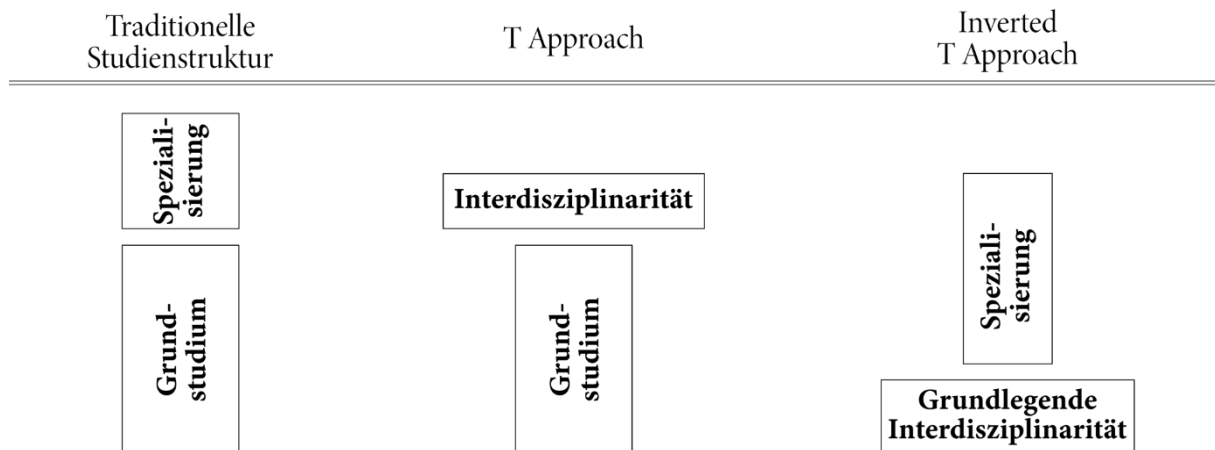


Abbildung 8 – Vergleich der Struktur exemplarischer Studiengänge nach DEPPERT ET AL. <sup>[20]</sup>; traditionelle Struktur (links), Aufbau, dem T Approach (Mitte) und Inverted T Approach (rechts).

Aus der Tabelle 2 geht zudem hervor, dass die Nano-Infrastruktur besonders gut in den westdeutschen Bundesländern ausgebildet ist, wie etwa in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen (NRW). Letzteres offeriert das größte Angebot an Lehraktivitäten: NRW bietet die meisten interdisziplinären Nano-Studiengänge an (7) und besitzt eine große Dichte an naturwissenschaftlichen und technischen Programmen mit Nano-Inhalten (52). Sachsen lässt unter den neuen Bundesländern ebenfalls eine umfassende Nano-Bildung auf Hochschulebene erkennen. Im Vergleich aller Bundesländer befindet es sich auf Platz drei hinter NRW und Bayern. Dahingegen findet sich in Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Brandenburg und Berlin kein eigener Nano-Studiengang. In diesen Bundesländern können Studierende lediglich Vorlesungen und Seminare zur Nanotechnologie besuchen, wobei auch dieses Angebot sehr übersichtlich strukturiert ist. In Rheinland-Pfalz, Thüringen und im Saarland ist die Dichte an Bildungsangeboten ebenfalls gering, allerdings sind dort eigenständige Nano-Studiengänge vorzufinden.

Regionale Besonderheiten gibt es an der Universität Stuttgart. Dort wird seit dem Wintersemester 2010/2011 der Studiengang „Nano- und Optoelektronik“ als Teilzeitstudium angeboten <sup>[37]</sup>. Auch an der Technischen Universität Kaiserslautern kann über zwei Semester „Nanobiotechnologie“ berufsbegleitend studiert werden. Dieses Programm ist an Beschäftigte der Nano- und Biotechnologiebranche adressiert und dient als Weiterbildung, die mit einem Zertifikat abgeschlossen werden kann <sup>[37]</sup>.

Weiterhin werden in Deutschland fünf internationale, englischsprachige Promotionsstudiengänge angeboten <sup>[66]</sup>. Auch Post-Doktoranden können seit 2002 durch das BMBF im Rahmen des Nachwuchswettbewerbs NANOFUTUR gefördert werden. Durch NANOFUTUR werden exzellente Nachwuchswissenschaftler unterstützt, innovative Projekte mit Hilfe eines eigenen Arbeitskreises zu gestalten und anwendungsorientiert zu forschen. Die Ideen und Produkte, die entstehen, sollen dabei für die Industrie von Nutzen sein. So können die Teilnehmenden neben der wissenschaftlichen Forschung Erfahrungen im Bereich Projektmanagement und Personalführung sammeln, was später im Beruf von Relevanz ist. Die Fördermaßnahme scheint durchaus erfolgreich zu sein; von insgesamt 29 Post-Doktoranden haben laut BMBF anschließend 13 einen Ruf auf eine Professur erhalten. Außerdem sind fünf neue Start-up-Unternehmen gegründet worden. 2011 wurde die Maßnahme erweitert und trägt den Namen „NANOMATFUTUR“. Neben der Nanotechnologie werden nun auch Projekte gefördert, die die Werkstofftechnologie und Chemie einschließen <sup>[37]</sup>.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich in der BRD ein deutlich heterogenes Bild an Nano-Bildungsstandorten abzeichnet, welches CEBULLA ET AL. <sup>[67]</sup> mit der hohen Dichte an Hochschulen sowie mit der starken Industrie begründen, die in den westdeutschen Bundesländern vorhanden sind. Außerdem ist das Angebot an den Fachhochschulen weniger stark ausgebildet als an Universitäten. Die Autoren identifizieren diesen Bereich daher als „white spot“, also als vorhandene Lücke. An diesen Stellen könnte zukünftig noch stärker interveniert werden, da besonders an diesen Institutionen schon frühzeitig Praxisbezüge hergestellt werden.

Auch scheint, dass bislang trotz Forderung des BMBF wenig Transparenz gegeben ist, um die verschiedenen Nano-Studiengänge in ihrer interdisziplinären Ausrichtung unterscheiden zu können. Eindeutig ist, dass alle Curricula multidisziplinär sind, da sie Module und Grundlagveranstaltungen verschiedener Fächer beinhalten. Inwieweit diese aber inhaltlich und thematisch aufeinander abgestimmt und miteinander verknüpft sind, ist schwierig zu erheben <sup>[66]</sup>. Auch die detaillierte Profilbeschreibung der Studiengänge durch den VDI ermöglicht primär einen Vergleich des Angebots hinsichtlich der inhaltlichen Orientierung. Analysen von DEPPERT ET AL. <sup>[20]</sup> ergaben, dass lediglich an den Universitäten Kassel sowie Duisburg-Essen ein interdisziplinäres Nano-Studium absolviert werden kann, welches auf Grundlage des „Inverted T Approach“ (siehe oben) strukturiert wurde. Dahingegen folge der Nano-Studiengang „Nanostrukturtechnik“ der Universität Würzburg beispielsweise eher einem traditionellen Aufbau.

Im Zusammenhang mit der Zielsetzung dieser Arbeit ist allerdings insbesondere zu beachten, dass die in diesem Kapitel aufgeführten Inhalte der Nanotechnologie bislang nahezu exklusiv in den fachwissenschaftlichen Studiengängen verortet sind <sup>[68]</sup>. Entsprechende Themen in der Lehramtsausbildung konnten hingegen in den Modulbeschreibungen der lehrerbildenden Universitäten in Deutschland nur in Einzelfällen gefunden werden; eine Ausnahme ist allerdings das KLICK!LABOR der KIELER FORSCHUNGSWERKSTATT (IPN Kiel) <sup>[50]</sup>. Insbesondere im Hinblick auf die zu erwartende Rolle von Nanotechnologie in den nächsten Jahrzehnten sollte dieses Themengebiet verstärkt in die Lehramtsausbildung aufgenommen werden. Die bisherigen Ergebnisse verdeutlichen, dass dies eher früher denn später geschehen sollte, um Wissenslücken und damit potenzielle Barrieren für eine unterrichtliche Behandlung zu vermeiden.

### 3.3.2 Nanotechnologie in Schulcurricula

Deutschland befindet sich im Aufbruch, was die Vermittlung von Wissen im Bereich Nanotechnologie in der Schule betrifft. Allerdings wird die wirt- und wissenschaftliche Bedeutung dieser Technologie in den aktuellen Lehrplänen deutscher Schulen noch nicht adäquat berücksichtigt (siehe Kap. 3.1.2). Zwar werden in den „klassischen“ naturwissenschaftlichen Fächern Chemie, Physik und Biologie in einigen Fällen einzelne Themenbereiche der Nanotechnologie unterrichtet – ein übergeordnetes Konzept ist aber noch nicht erkennbar. Insgesamt ist in den vergangenen Jahren seit Beginn des Dissertationsprojektes jedoch eine zunehmende Aufnahme des Themengebietes in vielen Bundesländern zu beobachten – erst kürzlich (August 2016) hat etwa Schleswig-Holstein das Themengebiet ebenfalls in die finale Fassung der Fachanforderungen aufgenommen.

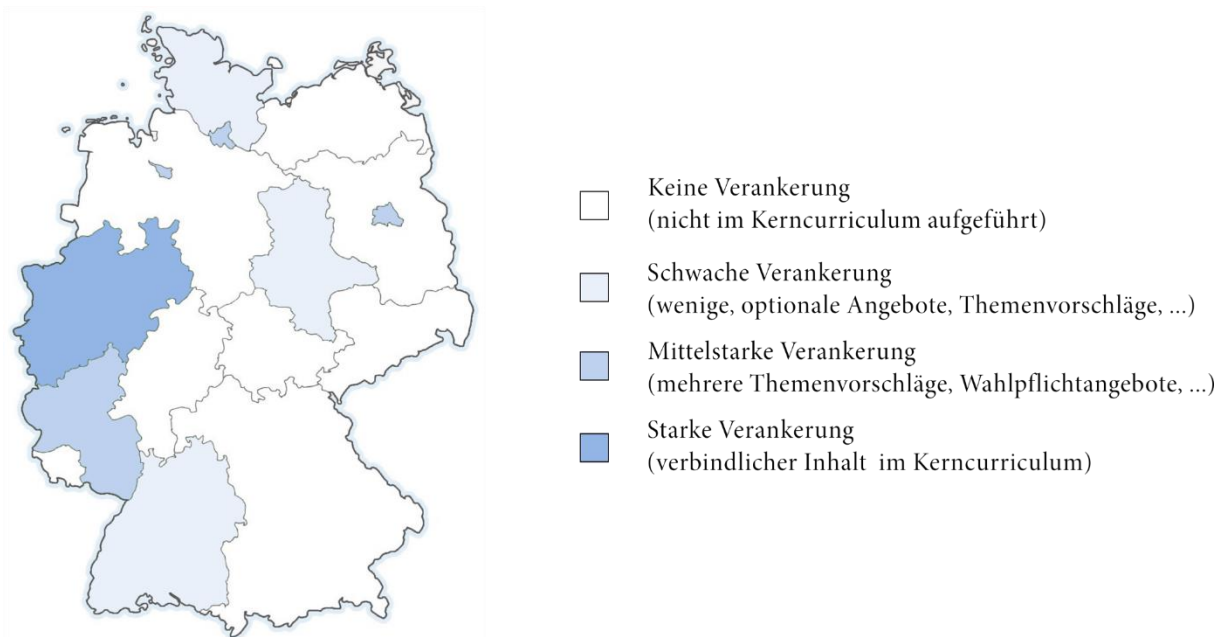
In der folgenden Tabelle 3 und Abbildung 9 soll zunächst ein Überblick gegeben werden, inwiefern und in welchen Bereichen eine Nanoscience Education bereits Einzug in die verschiedenen Kerncurricula gehalten hat, die auf Basis der nationalen Bildungsstandards erstellt wurden. Dabei soll dargestellt werden, wo die Bundesländer Ihre Schwerpunkte setzen und welche Potenziale sie dabei in der Nanotechnologie sehen – oder auch nicht.

**Tabelle 3 – Übersicht der Nano-Inhalte in Curricula und Lehr- bzw. Bildungsplänen verschiedener Bundesländer (Stand: Juli 2016).**

#### Nanotechnologie in verschiedenen Curricula und Bildungsplänen

<b>Baden-Württemberg</b> <sup>[69]</sup>	<p>Die SuS beschreiben die Änderungen der Stoffeigenschaften in Abhängigkeit von der Partikelgröße (Nanopartikel) und setzen sie in Beziehung zum Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen.</p> <p>Die SuS setzen die Größenordnungen von Teilchen (Atome, Moleküle, Makromoleküle), Teilchengruppen (Nanopartikel) und makroskopischen Objekten miteinander in Beziehung.</p>
<b>Berlin</b> <sup>[70]</sup>	<p>In der Sekundarstufe I existiert das Wahlpflichtfach Physik,- Mikro- und Nanotechnologie sowie ein Unterrichtsfeld im Rahmenlehrplan der Sekundarstufe I im Fach Chemie mit Namen „Kohlenstoff – von weich bis megahart, Erscheinungsformen des Kohlenstoffs mit Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie“.</p> <p>Die SuS kennzeichnen Fullerene als weitere Erscheinungsform des Kohlenstoffs mit Anwendungsmöglichkeiten in der Nanotechnologie. Im Unterricht werden die unterschiedlichen Erscheinungsformen des Kohlenstoffs und deren Eigenschaften diskutiert. Die Arbeiten sind Teil des Kompetenzbereiches „vertiefte allgemeine Bildung“.</p>
<b>Bremen</b> <sup>[71-73]</sup>	<p>Angebotener Themenbereich: Entwicklung und Anwendung von neuen Verfahren in der Medizin, Weiterentwicklung von Werkstoffen und Produktionsverfahren im Zusammenhang mit Nanotechnologie (Sek. I).</p> <p>In Bremen ebenso wie in Hamburg, wird die Nanotechnologie als technische Anwendung der Kombination von Naturwissenschaften verstanden. In Bremen</p>

	wird Nanotechnologie bzw. „Mikro- und Nanotechnologie“ daher als Teil des Wahlpflichtfaches Physik sowie im Themenfeld „Technik im sozialen Wandel“ unterrichtet (Sek. I).
<b>Hamburg</b> <sup>[74]</sup>	Angebotener Themenbereich „Innovative Produkte und Verfahren - Wege vom Konzept zur Synthese und vom Rohstoff zum Produkt“ (Sek. II). Vorgeschlagene Themen sind Arzneimittel, Farbstoffe, Kunststoffe sowie Produkte der Nanotechnologie.
<b>Nordrhein-Westfalen</b> <sup>[75-77]</sup>	In den Kernlehrplänen ist das Inhaltsfeld Produkte der Chemie verankert, welches unter anderem „Nanoteilchen und neue Werkstoffe“ sowie deren Anwendungen behandelt. Die SuS betrachten Beispiele für Nanoteilchen und ihre Anwendung und setzen ihre Größe zu Gegenständen aus dem alltäglichen Erfahrungsbereich in Beziehung (Hauptschule, Realschule, Gesamtschule).  Untersuchung des Inhaltsfeldes „Kohlenstoffverbindungen und Gleichgewichtsreaktionen“. Durch die Einbeziehung anorganischer Kohlenstoffverbindungen und den Einblick in die Nanochemie des Kohlenstoffs wird die Vielfalt der Kohlenstoffverbindungen auf eine noch breitere Basis gestellt. Die SuS bewerten an einem Beispiel Chancen und Risiken der Nanotechnologie (Gymnasium, Sek. II).
<b>Rheinland-Pfalz</b> <sup>[78]</sup>	Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer der weiterführenden Schulen enthalten den Bereich „Mit Stoffen Zukunft gestalten“. Hier stehen Fragen im Vordergrund, welche Beiträge die Chemie für die Lösung drängender Zukunftsfragen leisten kann. Neue Energieträger, Nanotechnik, Food- und Drugdesign, neue Materialien und vieles mehr werden hier untersucht (Sek. I).  Vorschlag, Nanotechnologie als ausgewählte Vertiefung im Bereich „Biotechnik“ zu besprechen (Sek. II).  Behandlung von Bionik und Nanotechnologie im Themenbereich „Neue Technologien“ im Fach Biologie (Sek. II).
<b>Sachsen-Anhalt</b> <sup>[79]</sup>	Kompetenzschwerpunkt „Bedeutung von Silicium für die Informationstechnologie“. Hieraus leitet sich die Bedeutung von Silicium für die Informationstechnik und die Nanotechnologie ab.
<b>Schleswig-Holstein</b> <sup>[80]</sup>	In dem Abschnitt „Chemie der funktionalen Stoffe und Materialien“ beinhalten zwei der sieben Wahlpflichtmodule („Grenzflächenaktive Stoffe: Wasch- und Reinigungsmittel und kosmetische Produkte“ sowie „Metalle“) die Untersuchung von Abbaubarkeit bzw. Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge von Nanomaterialien. Eines der sieben Module muss verbindlich behandelt werden.
In den Bundesländern <b>Bayern, Brandenburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Saarland, Sachsen</b> und <b>Thüringen</b> finden sich bislang keine entsprechenden Inhalte.	



**Abbildung 9 – Grafische Übersicht der curricularen Implementierung von "Nano" in Deutschland.**

Die in der Tabelle aufgeführten Ergebnisse verdeutlichen zunächst, dass Nanotechnologie im Rahmen der schulischen Bildung als Teilaspekt der MINT-Fächer und weniger innerhalb eines fächerverbindenden Ansatzes behandelt wird. Teilbereiche der Nanotechnologie werden hauptsächlich im Chemieunterricht vermittelt (Nordrhein-Westfalen, Baden-Württemberg, Hamburg) aber auch im Biologieunterricht (Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt). Darüber hinaus wird Nanotechnologie auch im Rahmen des Physikunterrichtes unterrichtet, hier geht die Tendenz aber dazu, tiefere Einblicke in die Technologie zu gewähren, so dass dort die Gründung von Wahlpflichtfächern immer häufiger anzutreffen sind, wie z.B. das Wahlpflichtfach „Physik,- Mikro- und Nanotechnologie“ in Berlin. Eher selten zu finden ist die Fokussierung auf ein ausgewähltes Nanomaterial, aber auch von dieser Möglichkeit wird bspw. in Berlin („Erscheinungsformen des Kohlenstoffs mit Anwendungsmöglichkeiten der Nanotechnologie“) und Sachsen-Anhalt („Silicium für die Informationstechnik und die Nanotechnologie“) Gebrauch gemacht.

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass Nanotechnologie in der Hälfte aller Bundesländer bislang in die Lehrpläne aufgenommen wurde – und selbst in diesen Fällen oftmals mehr als Vorschlag denn als verbindliches Unterrichtsgegenstand. Insgesamt ist dies dennoch eine signifikante Steigerung, da Nanotechnologie bis vor einigen Jahren noch in keinem einzigen Kerncurriculum explizit zu finden war<sup>[81]</sup>. Dennoch verdeutlicht diese Auflistung, dass nanotechnologische Inhalte bislang nur schwach in deutschen Curricula verankert ist und eine allgemeine Implementierung in formale Bildungszusammenhänge noch weit entfernt liegt.

Bestätigt werden diese Aussagen darüber hinaus durch die Ergebnisse einer Untersuchung aktueller Schulbücher, in denen dieses Themengebiet kaum zu finden ist – mit hoher Wahrscheinlichkeit eine direkte Folge dieses Trends. In einer Schulbuchanalyse von 12 Büchern verschiede-

ner Verlage aus den Jahren 2012 – 2014 finden sich im Fach Chemie lediglich vereinzelte Informationen zu diesem Thema (CarbonNanoTubes, C<sub>60</sub>-Fullerene / „Buckyballs“) und nur ein Experiment. In den Fächern Biologie und Physik finden sich in 11 Schulbüchern keine Referenzen.

Wird die Aufnahme in Schulbüchern als Indikator oder Gradmesser für den Transfer der fachdidaktischen Forschung in die unterrichtliche Praxis gewählt, so ergibt sich zum Thema „Nano“ und dessen gegenwärtige Implementierung in den Chemieunterricht ein ernüchterndes Bild. Gleichzeitig wird hieran nur umso deutlicher, dass noch ein großer Bedarf an curricular angebotenen Experimenten und Materialien für den Chemieunterricht besteht.

### 3.4 Fazit

In diesem Kapitel wurden der Bedarf und der Status Quo einer Nanoscience Education untersucht. Insgesamt zeigt sich hierbei, dass

... Nanotechnologie als Katalysator für eine interdisziplinäre Weiterentwicklung der Curricula fungieren und dabei ebenso interessante wie relevante Kontexte bieten kann. In der Wirt- und Wissenschaft nimmt ihre Bedeutung stetig zu, sodass sie in Zukunft die ihr zugeschriebene Schlüsselrolle zur Bewältigung kommender globaler Herausforderungen (Nahrungs-, Wasser- und Energieversorgung, Klimawandel) einnehmen kann. In der heutigen Gesellschaft stehen sich in der Folge eine Vielzahl an Berührungspunkten im Alltag und ein noch rudimentäres Wissen der Bevölkerung zu dieser Thematik gegenüber. Insgesamt unterstreichen alle drei Sichtweisen den Bedarf nach einer verstärkten Nanoscience Education.

... eine Vielzahl an privaten oder staatlich geförderten Bildungsinitiativen Inhalte zur Nanotechnologie vermittelt. Die Angebote reichen von Online-Unterrichtsmaterialien über Unterrichtskoffern bis hin zu (mobilen) Schülerlaboren. Trotz dieses Engagements kann eine systematische, flächendeckende Vermittlung dieses Themas allein durch diese Maßnahmen nicht geleistet werden.

... Studiengänge mit Inhalten der Nanotechnologie und Nanowissenschaften an immer mehr Standorten angeboten werden; besonders dicht ist das Angebot in den westdeutschen Bundesländern. Dem gegenüber steht die Tatsache, dass diese Inhalte bislang nahezu exklusiv in den fachwissenschaftlichen Studiengängen verortet sind und noch kaum Eingang in die entsprechenden Lehramtsstudiengänge gehalten hat. Somit ist davon auszugehen, dass Lehrkräfte auf absehbare Zeit eher im Ausnahme- denn im Regelfall Kenntnisse in diesem Themenfeld in ihrer universitären Ausbildung erwerben können.

... Nanotechnologie in der formalen Ausbildung zum jetzigen Zeitpunkt nur schwach implementiert ist. Zwar deutet die Entwicklung in den letzten Jahren auf eine Änderung dieser Situation hin, dennoch ist festzuhalten, dass aktuelle Bildungspläne, Curricula oder Rahmenpläne nur wenige Inhalte aus der Nanotechnologie und diese in einem geringen Umfang vermitteln. Die deutlichen Ergebnisse einer Schulbuchanalyse von Chemie-, Biologie- und Physikbüchern reflektieren diese Aussage.

Aus diesen Gründen soll nun im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Beitrag zur Didaktischen Rekonstruktion des Themas Nanotechnologie geleistet werden. Im folgenden Kapitel wird hierzu mit einer Diskussion der entsprechenden didaktischen Modellierung begonnen.

## 4 Didaktische Rekonstruktion des Themas „Nano“

### 4.1 Grundzüge des Modells

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit umfasst die fachdidaktische Konzeptualisierung des Themengebietes „Nano“ für den Chemieunterricht, Schülerlabore und die Lehrer(fort)bildung. Für den Transfer fachwissenschaftlicher Inhalte in (schulische) Vermittlungszusammenhänge wurde in der fachdidaktischen Forschung eine Vielzahl an Konzepten entwickelt.

Historisch gesehen von Bedeutung ist etwa KLAFFKIS Didaktische Analyse, welches die nicht die fachlichen Inhalte, sondern die didaktische Interpretation, Begründung und Strukturierung in das Zentrum der Unterrichtsvorbereitung stellt. Hierbei soll herausgestellt werden, welcher Bildungsgehalt in möglichen Unterrichtsinhalten stecken kann <sup>[82]</sup>.

Unter der Kritik, dass dieses von KLAFFKI postulierte Primat der Didaktik die Unterrichtspraxis vernachlässigen würde, entwickelte die BERLINER SCHULE, (HEIMANN, OTTO und SCHULZ) in Abgrenzung hierzu ein Modell der lerntheoretischen Didaktik, welches auch als Strukturmomente-Modell bezeichnet wird <sup>[83]</sup>. Dieses Modell geht grundlegend davon aus, dass jeder Unterricht eine immanente, zeitlose Struktur besitzt. Hieraus ergeben sich somit eine formale Konstanz und eine inhaltliche Varianz. Unter Berücksichtigung von zwei Bedingungsfeldern (soziokulturelle und anthropogene Voraussetzungen) sowie vier didaktischen Entscheidungsfeldern (Intention, Inhalte, Methoden, Medien) sollen Lehrende in die Lage versetzt werden zu entscheiden, wie Unterrichtsstoff am geeignetsten vermittelt werden kann.

Einen anderen Ansatz von großer Bedeutung stellt zudem das konstruktivistisch orientierte Modell des *Conceptual Change* dar. In der 1982 von POSNER formulierten Theorie ist dafür die Voraussetzung, dass Lernende mit ihrer aktuellen Vorstellung unzufrieden sind (dissatisfaction). Diese Vorstellung wird nun durch eine neue, einsichtige (intelligible), überzeugende (plausible) und fruchtbare (fruitful) Vorstellung ersetzt <sup>[84, 85]</sup>. Das Modell, welches u.a. von GRO-PENGEIEßER <sup>[86]</sup> erweitert wurde, beschrieb somit zunächst einen Lernprozess im Sinne einer „Vorstellungsänderung“. Spätere Forschungsarbeiten argumentieren allerdings auch mit der Adaption und Erweiterung bisheriger Vorstellungen (*Conceptual Growth*).

Der aktuell zumeist verwendete Ansatz in diesem Zusammenhang ist das Modell der Didaktischen Rekonstruktion (MDR), welches von KATTMANN, DUIT, GRO-PENGEIEßER und KOMOREK erstmals 1997 vorgestellt wurde <sup>[87]</sup>. Steht das Modell zwar in der langen Tradition der oben genannten Konzepte, so unterscheidet es sich doch einerseits dadurch, dass die wechselseitige Abhängigkeit der den Unterricht bestimmenden Variablen hervorgehoben wurde und andererseits durch die konsequent angewandte konstruktivistische Grundhaltung. Letztere kann exemplarisch in Abgrenzung zum *Conceptual Change* verdeutlicht werden: Zum damaligen Zeitpunkt beinhaltete dieser Begriff hauptsächlich das Ersetzen der vorunterrichtlichen Vorstellungen durch die gewünschten, fachlich richtigen Vorstellungen, was allerdings oftmals auf weitere Lernschwierigkeiten hinauslief <sup>[88, 89]</sup>. Im Modell der didaktischen Rekonstruktion werden vorunterrichtliche und lebensweltliche Vorstellungen hingegen nicht in erster Linie als Hindernisse



gesehen, sondern vielmehr als potenzielle Lernhilfen aufgefasst und gleichwertig mit den fachwissenschaftlichen Vorstellungen behandelt. Dieser wertschätzende Umgang mit Präkonzepten ist bekanntermaßen von großer Bedeutung für den Aufbau von naturwissenschaftlichem Verständnis<sup>[90,91]</sup>. Im Verlauf des Lernprozesses werden diese Vorstellungen schließlich modifiziert, ausdifferenziert und bereichert<sup>[92]</sup> (*Conceptual Reconstruction*<sup>[93]</sup>).

Ebenfalls deutlich wird der Grundgedanke bereits über den Begriff der „Rekonstruktion“, welcher sich hierbei bewusst abgrenzt von

- der didaktischen Reduktion, da diese hauptsächlich den Auswahlprozess von relevanten Inhalten aus einem zu erschließenden Forschungsfeld beschreibt und
- der didaktischen Transformation, durch welche lediglich die Darstellungsform und die experimentellen Anforderungen an die SuS angepasst werden<sup>[87]</sup>.

Auch wenn die beiden genannten Prozesse eine Rolle innerhalb der didaktischen Rekonstruktion spielen, so greift der Ansatz dennoch viel tiefer; das grundlegende Ziel ist hierbei, „wesentliche Aufgaben fachdidaktischer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in ihren wechselseitigen Bezügen, ihren Voraussetzungen und Abhängigkeiten zu modellieren“<sup>[87]</sup>. Hierbei werden hauptsächlich drei wechselwirkende Aspekte und ihr Zusammenspiel betrachtet und aufeinander bezogen; diese sind (1) die fachliche Klärung, (2) das Erfassen von Lernerperspektiven und (3) die didaktische Strukturierung. Im fachdidaktischen Triplet wird das Beziehungsgefüge dieser drei Komponenten dargestellt (siehe Abbildung 10).

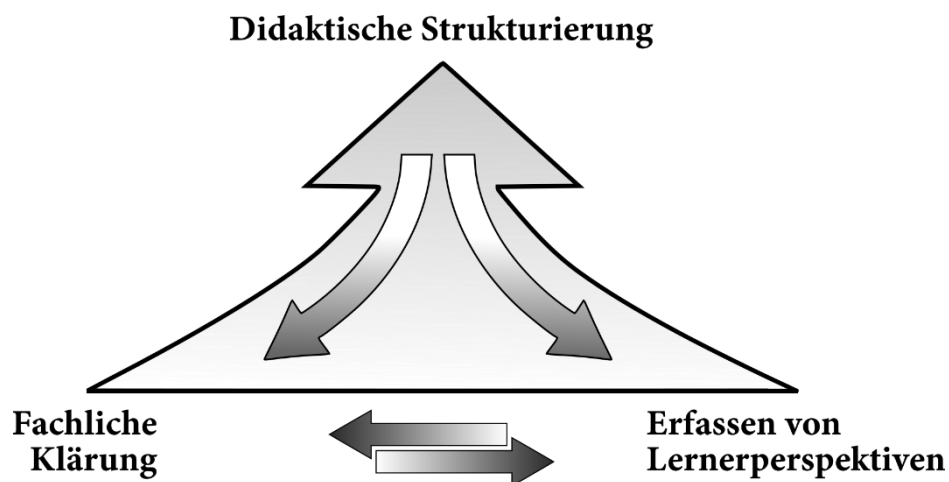


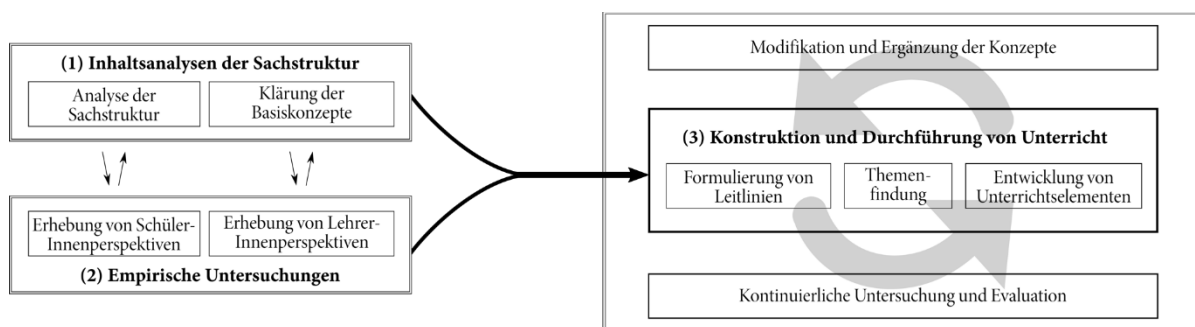
Abbildung 10 – Tripletts der Didaktischen Reduktion nach KATTMANN, DUIT, GROPPENGIEBER und KOMOREK<sup>[87]</sup>.

Weitere Informationen zu den Grundlagen der didaktischen Rekonstruktion finden sich in der Literatur<sup>[94]</sup>.

## 4.2 Struktur des weiteren Vorgehens

Ausgehend von diesem Beziehungsgefüge kann nun eine Abfolge für die weitere Vorgehensweise erstellt werden. Der erste Schritt beschreibt den Aufbau des didaktischen Fundamentes;

mithilfe von fachwissenschaftlicher und fachdidaktischer Literatur, Konzepten und Methoden wird einerseits eine Klärung der Sachstruktur betrieben, um die essenziellen Konzepte, Inhalte und Themen für die Vermittlung von „Nano“ zu identifizieren. Parallel werden mit empirischen Untersuchungen die Perspektiven von SuS sowie Lehrkräften erhoben. Erstere werden befragt, um gezielt auf ihre Bedürfnisse und Prädispositionen eingehen zu können, letztere, da Lehrerinnen und Lehrer laut KELLY <sup>[95]</sup> und ANDERSON <sup>[96]</sup> oftmals zwischen „make it or break it“ entscheiden. Basierend auf den resultierenden Ergebnissen werden Unterrichtsgegenstände unter den Gesichtspunkten der Schüler- und Alltagsorientierung im zweiten Schritt didaktisch strukturiert, entwickelt und systematisch an die Kompetenzbereiche und Basiskonzepte des Kerncurriculums angegliedert. Die dabei entstehenden Projekte sollen abschließend kontinuierlich evaluiert und optimiert werden. Aus dieser Zielsetzung leitet sich unmittelbar die strukturierende Gliederung für die folgenden Abschnitte dieser Arbeit ab (siehe Abbildung 11).



**Abbildung 11 – Iterative Abfolge der didaktischen Rekonstruktion von Nanotechnologie als gliedernde Struktur dieser Arbeit, basierend auf dem Modell der didaktischen Rekonstruktion <sup>[87]</sup>.**

Die idealisierte Struktur nach KATTMANN ET AL. wird in dieser Arbeit an ausgewählten Stellen angepasst, was durch die Besonderheiten des Themengebietes und die Schwerpunktsetzung dieser Arbeit begründet ist. In den entsprechenden Kapiteln wird auf diese Abweichungen eingegangen. Im ersten Schritt soll nun die Sachstruktur analysiert werden, um Lernpotenziale des Themengebietes Nanotechnologie für SuS zu identifizieren.

## 5 Klärung der Sachstruktur

Die fachliche Klärung verfolgt das Ziel, fachwissenschaftliche Inhalte explizit zu machen und in ihrer Vermittlungsabsicht zu klären. Sie besteht „(...) in der kritischen und methodisch kontrollierten systematischen Untersuchung fachwissenschaftlicher Aussagen, Theorien, Methoden und Termini aus fachdidaktischer Sicht“<sup>[97]</sup>. Im Verlauf dieses Prozesses werden dabei Erkenntnisse aus der Wissenschaft in ihrer Geltung und ihrer Bedeutung für das Lehren und Lernen systematisch analysiert und reflektiert<sup>[92]</sup>. Kurz formuliert soll die Struktur der fachwissenschaftlichen Inhalte in eine Struktur für die Vermittlung der fachwissenschaftlichen Inhalte transformiert werden<sup>[94]</sup>.

Mit anderen Worten ist es das konkrete Ziel der Untersuchung, die wichtigsten Inhalte und Konzepte im Sinne der fachlichen Klärung herauszustellen. Welches Wissen ist relevant, welche Konzepte werden für ein grundlegendes Verständnis des Themengebietes „Nano“ benötigt? Was sind die zentralen Inhalte und wie bauen sie aufeinander auf?

Bei dieser Aufgabe stellt das Themengebiet „Nano“ in mehreren Hinsichten eine besondere Herausforderung dar.

1. Bei den Nanowissenschaften handelt es sich sowohl um eine Querschnitts- als auch eine Plattformtechnologie, die eine immense Vielzahl an interdisziplinären Forschungsfeldern umspannt. Eine repräsentative Auswahl an fachwissenschaftlicher Literatur muss entsprechend all diese Bereiche mit ihren unterschiedlichen Schwerpunkten abbilden.
2. Bei den Nanowissenschaften handelt es sich um eine relativ „junge“ Technologie und viele Inhalte sind aus fachwissenschaftlicher Sicht noch nicht abschließend geklärt. Exemplarisch hierfür steht der grundlegende Begriff „Nanomaterial“, welcher erst 2011 von der EUROPÄISCHEN UNION verbindlich definiert werden konnte<sup>[98]</sup>.
3. Infolge dessen existieren bislang vergleichbar wenige fachdidaktische Vorarbeiten, Untersuchungen oder gesicherte Erkenntnisse, welche Konzepte wesentlich für die Vermittlung des Themengebietes sind.

Die fachliche Klärung eines Themenfeldes dieser Breite ist demzufolge immens umfangreich – eine detaillierte inhaltliche Analyse aller Themenfelder würde aufgrund des zu untersuchenden Korpus‘ den Rahmen dieser Arbeit deutlich überschreiten. Aus diesem Grund fokussiert sich die folgende Untersuchung auf Quellen, welche ihrerseits schon breites und gesichertes Wissen bündeln. Insbesondere geeignet sind hierfür fachliche Lehrbücher und geeignete Übersichtsartikel sowie fachdidaktische Veröffentlichungen.

In den folgenden Kapiteln wird ein Überblick über relevante fachliche Strukturen erarbeitet. Hierbei soll berücksichtigt werden, dass eine Vermittlung in Schulen, Schülerlaboren und der universitären Lehramtsausbildung als übergeordnetes Ziel festgelegt ist. Somit kann und soll das Thema hinsichtlich des Umfangs weder in voller Breite noch Tiefe wiedergegeben werden. Nichtsdestotrotz wird innerhalb dieses Rahmens eine größtmögliche Repräsentativität und fachliche Genauigkeit angestrebt. Die Struktur dieses Abschnittes und die Auswahl der folgen-

den Kapitel beruht dabei auf der Schnittmenge der diesbezüglich genauer untersuchten Literaturquellen<sup>[4, 23, 61, 99–109]</sup>. Begonnen wird – wie von DUIT ET AL.<sup>[94]</sup> vorgeschlagen – mit einer knappen historischen Einführung.

## 5.1 Einführung

Die Ursprünge der Nanotechnologie reichen, gemessen an ihrer Aktualität, weit zurück – so wurden bereits in der Spätantike rote Gold-Nanopartikel verwendet, um Glasscheiben entsprechend zu färben<sup>[110]</sup>. Auch wenn MICHAEL FARADAY bereits 1856 ebendieses Phänomen wissenschaftlich untersuchte<sup>[111]</sup>, befasste sich die Kolloidchemie erstmals zu Beginn des 20. Jahrhunderts systematisch mit der Untersuchung und Synthese kleinster Teilchen<sup>[112]</sup>. Dabei wurde ersichtlich, dass sich Materie im kleinsten Maßstab anders verhält als die gewohnten Stoffe mit makroskopischen Abmessungen und folglich ebenso wenig mit den bis dato gültigen Modellen beschrieben werden konnte. Ein Beispiel hierfür ist etwa die Streuung von Licht an kolloidalen Teilchen (bspw. Opaleszenz), welche erstmals 1912 von GUSTAV MIE beschrieben wurde<sup>[113]</sup>. ERWIN SCHRÖDINGER formulierte seine diesbezüglichen Beobachtungen einige Jahre später wie folgt<sup>[114]</sup>:

*“As our mental eye penetrates into smaller and smaller distances and shorter and shorter times, we find nature behaving differently from what we observe in visible and palpable bodies of our surroundings that no model shaped after our large-scale experiences can ever be true.”*

Zwar waren die technischen Möglichkeiten zu dieser Zeit noch stark limitiert, dennoch erkannten einige visionäre Wissenschaftler wie WOLFGANG OSTWALD diesen Umständen zum Trotz bereits frühzeitig die Bedeutung der Chemie in kleinsten Dimensionen<sup>[115]</sup>. Auch RICHARD FEYNMAN formulierte rund 40 Jahre später in seiner berühmten und heutzutage vielzitierten Nobelpreisrede<sup>[116]</sup> mit der bezeichnenden Aussage „There’s plenty of room at the bottom“ das immense Potenzial dieser Technologie, welches er anschließend mit der Fragestellung illustrierte, warum nicht beispielsweise die gesamte *Encyclopedia Britannica* in 24 Bänden auf einen Stecknadelkopf gedruckt werden könnte. Theoretisch ist dieses Vorhaben ohne Zweifel möglich – allein der Punkt am Ende dieses Satzes besteht aus über 250 Milliarden Ruß-Nanopartikeln<sup>[106]</sup>.

In der heutigen Zeit haben sich nicht nur die technischen Möglichkeiten entscheidend gesteigert, sondern auch das wissenschaftliche Interesse, welches diesem Themengebiet entgegengebracht wird. Unter dem Begriff „Nanowissenschaften“ wird heutzutage ein breites Forschungsfeld verstanden, welches – ebenso wie die Nanotechnologie als Produkt der Nanowissenschaften – die „klassischen“ naturwissenschaftlichen Disziplinen wie Biologie, Chemie und Physik gänzlich vereint<sup>[117]</sup>.

## 5.2 Nanotechnologie – Eine (Arbeits-)Definition

Was genau verbirgt sich hinter dem Begriff „Nanotechnologie“? Der Begriff „Nano“ leitet sich von dem griechischen Wort „*nános*“ (deutsch: Zwerg) ab und impliziert damit bereits, dass sich

Nanotechnologie mit kleinsten Dimensionen befasst. Naturwissenschaftlich steht das Prefix „Nano-“ für den Faktor  $10^{-9}$ , bspw. in Nanometer oder Nanosekunde.

Da es sich hierbei, wie oben erwähnt, um eine interdisziplinäre Technologie handelt und folglich eine Vielzahl an Forschungsgebieten umspannt, birgt die Formulierung einer konkreten Definition Schwierigkeiten. Aufgrund der Größe und Diversität des Forschungsfeldes spielen wissenschaftliche Gründe hierbei eine Rolle, z.B. wird je nach Forschungsgebiet „Nano“ unterschiedlich aufgefasst bzw. benennen oder vernachlässigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedliche Aspekte, die eine Definition umfassen muss. Beispielsweise ist es denkbar, dass Naturwissenschaftler „Nano“ aus anderen Blickwinkeln definieren, als Geisteswissenschaftler. Der Stanforder Biophysiker STEVEN BLOCK fasste diese Problematik in dem folgenden Zitat zusammen:

*„It depends on whom you ask. Some folks apparently reserve the word to mean whatever it is they do as opposed to whatever it is anyone else does.”* <sup>[118]</sup>

Darüber hinaus ist die Abgrenzung zu angrenzenden Wissenschaftsgebieten nicht immer trennscharf; die Mikroelektronik und Biotechnologie befassen sich etwa seit jeher mit nanoskaligen Strukturen, ohne, dass sie per se zur Nanotechnologie zugerechnet werden.

Aus diesen und weiteren Gründen gestaltet sich die Formulierung einer genauen Definition als schwierig, was auch auf wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ebene weitreichenden Folgen nach sich zieht. Sehr lange und intensiv wurde bspw. die Definition eines Nanomaterials auf EU-Ebene diskutiert – hier stehen sich Interessen der Verbraucher (Risikoprävention) und der Industrie (Angst vor wirtschaftlichen Verlusten) gegenüber <sup>[119]</sup>.

Eine einheitliche, umfassende Definition von „Nano“ ist zwar theoretisch möglich, allerdings nicht zweckmäßig, da sie deutlich zu umfangreich ausfallen würde. Als mögliche Lösung schlagen FIEDELER ET AL. mehrere Definitionen für verschiedene Teilbereiche dieser Technologie vor <sup>[120]</sup>. Für die Zielsetzung dieser Arbeit, welche die Betrachtung in der Schule, Schülerlabor und Universität umfasst, soll sich folgende Arbeitsdefinition daher auf das Wesentliche beschränken. Gleichzeitig bildet sie eine Vielzahl an anderen Definitionen <sup>[120–123]</sup> ab:

1. Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension im Größenbereich zwischen 1 - 100 nm liegen.
2. Nanotechnologie macht sich charakteristische Effekte und Phänomene zunutze, die im Übergangsbereich zwischen atomarer und mesoskopischer Ebene auftreten.
3. Nanotechnologie bezeichnet die gezielte Herstellung und/oder Manipulation einzelner Nanostrukturen. <sup>[124]</sup>

Der erste Punkt grenzt hierbei den zu betrachtenden Größenbereich ein, in dem überwiegend neue oder veränderte Materialeigenschaften auftreten. Mit der hier beschriebenen Definition werden nicht nur Partikel mit äußeren Abmessungen im nanoskaligen Bereich beschrieben, sondern auch Materialien mit nanoskaligen Strukturen, wie etwa poröse Materialien. Der Passus „in mindestens einer Dimension“ wurde zudem ergänzt, um Oberflächenbeschichtungen

oder Nanofasern (wie bspw. Carbon Nanotubes) ebenfalls in die Definition einzuschließen. Es ist anzumerken, dass andere Definitionen <sup>[125]</sup> (etwa aus regulatorischer oder risikobewertender Perspektive) auch Partikel mit einer Größe von bis zu 300 oder 500 nm als Nanomaterialien fassen. Das folgende Kapitel 5.3 befasst sich detaillierter mit verschiedenen Formen von Nanomaterialien.

Der zweite Punkt betont, dass die Abmessungen nicht allein entscheidend für die Zuordnung zur Nanotechnologie ist – konstituierend ist vielmehr die Nutzbarmachung neuer Effekte und Eigenschaften <sup>[4]</sup>.

Der dritte Punkt ist notwendig, um eine Abgrenzung zu vielen biologischen Molekülen und Prozessen zu schaffen, wie etwa die Biosynthese von Proteinen oder Enzymen. Eine gezielte Beobachtung oder auch Modifikation entsprechender Strukturen wird hingegen bewusst zugelassen <sup>[4]</sup>.

### 5.3 Nanomaterialien – Definition, Partikelgröße, Morphologien und Strukturen

Möglicherweise ebenso kontrovers diskutiert wie der Begriff „Nanotechnologie“ ist die Definition eines „Nanomaterials“. Die o. g. Aussagen in der Definition von Nanotechnologie im Zusammenhang mit der Definition der Europäischen Kommission ermöglichen eine genauere Vorstellung, was unter diesen Begriff fällt:

*“Nanomaterial means a natural, incidental or manufactured material containing particles, in an unbound state or as an aggregate or as an agglomerate and where, for 50 % or more of the particles in the number size distribution, one or more external dimensions is in the size range 1 nm – 100 nm.” <sup>[98]</sup>*

Die räumliche Abgrenzung der Partikelgröße, sowohl nach oben als auch nach unten, ist allerdings in der Praxis unscharf. Zusammenschlüsse aus einigen hundert oder tausend Atomen, welche durchaus in den Größenbereich von wenigen Nanometern fallen können, werden im Allgemeinen als Cluster und nicht als Nanomaterial bezeichnet. Gewisse kleinere Stoffe werden jedoch zu den Nanomaterialien gezählt, wie etwa das nur aus einer einlagigen Kohlenstoffschicht bestehende Graphen.

*“By derogation from the above, fullerenes, graphene flakes and single wall carbon nanotubes with one or more external dimensions below 1 nm should be considered as nanomaterials.” <sup>[98]</sup>*

Nach oben ist der Übergang ebenfalls fließend; bis zu welcher Partikelgröße ein Nanomaterial besondere Eigenschaften zeigt, ist stark von dem entsprechenden Material abhängig <sup>[99]</sup>. Zudem können auch Aggregate oder Agglomerate immer noch kleinere, reaktive Bereiche mit entsprechenden „Nano“-Eigenschaften aufweisen, selbst wenn sie eine Gesamtgröße von über 100 nm

erreicht haben<sup>8</sup>. Ungeachtet dieser unscharfen Übergänge soll diese Definition für die weitere Arbeit als verbindlich gelten; es soll analog zur Definition von Nanotechnologie gelten, dass es sich hierbei um den Versuch der bestmöglichen Annäherung handelt.

Im Größenbereich von 1 – 100 nm können Nanomaterialien grundlegend verschiedene Morphologien besitzen (siehe Abbildung 12).

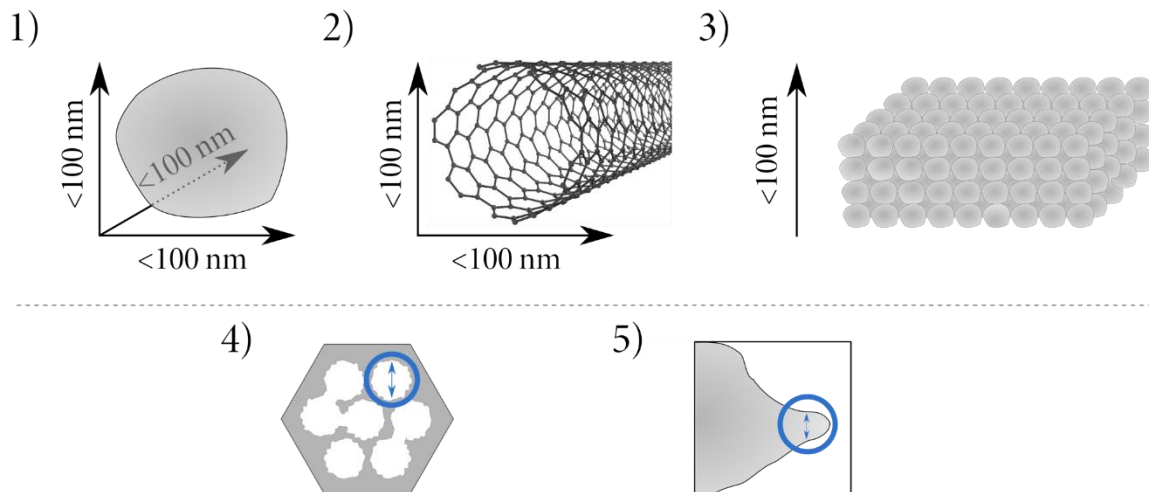


Abbildung 12 – Morphologien von Nanomaterialien. 1) Nanopartikel, alle drei Dimensionen < 100 nm. 2) Nanofaser, zwei Dimensionen < 100 nm. 3) Nanoplättchen, eine Dimension < 100 nm. 4) Nanoporöses Material mit Porendurchmesser < 100 nm. 5) Bereich mit Abmessungen < 100 nm in einer größeren Struktur.

(1) Das einfachste Beispiel von Nanomaterialien sind sphärische **Nanopartikel**, die in allen drei Dimensionen nanoskalige Abmessungen besitzen. Entsprechende Beispiele, welche gleichermaßen fachwissenschaftlich wie fachdidaktisch beforscht werden, sind Zinkoxid-<sup>[126–128]</sup> sowie Gold-Nanopartikel<sup>[129–132]</sup>. **Nanofasern**, wie etwa die bekannten Carbon Nanotubes (2) besitzen einen nanoskaligen Durchmesser (= zwei Dimensionen), können allerdings bis zu einige Millimeter lang werden<sup>[133]</sup>. Unter den Begriff **Nanoplättchen bzw. Nanolacke** (3) fallen insbesondere Beschichtungen (= eine Dimension) mit einer Dicke < 100 nm. Auch hier existieren zahlreiche Anwendungen, sehr bekannt sind insbesondere antimikrobielle Beschichtungen mit Silber<sup>[134]</sup>.

Darüber hinaus sind ebenfalls **nanostrukturierte Materialien** zu beachten; exemplarisch wurde hier ein poröser Festkörper mit illustriert, welcher ein geordnetes Porensystem mit nanoskaligen Durchmessern aufweist (4). Beispiele aus der fachdidaktischen und fachwissenschaftlichen Forschung sind nanoporöse Silica<sup>[135–138]</sup> und weitere Metall-organische Gerüste (*metal organic frameworks*)<sup>[139]</sup> sowie Alumosilikate (Zeolithe)<sup>[107]</sup>. Zuletzt können auch Agglomerate bzw.

<sup>8</sup> Bei dieser Definition existieren starke Gemeinsamkeiten mit der Kolloidchemie; die entsprechende Definition beschreibt Stoffe in einem sehr fein verteilten Zustand. Die Abgrenzung nach unten ist hierbei die „echte“, molekular-disperse Lösung<sup>[99]</sup>. Ein Unterschied ist jedoch der breitere Partikelgrößenbereich (1 nm – 1 µm). Darüber hinaus sind Kolloide grundsätzlich in einem Medium dispergiert, wobei Nanopartikel auch in anderen Formen vorliegen können.

Aggregate mit Durchmessern  $> 100$  nm noch **nanoskalige Strukturen** (5) aufweisen, welche wiederum  $< 100$  nm sind und demzufolge ebenfalls Eigenschaften von Nanomaterialien aufweisen. Abbildung 13 zeigt Nanopartikel mit verschiedenen Morphologien.

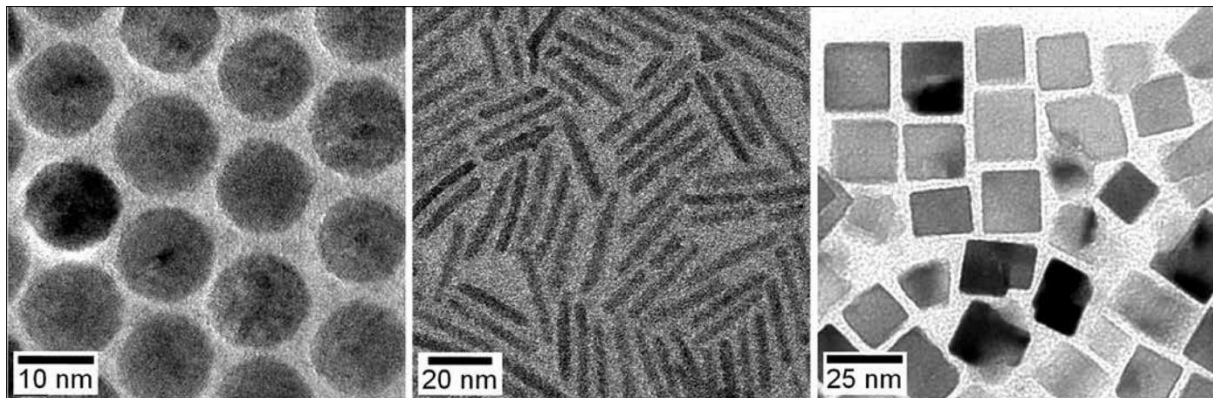


Abbildung 13 – Titandioxid- und Eisenoxid-Nanopartikel mit unterschiedlichen Morphologien <sup>[108]</sup>.

Eine gelungene Übersicht über Normen und Begriffe zu Nanomaterialien für die unterrichtliche Verwendung wurde kürzlich von STEINBACH veröffentlicht <sup>[108]</sup>.

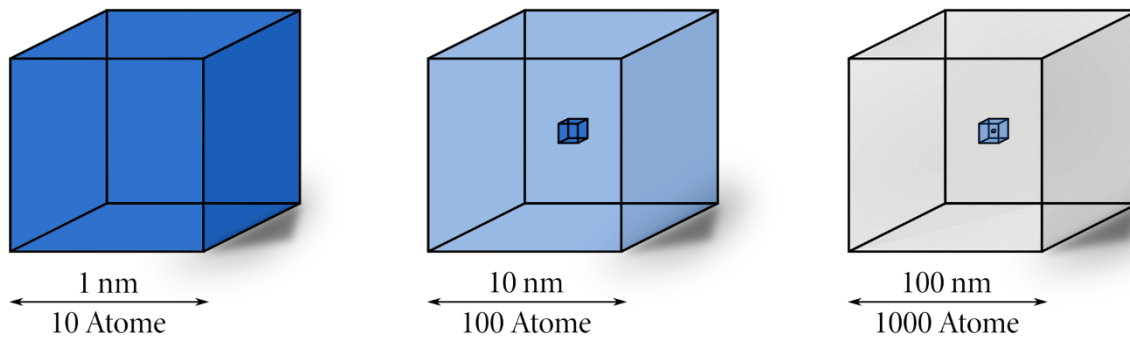
## 5.4 Eigenschaften

Die Verkleinerung von Stoffen bis hin zu nanoskaligen Abmessungen führt zu wesentlichen Veränderungen des gewählten Werkstoffes. Die besonderen Eigenschaften der erhaltenen Nanomaterialien bzw. nanostrukturierten Materialien gründen im Wesentlichen auf zwei Effekte, die damit einhergehen – die Vergrößerung der Oberfläche und der zunehmende Einfluss von quantenmechanischen Eigenschaften. Natürlich sind beide Effekte miteinander verknüpft – im Sinne der fachlichen Klärung sollen sie an dieser Stelle aber für eine bessere Erläuterung nacheinander betrachtet werden.

### 5.4.1 Oberflächenvergrößerung

Die Vergrößerung der Gesamtoberfläche eines Stoffes bei zunehmender Zerkleinerung desselben ist im Grunde genommen ein naheliegender Zusammenhang. Da das Gesamtvolumen dabei konstant bleibt, die Oberfläche jedoch exponentiell steigt, ist ein stark erhöhtes *Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis* ein Charakteristikum von Nanomaterialien. Abbildung 14 zeigt diesen Zusammenhang exemplarisch an einem Modell mit verschiedenen Partikeln auf. In diesem Modell soll der Einfachheit halber ein Atomdurchmesser von 0,1 nm angenommen werden; dies entspricht in etwa dem empirisch bestimmten Wert eines Phosphor-Atoms <sup>[140]</sup>.





Kantenlänge [nm]	1	10	100
Oberflächenatome	488	58.808	5.988.008
Atome im Inneren	512	941.192	994.011.992
Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis	95,3 %	6,2 %	0,6 %

Abbildung 14 – Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis und Gesamtoberfläche verschiedener Partikel mit unterschiedlicher Kantenlänge <sup>[61, 141]</sup>.

Aus den Berechnungen ist deutlich der exponentielle Anstieg der Oberflächenatome im Vergleich zur gesamten Anzahl der Atome ersichtlich, sobald die Partikelgröße sinkt. Besonders deutlich wird dieser Effekt bzw. das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis in folgendem Beispiel: Ausgehend von einem Würfel mit einer Kantenlänge von einem Zentimeter ergibt sich bei der kontinuierlichen Teilung dieses Würfels bis zu einer Kantenlänge von einem Nanometer eine Gesamtoberfläche von über 6.000 m<sup>2</sup> (siehe Kap. 7.1.1.3).

Mit dem Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis hängt daher auch stark die Reaktivität des Stoffes zusammen; Abbildung 15 stellt ein Modell zur Verdeutlichung dieses Zusammenhangs dar. Nanotechnologie ist daher aufgrund der hohen Reaktivität und der geringeren Materialkosten attraktiv für die Entwicklung von Katalysatoren zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit, Senkung der Kosten und Verbesserung der Umweltbilanz <sup>[142, 143]</sup>.

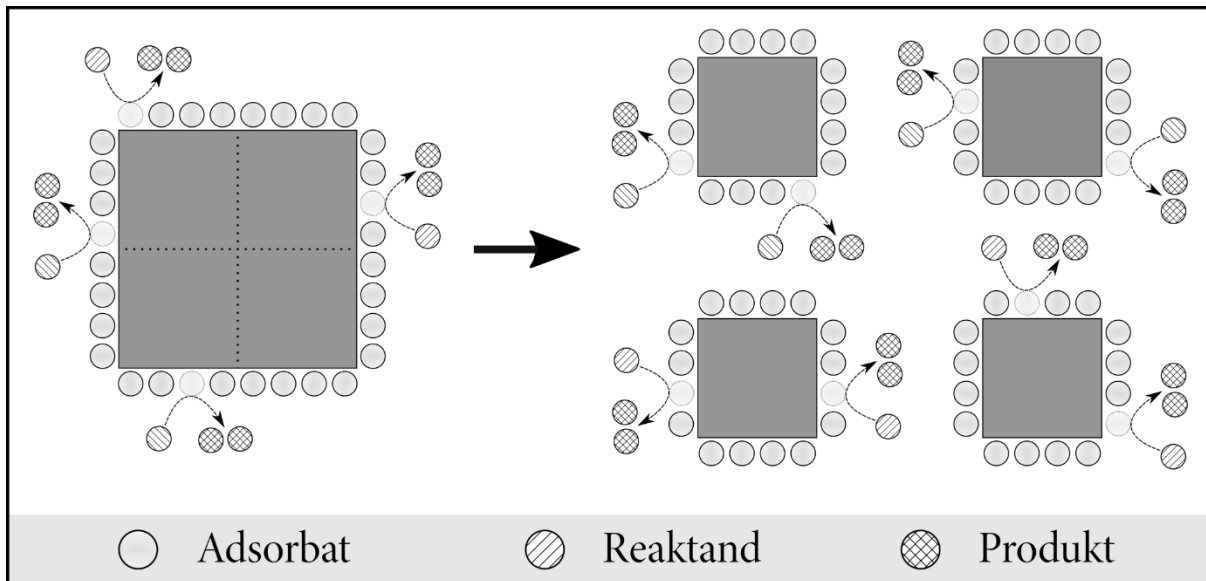


Abbildung 15 – Vereinfachtes zweidimensionales Modell zur Illustration der Rolle der Oberfläche für Adsorption und Reaktivität unterschiedlich großer (Nano-)Partikel (siehe Kap. 7.1.1.3) <sup>[144]</sup>.

Neben der Reaktivität wird durch eine vergrößerte Oberfläche auch die Möglichkeit zur Adsorption stark gesteigert, wodurch sich mögliche Anwendungsfelder eröffnen, wie etwa zur Gasspeicherung in Druckgasflaschen oder wasserstoffbetriebenen Autos (siehe Kap. 7.2.3.2 - 7.2.3.4 <sup>[145]</sup>).

Darüber hinaus wird in Abbildung 14 deutlich, dass bei einer Kantenlänge von wenigen Nanometern ein hoher Anteil der Atome an der Oberfläche vorliegt. Dieser Aspekt hat ebenfalls erhebliche Auswirkungen auf die Eigenschaften und wird im folgenden Abschnitt beleuchtet.

#### 5.4.2 Quanteneffekte

Mit dem Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis kann erklärt werden, warum Nanomaterialien verstärkte Eigenschaften im Vergleich zu makroskopisch dimensionierten Materialien („Bulk-Materialien“) aufweisen, die mit der vergrößerten Oberfläche zusammenhängen. Neuartige Eigenschaften, welche oftmals charakteristisch für das entsprechende Nanomaterial sind, können auf diese Weise in vielen Fällen nicht direkt erklärt werden.

Makroskopische Körper auf der einen Seite können weitestgehend mit den Gesetzen der klassischen Physik beschrieben werden. Nanomaterialien hingegen sind Übergangsmaterialien von kontinuierlichen makroskopischen hin zu atomaren Strukturen, welche sich mehr und mehr von den Gesetzen der Quantenmechanik beschreiben lassen (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4 – Geänderte Sichtweise beim Übergang zur Nanoskala <sup>[146]</sup>

Makro-Welt	Nano-Welt
Klassische Physik	Quantenmechanik
Festkörper-Eigenschaften	Bindungseigenschaften

Volumen dominierend	Oberfläche dominierend
Homogene Materialien	Inhomogene Materialmischungen
Einfache Miniaturisierung	Kombination mit Selbstorganisation
Statistische Ansammlungen	Individuelle Teilchen

Konkret bedeutet dies für Nanomaterialien, dass sie sich weniger die für Festkörper typischen Eigenschaften aufweisen, sondern vielmehr wie große Moleküle betrachtet werden können. Damit ändern sich die chemischen, elektronischen und optischen Eigenschaften oftmals drastisch mit der Partikelgröße, da Elektronen in diesen kleinen (Nano-)Objekten nur diskrete Zustände einnehmen können, welche von der Partikelgröße abhängen <sup>[4]</sup>. So können etwa Nichtleiter leitfähig werden oder Metalle zu Halbleitern <sup>[147]</sup>.

Neben diesem Effekt ist insbesondere der hohe Anteil an Oberflächenatomen von Bedeutung. Die Eigenschaften dieser Grenzfläche prägen durch den Kontakt mit der Umwelt das Reaktionsverhalten des Materials, jeder Austausch mit der Umwelt findet über sie statt. Bei makroskopisch großen Körpern nehmen die Oberflächenatome nur einen sehr geringen Prozentsatz ein und beeinflussen die Eigenschaften des Stoffes kaum. Nanopartikel hingegen bestehen zum größeren oder größten Teil aus Oberflächenatomen (siehe Abbildung 14), weshalb diese die Gesamteigenschaften des Stoffes nun signifikant bestimmen. Dabei besitzen sie auch andere Eigenschaften – der wichtigste Unterschied ist hierbei, dass an der Partikeloberfläche Atome bzw. Ionen mit koordinativ nicht abgesättigten Bindungs- und Koordinationsstellen vorliegen. Diese weisen folglich einen energetisch ungünstigeren (= angehobenen) Zustand und damit veränderte Eigenschaften auf. Bei Festkörpern mit quasi-unendlicher Kantenlänge spielt dieser Effekt keine Rolle, wohingegen bei Nanopartikeln, die wiederum zum allergrößten Teil aus Oberflächenatomen bestehen, die physikalisch-chemischen Eigenschaften durch den gestiegenen Anteil der Oberflächenenergie an der Gesamtenergie des Nanopartikels hingegen stark beeinflusst werden <sup>[4, 141, 148]</sup>. Anders ausgedrückt nehmen die Nanowissenschaften eine „Brückenfunktion“ zwischen der klassischen Physik mit ihren bekannten Effekten und der Quantenmechanik ein.

Zusammenfassend sind also sowohl Oberflächen- als auch Größenquantisierungseffekte für die besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien verantwortlich und viele größenunabhängige Eigenschaften, wie bspw. der Schmelzpunkt, werden nun größenabhängig. Eine exakte Übergangsgröße lässt sich dabei nicht definieren; diese hängt vom Material, dessen kristalliner Struktur und äußeren Bedingungen ab. Die allermeisten Änderungen finden im Bereich von 1 – 50 nm statt; größere Partikel zeigen oftmals eher makroskopisches Verhalten, kleinere eher molekulares. Die Effekte sind dabei abhängig von dem Material selbst – bspw. ändern sie ihre Farbe (veränderte Lichtabsorption) <sup>[149]</sup>, werden transparent <sup>[150]</sup>, härter <sup>[151]</sup>, superparamagnetisch <sup>[152]</sup>

oder steigern ihre katalytische Aktivität <sup>[136]</sup>. Ein prominentes Beispiel ist der Riesenmagnetowiderstand<sup>9</sup> (engl.: giant magnetoresist, GMR), dessen Entdeckung 2007 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. Es handelt sich dabei um ein Phänomen auf Nanoebene, welches die Fertigung moderner Festplatten mit hoher Speicherdichte ermöglicht <sup>[154, 155]</sup>.

### 5.4.3 Steigerung der (katalytischen) Aktivität

Nanomaterialien weisen aus mehreren Gründen interessante katalytische Eigenschaften auf, die bereits seit einigen Jahrzehnten genutzt werden, etwa in der heterogenen Katalyse in Autoabgaskatalysatoren oder in der Synthese vieler Petrochemikalien <sup>[99]</sup>. Der naheliegendste Grund für die gesteigerte Katalyseleistung ist natürlich die stark vergrößerte Oberfläche der Materialien. Über die reine Oberflächenvergrößerung hinaus sind aber noch weitere Effekte zu erwähnen, die ebenfalls einen Einfluss auf die Eigenschaften des Katalysators ausüben. In der Literatur werden insbesondere die koordinativ und elektronisch stark ungesättigten Oberflächenatome erwähnt <sup>[156]</sup>; MOSER ET AL. <sup>[157]</sup> nennen darüber hinaus noch die bessere elektrische Leitfähigkeit und Ionenmobilität der nanokristallinen Oberfläche, eine höhere Konzentration von Fehlstellen und Gitterdefekten an der Partikeloberfläche sowie eine höhere Dichte koordinativ ungesättigter Eckatome als weitere Gründe für die gesteigerte katalytische Aktivität.

An einem Beispiel sollen diese Effekte und der Nutzen für die Katalysechemie im Folgenden erläutert werden. WALT DE HEER <sup>[158]</sup> konnte bereits 1993 zeigen, dass das Ionisierungspotenzial von Metallclustern mit sinkender Clustergröße steigt. Des weiteren belegen Ergebnisse von KODAS und HAMPDEN-SMITH <sup>[159]</sup>, dass sich mit der Partikelgröße auch die Struktur der Oberfläche ändern kann<sup>10</sup>, was Auswirkungen auf die entsprechende Struktur der aktiven Zentren nach sich zieht. Betrachtet man nun diese beiden Aspekte, werden Potenziale für die Effizienzsteigerungen von Katalysatoren deutlich. Abgestimmte, nanokristalline Li/MgO-Katalysatoren zeigen bereits bei 300 °C eine vergleichbare Aktivität und eine höhere Selektivität bei der oxidativen Umwandlung von Methan zu höheren Kohlenwasserstoffen wie konventionelle Li/MgO-Systeme bei 500 °C <sup>[160]</sup>. Dies zeigt eindrucksvoll, dass allein durch eine geschickte Wahl der Partikelgröße Ionisierungspotenzial, Aktivzentren und Gesamtoberfläche in vielen Fällen optimal auf die jeweiligen Anforderungen eingestellt werden können.

---

<sup>9</sup> Auf Festplatten werden Informationen mit hoher Dichte magnetisch gespeichert. Je höher dabei die Informationsdichte, desto schwerer wird es, einzelne Abschnitte (bzw. Magnetfelder) wahrzunehmen und somit auszulesen. Durch abwechselnde Nanoschichten aus magnetischen und nichtmagnetischen Metallen am Lesekopf (bspw. Eisen-Chrom und Cobalt-Kupfer) wird, vereinfacht ausgedrückt, die Empfindlichkeit für kleinste Magnetfelder erhöht, sodass größere Speicherdichten ermöglicht werden <sup>[153]</sup>.

<sup>10</sup> Manche Stoffe tendieren bei sinkender Partikelgröße zu einer Phasenumwandlung; Beispiele hierfür sind Niob, Molybdän, Wolfram und Tantal, welche im Bulk-Zustand das thermodynamisch stabile kubisch-raumzentrierte Gitter ausbilden. Fällt die Partikelgröße unter 5 – 10 nm, findet eine Phasenumwandlung in das kubisch-flächenzentrierte oder hexagonale Gitter statt, da diese eine geringere Oberflächenenergie und ein geringeres spezifisches Volumen aufweisen. Dadurch können neue Materialeigenschaften entstehen oder alte Eigenschaften verloren gehen; Bariumtitanat verliert zum Beispiel auf diese Weise in nanoskaliger Form seine ferroelektrischen Eigenschaften <sup>[99]</sup>.

Ein simpleres und praxisnäheres Beispiel ist der Vergleich der antimikrobiellen Eigenschaften von Silber-Partikeln und Silber-Nanopartikeln. Auch hier bewirken die deutlich vergrößerte Oberfläche sowie die besonderen Eigenschaften der Oberflächenatome ein gesteigertes Ionisierungspotenzial – als Folge bilden sich weitaus mehr Silber-Ionen als dies bei größeren Partikeln der Fall wäre. Demzufolge werden Silber-Nanopartikel etwa in Kosmetika eingesetzt (siehe Kap. 7.2.1).

Weitere Anwendungsbeispiele nanoskaliger Katalysatoren finden sich in der Literatur <sup>[161]</sup>.

## 5.5 Synthesestrategien und Stabilisierung

Rote Gold-Nanopartikel werden bereits seit der Spätantike zum Färben von Glas verwendet <sup>[110]</sup>, eine bewusste und gezielte Synthese von nanoskaligen Materialien wurde allerdings erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts untersucht, als die Kolloidchemie sich erstmals im größeren Maßstab mit Nanomaterialien befasste <sup>[112]</sup>.

In der heutigen Zeit ist eine Vielzahl an Synthesemöglichkeiten bekannt und Nanomaterialien können mit chemischen und physikalischen Verfahren aus der Gasphase, der flüssigen Phase und auch aus Festkörpern hergestellt werden. Im Falle der oben angesprochenen Gold-Nanopartikel existiert bspw. sogar ein simpler Schülerversuch zur Darstellung in einer Mikrowelle <sup>[130, 162]</sup>.

Gleichzeitig mit dem Verständnis und den Darstellungsmöglichkeiten von Nanomaterialien sind allerdings auch die Komplexität und Präzision der Anforderungen an moderne Funktionsmaterialien gestiegen und für ausgewählte Anwendungen werden daher exakt abgestimmte Materialien, sog. *tailored nanomaterials*, synthetisiert <sup>[102]</sup>. In vielen Fällen können allerdings dank der heutzutage deutlich gesteigerten Kontrolle über die Syntheseprozesse auch mit klassischen Verfahrenstechniken präzise gefertigte Nanomaterialien erhalten werden <sup>[4]</sup>. Ein Beispiel, welches auch in der Chemiedidaktik aufgrund seines Struktur-Eigenschafts-Zusammenhangs vielfach Beachtung gefunden hat, sind Cadmiumselenid-Nanopartikel (siehe Abbildung 16). Unter anderem aufgrund ihrer intensiven Fluoreszenz mit einer hohen Quantenausbeute von über 90 % finden sie Verwendung in Monitoren und Displays. Die Fluoreszenz tritt in einem engen Partikelgrößenbereich auf (ca. zwischen 2 und 8 nm), die Farbe ist abhängig von der Partikelgröße, bereits ein halber Nanometer bewirkt einen sichtbaren Unterschied <sup>[162]</sup>. Durch jahrzehntelange Optimierung der Syntheseparameter können diese Partikel auch in industriellen Maßstäben in Fällungsreaktionen mit hoher Reproduzierbarkeit und geringer Partikelgrößenverteilung hergestellt werden <sup>[108]</sup>.



Abbildung 16 – Fluoreszenz von Cadmiumselenid-Nanopartikeln mit unterschiedlichen Partikelgrößen zwischen 2 nm (links) und 8 nm (rechts) <sup>[108]</sup>.

### 5.5.1 Synthesestrategien

Ungeachtet der Komplexität und der Vielzahl an beschriebenen Darstellungsmöglichkeiten handelt es sich bei der Herstellung von Nanomaterialien in vielen Fällen um einen zweistufigen Prozess – die Synthese und die Stabilisierung (siehe Abbildung 17).

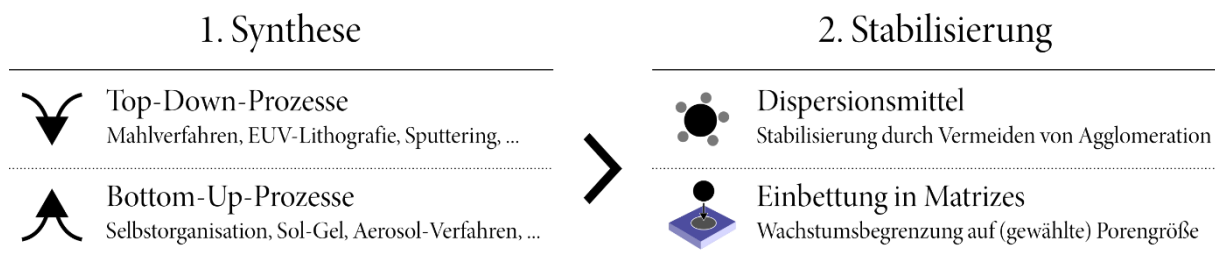


Abbildung 17 – Ausgewählte Beispiele für Strategien zur Synthese von Nanomaterialien und Möglichkeiten für deren Stabilisierung.

Der erste Schritt beschreibt dabei die Synthese nanoskaliger Materialien. Hier kann grundsätzlich unterschieden werden zwischen

**Top-Down-Synthesestrategien:** In Top-Down-Prozessen werden aus größeren Strukturen kleinere Strukturen erzeugt. Ein Beispiel für einen solchen Vorgang ist das Mahlen von Partikeln. Hierbei werden üblicherweise Hochenergie-Kugelmøhlen mit Mahlkörpern aus Wolframcarbid oder Stahl verwendet, um die Korngröße der gewünschten kristallinen Ausgangsmaterialien (ca. 50  $\mu\text{m}$ ) durch Kollision mit den Mahlkörpern um maximal den Faktor  $10^4$  zu verkleinern <sup>[163]</sup>. Dieses Verfahren fordert jedoch einen hohen Energieaufwand und ebenfalls einen hohen Abrieb der verwendeten Mahlkörper. Ein weiterer Nachteil ist eine breitere

Partikelgrößenverteilung als bei anderen Methoden. Weitere Beispiele für Top-Down-Prozesse sind etwa die *extreme ultraviolet lithography* („EUV-Lithografie“, verwendet für die Fertigung von Computerprozessoren <sup>[164]</sup>), bei der nanoskalige Strukturen mit einem fokussierten Laserstrahl in das Zielmaterial „geschrieben“ werden, oder die Kathodenzerstäubung („Sputtern“, Erzeugung einer nanoskaligen Metallschicht, bspw. auf REM-Proben)

und

**Bottom-Up-Synthesestrategien:** In Bottom-Up-Prozessen werden entsprechend gegenteilig aus kleineren Strukturen größeren Strukturen erzeugt. Sehr relevant in diesem Zusammenhang ist das Sol-Gel-Verfahren; dieses beschreibt die Fällung von Substanzen aus der Lösung. Innerhalb weniger Millisekunden bilden sich sehr kleine molekulare Cluster (Primärpartikel, Keime), welche anschließend zu größeren Agglomeraten wachsen <sup>[108]</sup>. Abhängig von den Reaktionsbedingungen (Grad der Übersättigung) werden dabei mono- oder polydisperse Teilchen erhalten. Auch wenn die ablaufenden Prozesse fachwissenschaftlich nicht abschließend geklärt sind <sup>[108]</sup>, erlaubt dieses Verfahren nicht nur präzise Verteilungen der Partikeldurchmesser, es kann auch mit einfachsten apparativen Mitteln durchgeführt werden. Aus diesen und weiteren Gründen wird ihre Eignung für den Einsatz im Chemieunterricht und in Schülerlaboren im späteren Verlauf dieser Arbeit untersucht (siehe Kap. 7).

Abbildung 18 illustriert exemplarisch beide Synthesestrategien, die EUV-Lithografie stellvertretend für Top-Down-Ansätze sowie die Selbstorganisation eines Dendrimers <sup>[165]</sup> als Bottom-Up-Prozess.

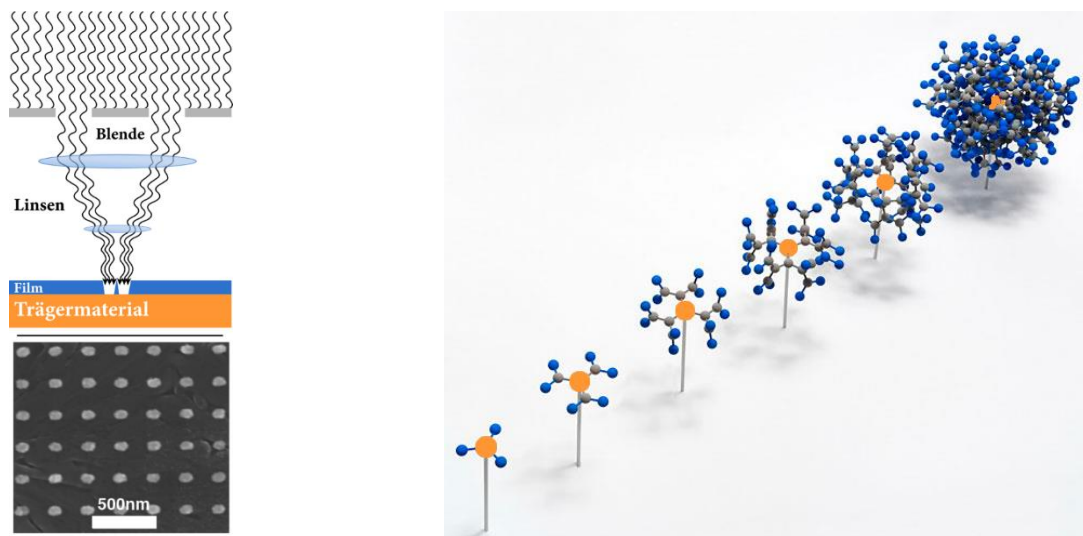


Abbildung 18 – Links: Prinzip der EUV-Lithografie (oben), sowie nanostrukturiertes Produkt (unten) <sup>[166]</sup>. Rechts: Selbstorganisation eines Dendrimers, modifiziert nach <sup>[167]</sup>.

Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit; eine vollständige Auflistung sämtlicher Verfahren zur Herstellung von Nanomaterialien ist darüber hinaus auch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Eine weiterführende gute Übersicht bieten einschlägige Lehrbücher <sup>[4, 99, 100]</sup>.

### 5.5.2 Partikelwachstum

Im Anschluss an die Synthese der Nanomaterialien ist gegebenenfalls ein Wachstum der Partikel zu beobachten. Dies betrifft insbesondere Nanopartikel, die aufgrund des geringen Durchmessers einen großen Anteil an koordinativ ungesättigten Oberflächenatomen besitzen (siehe Kap. 5.4.2), wohingegen nanostrukturierte Materialien weniger betroffen sind (siehe Kap. 5.3). Thermodynamisch gesehen ist eine Minimierung des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses aufgrund des geringeren Anteils an Oberflächenatomen günstiger, weshalb Nanopartikel bereits nach kurzer Zeit agglomerieren <sup>[152]</sup>.

Der Wachstumsprozess wird hierbei durch ein Oberflächengleichgewicht zwischen Adsorption und Desorption einzelner Molekülbausteine kontrolliert. Innerhalb dieses Gleichgewichts überwiegt bei kleineren Partikeln die Desorption dieser Bausteine <sup>[168]</sup>. Große Partikel wachsen hingegen, wodurch sie ihre Oberflächenenergie zunehmend minimieren. Erreichen die kleineren Partikel durch die fortwährende Desorption einen kritischen Radius, werden sie energetisch instabil und lösen sich auf (KELVIN-Instabilität). Das Wachstum der größeren Partikel endet, sobald die Oberflächenenergie soweit minimiert wurde, dass stabile Partikel erhalten werden (siehe Abbildung 19).

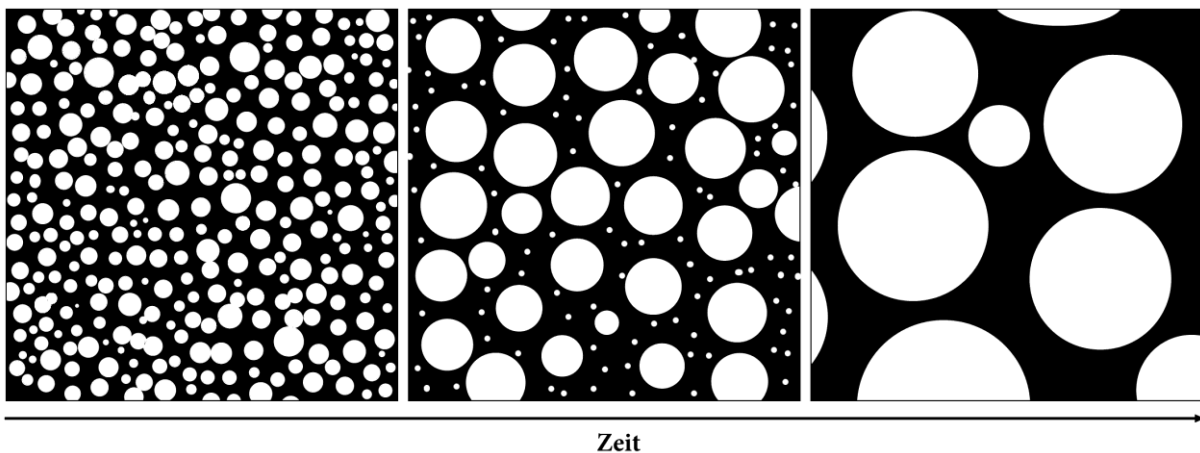


Abbildung 19 – Vereinfachtes Modell des Partikelwachstums zu dem Prozess der OSTWALD-Reifung, verändert nach <sup>[126]</sup>.

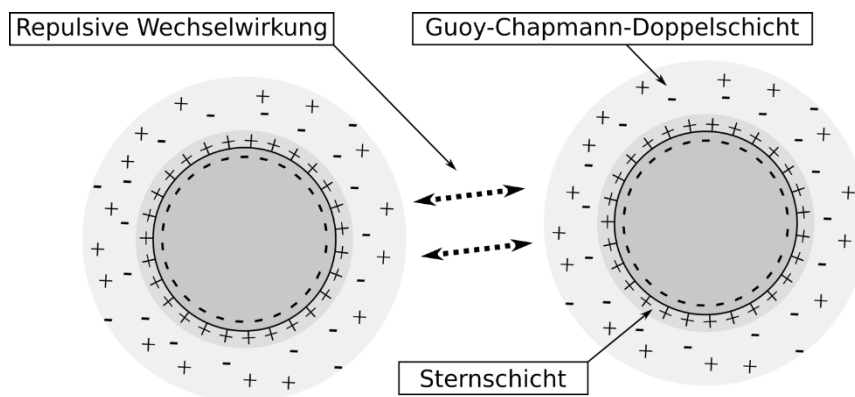
### 5.5.3 Stabilisierung von Nanopartikeln

Um die Eigenschaften von Nanomaterialien langfristig zu erhalten, müssen sie aus diesem Grund innerhalb kurzer Zeit nach der Synthese im zweiten Schritt stabilisiert werden. Hierfür existieren wie für die Synthese ebenfalls mehrere Strategien (siehe Abbildung 17), von denen zwei wichtige Methoden im Folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Die erste Möglichkeit ist die Verwendung eines geeigneten Dispersionsmittels. Durch die Anlagerung bzw. Zugabe weiterer Stoffe, wie etwa Tenside, Phosphane oder Polymere, können die Diffusionsprozesse, welche für das Partikelwachstum verantwortlich sind, nach dem Erreichen der gewünschten Größe verlangsamt oder nahezu vollständig unterbrochen werden <sup>[4, 169]</sup>.



Hierbei bilden viele Dispersionsmittel eine umlagernde elektrostatische Doppelschicht um die Nanopartikel aus, welche einerseits aus der starren Sternschicht und andererseits aus der diffusen GUOY-CHAPMANN-Doppelschicht besteht (siehe Abbildung 20). Durch repulsive Wechselwirkungen der Partikel bzw. ihrer umlagernden Schichten kann auf diese Weise eine Agglomeration verlangsamt bzw. verhindert werden <sup>[170]</sup>.



**Abbildung 20 – Stabilisierung von Nanopartikeln mit geladenen Dispersionsmitteln. Vereinfachte Darstellung der Sternschicht, GUOY-CHAPMANN-Doppelschicht und der repulsiven Wechselwirkungen.**

Weitere Optionen bieten etwa die Wahl des Lösemittels, welches ebenfalls einen direkten Einfluss auf Diffusionsgeschwindigkeit und damit Partikelwachstum ausübt, oder auch der Einsatz von weiteren Stabilisatoren, die etwa durch eine Komplexierung der Nanopartikel wirken <sup>[4, 171, 172]</sup>.

Die zweite Möglichkeit bietet die Einbettung von Nanopartikeln in eine stabilisierende Matrix. Diverse Nanopartikel können einerseits etwa in aushärtende Materialien (wie Lacke, Glas, ...) eingearbeitet werden oder andererseits in eine poröse Trägermatrix <sup>[136]</sup>. Die (in vielen Fällen genau abgestimmte) Porengröße begrenzt auf diese Weise das Partikelwachstum und die gewünschten Eigenschaften bleiben langzeitstabil erhalten.

Im späteren Verlauf dieser Arbeit finden diese Verfahren in entsprechenden Experimenten Anwendung; so wird etwa das Wachstum von Zinkoxid-Nanopartikeln (Kap. 7.1.2) durch umlagernde Hydroxid-Ionen oder das von Gold-Nanopartikeln durch Citrat-Ionen (Kap. 7.2.2.5) verlangsamt. Darüber hinaus werden in einem weiteren Experiment Mangan(IV)-oxid (Braunstein) in einer nanoporösen Silica-Matrix eingelagert und stabilisiert (Kap. 7.2.3.3).

## 5.6 Charakterisierungsmethoden von Nanomaterialien

Für nahezu alle Bereiche der Nanowissenschaften nimmt die Charakterisierung der Produkte selbstverständlich eine zentrale Rolle ein. Sie ist nicht nur für die Messung und Beschreibung der Eigenschaften relevant, sondern auch für das Verständnis der in der Nanodimension ablaufenden Prozesse und nicht zuletzt im Hinblick auf mögliche Gefährdungspotenziale durch Nanomaterialien (siehe folgendes Kap. 5.7).

Durch die Vielzahl an Nanomaterialien und –strukturen und den damit zusammenhängenden diversen Eigenschaften existiert folglich eine ganze Bandbreite an Methoden für die Charakterisierung von Nanomaterialien. Tabelle 5 bietet einen groben Überblick einiger ausgewählter Methoden, geordnet nach dem jeweils zu untersuchenden Merkmal. Diese Aufzählung umfasst vier essentielle Merkmale, welche für eine Betrachtung in Schule, Schülerlabor und Hochschule ebenfalls relevant sein könnten, und ist damit bei weitem nicht erschöpfend; detailliertere Informationen mit Beispielen und Anwendungsfeldern finden sich insbesondere bei WEGNER und PRATSINIS<sup>[99]</sup>.

Tabelle 5 – Auswahl der Charakterisierungsmethoden von Nanomaterialien<sup>[99]</sup>.

<b>Merkmal</b>	<b>Mögliche Charakterisierungsmethode(n)</b>
Partikelgröße	Mögliche Methoden sind die Dynamische Lichtstreuung (Dynamic Light Scattering, DLS), Partikel-Massenspektrometrie, Röntgendiffraktion, Elektronenmikroskopie. Für Partikel mit Durchmessern um 100 nm kann auch eine Sedimentationsanalyse durchgeführt werden; diese beruht auf der Partikelgrößenabhängigkeit der Sinkgeschwindigkeit.
Oberfläche und Porosität	Für monodisperse, sphärische und unporöse Partikel erfolgt die Oberflächenmessung üblicherweise durch Gasadsorption und anschließender Analyse mit Brunauer-Emmett-Teller Isotherme. Mit der Gassorption (üblicherweise Stickstoffsorption) kann die Porosität und Porengrößenverteilung bis in den mikroporösen Bereich <sup>11</sup> bestimmt werden.
Kristallinität	Angewandt wird vor allem die Röntgendiffraktometrie. Die mittlere Kristallitgröße im Bereich von etwa 3 – 50 nm kann im Anschluss aus den Messdaten mithilfe der Scherrer-Gleichung berechnet werden.
Strukturaufklärung	Elektronenmikroskopie wird angewandt, um die Partikelgröße sowie die Morphologie aufzuklären. Im Vergleich zur Röntgendiffraktometrie können hier auch nichtkristalline (amorphe) Strukturen von Primärpartikeln untersucht und dargestellt werden. Unterschieden wird hier noch zwischen Transmissions-elektronenmikroskopen und Rasterelektronenmikroskopen. Eine angeschlossene EDX-Einheit ( <i>energy dispersive X-ray spectroscopy</i> , energiedispersive Röntgenspektroskopie) ermöglicht zusätzlich noch die Bestimmung der Probenzusammensetzung.

Die in der Tabelle aufgeführten Charakterisierungsmethoden ermöglichen genaue, quantitative Messungen; es ist jedoch in vielen Fällen möglich, die Eigenschaften von Nanomaterialien auch mit einfachen Mitteln qualitativ oder sogar halbquantitativ zu untersuchen. Im Falle der oben

<sup>11</sup> Um die Vielfalt poröser Stoffe zu klassifizieren, unterteilt die IUPAC poröse Materialien anhand ihres Porendurchmessers in mikroporöse, mesoporöse und makroporöse Materialien. Mikroporöse Materialien verfügen über Poren mit einem Durchmesser, der kleiner als 2 nm groß ist. Kap. 7.2.3.2 befasst sich ausführlicher mit porösen Materialien.

genannten Cadmiumselenid-Nanopartikel (siehe Abbildung 16) kann mithilfe der literaturbekannten Fluoreszenzfarben Rückschlüsse auf die Partikelgröße gezogen werden, sowohl qualitativ („Handelt es sich um Nanopartikel?“) und halbquantitativ („Welche ungefähre Partikelgröße besitzen diese Partikel im Mittel?“).

Neben der Fluoreszenz bietet bspw. auch der Tyndall-Effekt die Möglichkeit, vorliegende Nanopartikel mit einer Laserquelle im wässrigen oder gasförmigen Medium nachzuweisen. Dieser Effekt beruht darauf, dass das Licht an Teilchen gestreut wird, die eine ähnliche Abmessung wie die Lichtwellenlänge besitzen (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21 – Tyndall-Effekt einer klaren, wässrigen Lösung eines Tensides.

## 5.7 Anwendungsfelder

Durch die oben erläuterten Effekte ergibt sich eine Fülle an neuen Möglichkeiten, welche über eine Vielzahl von Anwendungsgebieten reichen, angefangen bei elektronischer Tinte über den Retina-Chip bis zu selbstreinigenden Oberflächen <sup>[53]</sup>. Im Anhang (A1.1) wird versucht, ohne Anspruch auf Vollständigkeit erheben zu wollen, einen ungewichteten Überblick über möglichst viele Anwendungsmöglichkeiten und -bereiche zu geben.

Im Hinblick auf die Intention der fachlichen Klärung erfolgt nun eine Gewichtung von Anwendungsgebieten der Nanowissenschaften und -technologie. Die Auswahl erfolgte dabei unter dem Gesichtspunkt, möglichst die bedeutendsten Anwendungsfelder zu veranschaulichen; Kriterien waren hierbei die Anzahl der Publikationen, die geschätzte wirtschaftliche Bedeutung (siehe Kapitel 3.1.2) sowie die öffentliche Wahrnehmung. Zu diesem Zweck wurden Fachbücher <sup>[4, 99, 100]</sup>, populärwissenschaftliche <sup>[23, 61, 101]</sup> sowie fachwissenschaftliche Übersichtsartikel <sup>[102–105]</sup> und Zeitungen (DIE ZEIT, DIE WELT) analysiert. Zudem wurden – im Hinblick auf die angestrebte Vermittlung des Themas in Schule und Hochschule – auch fachdidaktische Quellen <sup>[106–109]</sup> berücksichtigt. Die Resultate zeigen hauptsächlich Anwendungen in den Bereichen

- **Katalyse** (Photokatalytische Zersetzung <sup>[173]</sup>, Elektrokatalyse in Brennstoffzellen <sup>[174]</sup>),
- **Kosmetik** (UV-Filter in Sonnenschutzmitteln <sup>[175]</sup>, Cremes <sup>[176]</sup>),
- **Lumineszenz** (Quantum Dots für Displays <sup>[109]</sup>, farbtreue und „warme“ Leuchtmittel <sup>[177, 178]</sup>, Biomarker <sup>[179]</sup>, Solarzellen <sup>[180]</sup>),
- **Medizin** (Tumorbekämpfung <sup>[181]</sup>, targeted drug-delivery <sup>[182, 183]</sup>).

- **Nanostrukturierte Materialien** (Gasspeicherung <sup>[104]</sup>, Katalysatoren bzw. Trägermaterial für diese <sup>[184]</sup>, Filtration <sup>[185]</sup>, Energiespeicherung mit Superkondensatoren <sup>[105]</sup>),
- **Oberflächenbeschichtung** (Antimikrobiell <sup>[186]</sup>, hydrophob und hydrophil <sup>[187, 188]</sup>, Farblacke <sup>[189]</sup>),
- **Photonik** (Effizienzsteigerung bei Solarzellen <sup>[105]</sup>, Grätzelzelle <sup>[190]</sup>) und
- **Sensorik** (empfindlichere und reaktionsschnellere Gassensoren <sup>[137]</sup>, Dehnungssensoren <sup>[103, 191]</sup>, Drucksensoren <sup>[192]</sup>).

Darüber hinaus erfahren oftmals interdisziplinäre Forschungsergebnisse besondere Beachtung, die dem Bereich der Bionik zuzuordnen werden können, d.h. natürlichen Vorbildern nachempfunden sind. Bekannte Beispiele sind dabei der Lotoseffekt, die Haifischhaut und das Gecko-Tape.

Das Prinzip der selbstreinigenden Oberfläche von Lotos-Pflanzen (und weiteren, wie bspw. der Kapuzinerkresse; Abbildung 22 a) wird aktuell auf Displays, Wandfarben und Lacke übertragen. Hinter dem Begriff Haifischhaut verbirgt sich ein Lacksystem für Kraftfahrzeuge; welches durch Nanostrukturierung strömungsgünstige Oberflächen (siehe Abbildung 22 b) ähnlich denen eines Hais erzeugt und dadurch den Luft- bzw. Strömungswiderstand verringert. Ungefähr 3 % Kraftstoff kann auf diese Weise bei Schiffen, Autos und Flugzeugen eingespart werden – dies entspricht zum Beispiel knapp 17 Tonnen Kohlenstoffdioxid bei einem einzigen Transatlantikflug einer Boeing 747 <sup>[193]</sup>. Das Gecko-Tape imitiert die optimalen Hafteigenschaften von pilzkopfförmigen Füßen und Organen von Blattkäfern (siehe Abbildung 22 c); diese sorgen für eine gleichmäßige Spannungsverteilung zwischen Oberfläche und Haftelement. Somit können bereits mit einer geringen Fläche (20 cm x 20 cm) eines solchen Klebebandes mehrere hundert Kilogramm getragen werden <sup>[194]</sup>.

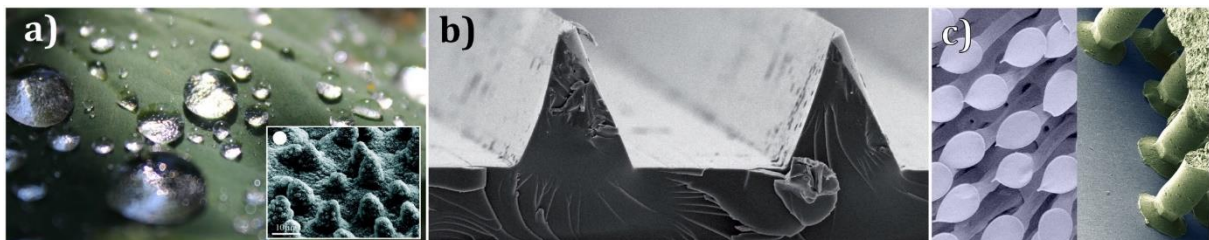


Abbildung 22 – a) Lotos-Effekt mit rasterelektronischer Aufnahme der Oberfläche eines Lotos-Blattes (Inset) <sup>[195]</sup>; b) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der nanostrukturierten "Haifischhaut" <sup>[193]</sup>; c) rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von pilzkopfförmigen Haftstrukturen eines männlichen Blattkäfers (links) und des Gecko-Tapes (rechts), dessen Haftelemente denen des Käfers nachempfunden sind <sup>[194]</sup>.

Für eine schulische Vermittlung bietet sich an dieser Stelle eine Fülle an Möglichkeiten, den fächerübergreifenden Charakter dieses Forschungsfeldes an diesen oder weiteren Beispielen aufzugreifen und zu reflektieren. Sowohl die oben angeführten Anwendungsbereiche als auch die bionische Forschung bieten reichlich Anknüpfungspunkte an klassische Inhalte des Kerncurriculums. Die thematische Breite dieser Querschnittstechnologie bietet zudem die Möglichkeit, nahezu beliebige Inhalte aus den Jahrgangsstufen 7-13 anhand von Kontexten aus dem Bereich der Nanotechnologie zu vermitteln.

## 5.8 Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt

In engem Zusammenhang mit der im vorherigen Kapitel beschriebenen Entwicklung und Nutzung von Nanomaterialien steht eine begleitende Risikobewertung derselben. Aus den neuen Eigenschaften dieser Materialien in nanoskaligen Dimensionen ergeben sich entsprechend auch neue Gefährdungspotenziale. Insbesondere im Hinblick auf den Einsatz in sensiblen Domänen, wie etwa bei Kosmetik, Nahrungsmitteln („*functional food*“) oder der Medizin, spielt diese Gefährdungsbeurteilung eine wichtige Rolle. Diese ist aber in vielen Fällen nicht abschließend wissenschaftlich geklärt; insbesondere fehlt es aufgrund der bisherigen kurzen Einsatzdauer an Langzeitstudien. Somit ist die Belastbarkeit des vorliegenden Forschungsstandes begrenzt. In Kapitel 3.1.3 wurde dieser Aspekt auch im Zusammenhang mit regulatorischen Verordnungen bereits ausführlicher aus gesellschaftlicher Perspektive im Hinblick auf den Bedarf nach einer Nanoscience Education beleuchtet. Im Folgenden sollen ergänzend dazu mögliche Toxizitäten aus fachwissenschaftlicher Sicht diskutiert werden. Aufgrund ihrer Vielfalt soll dabei nur auf wenige spezielle Nanomaterialien mit höherer Alltagsbedeutung eingegangen werden, anhand derer *par pro toto* übergeordnete Gefährdungspotenziale illustriert werden können.

### 5.8.1 Einfluss der Partikelgröße auf die Wirkung

Nanoskalige Materialien bzw. ultrafeine Partikel<sup>12</sup> können nachweislich chemische Reaktionen im Körper katalysieren oder anderweitig beeinflussen<sup>[4, 196]</sup>. Das hohe Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis verstärkt diesen Effekt noch weiter mit einer entsprechenden Verstärkung der negativen Auswirkungen im Falle einer ungewollten Exposition. Zudem wurden weitere partikelgrößenabhängige Interaktionen nachgewiesen (bspw. das Öffnen von Kalziumkanälen in Zellmembranen) oder vermutet (Wechselwirkungen mit der Replikation und Reparatur von DNA)<sup>[196]</sup>.

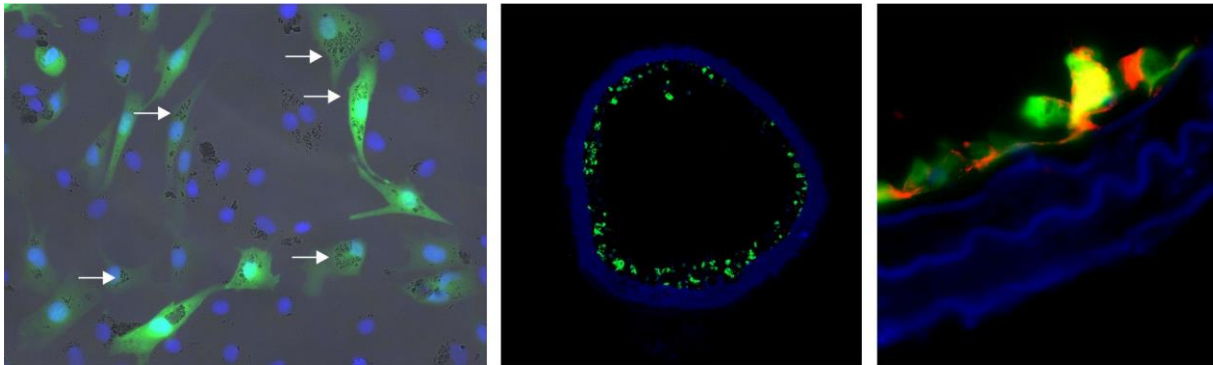
Auch hinsichtlich der Pharmakokinetik bzw. Toxikokinetik (Untersuchung der Aufnahme, Verteilung, Verstoffwechslung und Ausscheidung von Wirkstoffen im Körper) sind deutliche Unterschiede zu den entsprechenden Bulk-Materialien zu beobachten: Nach der Aufnahme gelangen die Partikel leichter in den Blutkreislauf und verteilen sich von dort aus systematisch im gesamten Körper. Dabei können einige Materialien aufgrund ihrer Größe selbst besonders geschützte Barrieren überwinden, wie die Plazenta und die Blut-Hirn-Schranke<sup>[197, 198]</sup> – mit bislang unbekanntem Folgen.

Darüber hinaus können sie auch sehr leicht durch unspezifische Interaktion mit der Zellmembran in den Zellinnenraum gelangen<sup>[4]</sup>. Dieser Effekt wird in medizinischen Anwendungen ausgenutzt, etwa wenn diese sog. Carrier Wirkstoffe, Proteine oder andere Moleküle gezielt in Zel-

---

<sup>12</sup> In toxikologischen Betrachtungen wird der Begriff „Ultrafeine Partikel“ oftmals mit dem Begriff „Nanopartikel“ gleichgesetzt. Eine fest definierte Unterscheidung existiert hierbei nicht. PASCHEN ET AL. schlagen daher in diesem Zusammenhang vor, bewusst hergestellte Materialien im Nanometerbereich – die gezielt neue Eigenschaften aufweisen – als Nanopartikel zu bezeichnen, wohingegen ultrafeine Partikel eher unbeabsichtigt bei Verbrennungsprozessen oder auf mechanischem Weg entstehen<sup>[4]</sup>.

len transportieren sollen. Hierfür werden unter anderem Kohlenstoffmodifikationen (Diamantide) verwendet, um das Risiko der Überreste und Abbauprodukte für die Zelle einschätzen zu können und möglichst gering zu halten <sup>[151]</sup>. Abbildung 23 zeigt ein Beispiel, bei dem mit Hilfe von Nanopartikeln eNOS-Enzyme zur Bekämpfung von Arteriosklerose in den Zellinnenraum dirigiert werden <sup>[199]</sup>.



**Abbildung 23 – Fluoreszenz-markierte Zellen mit Nanopartikeln:** Blau dargestellt sind die Zellkerne, grün die Fluoreszenzmarkierung. Die Nanopartikel in den Zellen sind mit Pfeilen markiert (links). Die mittlere Abbildung zeigt ein Blutgefäß, das mit diesen Zellen (grün) besiedelt wurde. Rechts eine Detailaufnahme einer Gefäßwand mit Markierung des eingeschleusten Wirkstoffes (eNOS-Enzym) <sup>[199]</sup>.

Die ungesteuerte Aufnahme von Nanopartikeln und deren Verhalten im Zellinnenraum ist hingegen oftmals problematisch – in vielen Fällen wurde das Verhalten der Noxe bislang nicht oder nicht ausführlich untersucht. Resultate einer Studie hingegen zeigen, dass nanoskaliges Titandioxid in vitro wesentlich größere Mengen des Enzymes Myeloperoxidase binden, als entsprechend größere Teilchen <sup>[200]</sup>. Auch wenn sich aus diesem Ergebnis keine allgemeinen Aussagen zur gesteigerten Toxizität von Nanomaterialien im Zellinneren ableiten lassen können, sollte bis zum Beleg des Gegenteils vorsichtshalber davon ausgegangen werden, dass eine erhöhte Reaktivität von Nanomaterialien auch im Körper und Zellinnenraum auftritt.

Zuletzt spielt auch die Morphologie von Nanopartikeln eine wesentliche Rolle. Zu diesem Zweck werden in der Literatur mit großer Häufigkeit Carbon Nanotubes erwähnt, welche bereits vielfach untersucht wurden. Carbon Nanotubes sind lungengängige Nanofasern, welche eine strukturelle Ähnlichkeit zu Asbest-Fasern (Krokydolith) weisen. Beide Materialien sind nicht per se krebserregend, als entscheidend gilt das Verhältnis des Durchmessers zu der Länge (high aspect ratio): Sind die Fasern dünn genug, um in die Lungenbläschen vordringen zu können (im Nanometerbereich) und gleichzeitig lang genug (bis ca. 20  $\mu\text{m}$ ), können sie nicht problemlos von der unspezifischen Immunabwehr (Makrophagen bzw. „Fresszellen“) aufgenommen und abgebaut werden <sup>[201]</sup>. Dies führt wiederum zu Entzündungsreaktionen, welche mit einer teilweise erheblichen Latenzzeit schließlich unter anderem zu Lungenkrebs führen kann („Asbestose“) <sup>[202, 203]</sup>. In einer 2009 von BONNER veröffentlichten Studie zeigten allerdings einige Carbon Nanotubes im Lungengewebe von Mäusen vergleichbare Wirkungen wie Asbest (siehe Abbildung 24 links) <sup>[204]</sup>.



### 5.8.2 Expositionsquellen und Aufnahmepfade

Über Lebensmittel, Kosmetika oder auch Feinstaub kommen Menschen bereits heute vielfach in Kontakt mit Nanopartikeln, z. B. wenn diese als Farbstoffe oder UV-Filter eingesetzt werden. Hierzu hat auch die Tatsache geführt, dass Inhaltsstoffe, die in makroskopischen Abmessungen als unbedenklich eingestuft wurden, keine erneute Zulassung für die Verwendung in nanoskaliger Form beantragen müssen. Die häufigsten Aufnahmepfade von Nanomaterialien in den menschlichen Körper verlaufen inhalativ über die Lunge (pulmonal - Feinstaub), durch Verschlucken (oral - Lebensmittel) oder durch die Haut (dermal - UV-Filter) [4].

Die medial oftmals thematisierte [205], schädliche Wirkung von Feinstaub nach einer **pulmonalen Aufnahme** in die Lunge und weitere Bereiche des Körpers gilt inzwischen als erwiesen [206]; ultrafeine bzw. Nanopartikel sind zudem verstärkt in der Lage, Entzündungsreaktionen hervorzurufen (siehe oben). Darüber hinaus existieren Hinweise, dass sie in höheren Dosen zudem chronische Krankheiten wie Asthma verschlimmern und (auch unabhängig von ihrer Morphologie) Lungenkrebs hervorrufen können [207, 208]. Abbildung 24 (rechts) zeigt die Anlagerung von Nanopartikeln an die Zellkerne menschlicher Lungenzellen.

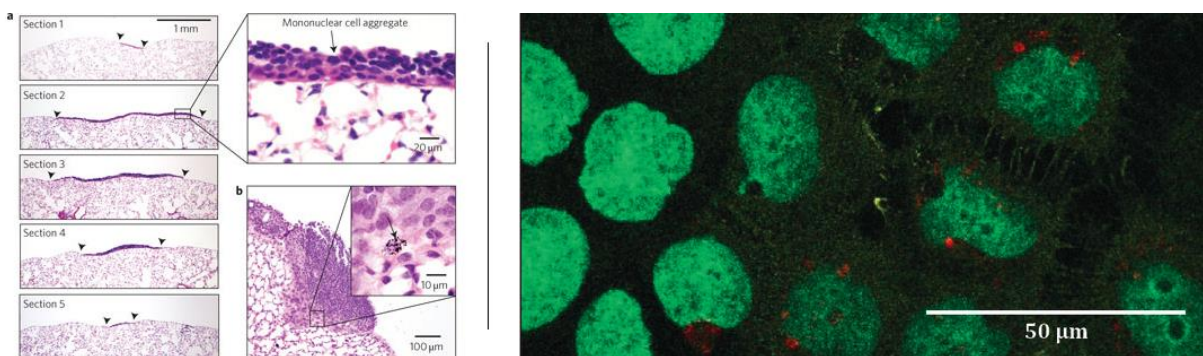


Abbildung 24 – Links: Sequenzielle Querschnitte (Abstand: 100 µm) eines mononuklearen Zellaggregates aus dem Rippenfell einer Maus, einen Tag nach der Exposition mit Carbon nanotubes ( $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Färbemittel: Hematoxylin und Eosin, 40fache Vergrößerung. Insets zeigen Vergrößerungen (400fach). Rechts: Menschliche Lungenzellen (Zellkerne, grün) und Nanopartikel (rot) [209].

Im Zusammenhang mit den abgebildeten Resultaten ist aber anzumerken, dass sehr hohe Dosierungen gewählt wurden; vergleichbare Expositionen im Alltag erscheinen daher kaum realistisch, insbesondere, da die Partikel im Allgemeinen in gebundener Form verwendet werden.

Hinsichtlich der **dermalen Aufnahme** bietet die gesunde menschliche Haut einen wirkungsvollen Schutz gegen die Aufnahme von Fremdstoffen. Allerdings sind Nanopartikel unterhalb einer bestimmten Partikelgröße möglicherweise in der Lage, diese Barriere zu durchdringen. Aufgrund der weiten Verbreitung von Titandioxid- und Zinkoxid-Nanopartikeln als mineralische UV-Filter in Sonnencremes und Kosmetika ist dieser Aspekt weitestgehend gut untersucht. Der UNABHÄNGIGE WISSENSCHAFTLICHE AUSSCHUSSES FÜR VERBRAUCHERSICHERHEIT (SCCS) der EUROPÄISCHEN KOMMISSION beurteilt aufgrund der aktuellen Studienlage die Verwendung von Partikeln mit einem Durchmesser größer als 20 nm als sicher [210], da sie nicht in tiefere Hautschich-

ten vordringen konnten. Für Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 20 nm ist die wissenschaftliche Diskussion nicht abschließend geklärt. Ebenfalls ungewiss ist die Partikelaufnahme im Falle von verletztem oder erkranktem Hautgewebe.

Die Toxikokinetik von Nanopartikeln nach der **oralen Aufnahme** wurde modellhaft in vivo untersucht. HILLYER und ALBRECHT konnten in zwei Studien <sup>[211, 212]</sup> einen Zusammenhang zwischen der Partikelgröße und dem Verbleib im Körper zeigen. Hierzu wurden Mäusen Gold-Nanopartikel mit unterschiedlichen Partikelgrößen oral verabreicht (58, 28, 13 und 4 nm). Die größten Partikel fanden sich anschließend fast ausschließlich im Magen-Darm-Trakt; die mittelgroßen (13 nm) Partikel wurden dagegen hauptsächlich in Leber und Milz nachgewiesen. Die kleinsten Nanopartikel konnten schließlich in Nieren, Leber, Lunge und sogar Gehirn gefunden werden. Auch wenn diese Resultate ebenfalls nur eingeschränkt generalisierbar sind, sollten sie dennoch vorsichtshalber beachtet werden. Ein Beispiel in diesem Zusammenhang ist etwa die Zugabe von Silica-Nanopartikeln als Nahrungsergänzungsmittel zu Salz, welches aufgrund seiner hygroskopischen Eigenschaften die Rieselfähigkeit erhält <sup>[213]</sup>. Zwar sind bislang keine Gefahrenpotenziale dieses Materials nachgewiesen worden, allerdings existieren auch keine Langzeitstudien. Weitere Produkte, die ebenfalls Nanotechnologie verwenden, finden sich in einem Übersichtsartikel <sup>[125]</sup>.

### 5.8.3 Umwelt

Nanomaterialien, insbesondere Nanopartikel, können auch für die Umwelt ein nicht zu unterschätzendes Gefahrenpotenzial darstellen. Da das Ausbreitungsverhalten und die Auswirkungen auf die Umwelt kaum bekannt sind, können die resultierenden Langzeitfolgen ebenso schwerlich eingeschätzt werden. Die konkrete Gefährdungsbeurteilung eines Nanomaterials hängt von mehreren Faktoren ab (Reaktivität, Partikelgröße, Persistenz, Mobilität, Morphologie, Wasser- und Fettlöslichkeit, Lungen-/Kiemengängigkeit, Abbaubarkeit, etc.). Es wird aber allgemein davon ausgegangen, dass

- Nanopartikel aufgrund ihrer Größe vor allem auf dem Luftweg über weite Strecken transportiert und diffus verteilt werden können. Kontaminationen sind somit schwer zu lokalisieren und zu beseitigen.
- neue Materialien wie Carbon Nanotubes und Fullerene im Falle einer Freisetzung auf bislang ungeklärte Weise mit der Umwelt interagieren.
- in Zukunft die Produktion und Verbreitung von Nanomaterialien weiter ansteigen wird <sup>[4]</sup>.

Besonderes Augenmerk in diesem Zusammenhang liegt auf der Berücksichtigung der biologischen oder (photo)chemischen Abbaubarkeit der Materialien, sowie auf der Bioverfügbarkeit und der Bioakkumulation. Hier müssen ggf. komplexe Szenarien entworfen werden, um mögliche Folgen für Mensch und Umwelt zumindest eingrenzen zu können. Darüber hinaus sind auch die Menge und die Art der Freisetzung von großer Relevanz. Oftmals bestehen darüber hinaus Konflikte zum Einsatz von Nanomaterialien, bei denen Nutzen und möglichen Gefahren gegeneinander abgewogen werden müssen. Insofern stellen Umweltaspekte einen wesentlichen



Baustein bei der Entwicklung und dem Einsatz von Nanomaterialien dar und somit der Nanotechnologie allgemein dar. Es handelt sich zudem um einen Bereich, wo die Interdisziplinarität des Themengebietes besonders deutlich hervortritt.

Ein ausgewähltes Beispiel für eine solche Kontroverse sind Silbernanopartikel, welche insbesondere von MENTHE aus fachdidaktischer Perspektive beschrieben wurden <sup>[134, 214]</sup>. Nähere Informationen hierzu finden sich in Kapitel 7.2.1. Weiterhin findet sich eine gute allgemeine Übersicht toxikologischer Betrachtungen von verschiedenen Nanomaterialien in der fachdidaktischen Literatur <sup>[215]</sup>.

## 5.9 Konzepte für die Vermittlung von „Nano“

In dem bisherigen Verlauf des Kapitels wurde eine grundlegende Sachstruktur des Themenfeldes Nanotechnologie basierend auf diversen Quellen der fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Literatur erstellt. Aus dieser Sachstruktur können nun die Konzepte für die Vermittlung von „Nano“ abgeleitet werden. Diese sind unterteilt in (1) Konzepte zum grundlegenden Verständnis, (2) Konzepte zur Herstellung und Charakterisierung sowie (3) Konzepte zum Einsatz, Chancen und Risiken. Die Einteilung wurde so vorgenommen, dass Konzepte K1 – K4 die inhaltlichen Grundlagen umfassen und somit über das fachliche Verständnis einen Zugang zu dem Themengebiet „Nano“ ermöglichen. Über das elementare Verständnis hinaus befassen sich die Konzepte K5 und K6 mit der Herstellung, Stabilisierung und wissenschaftlichen Charakterisierungsmethoden von Nanomaterialien, was aufgrund der betrachteten nanoskaligen Dimensionen besondere Herausforderungen birgt. Von großer Bedeutung sind die Konzepte K7 und K8, welche nicht nur die Anwendungen in technischen Bereichen und insbesondere der eigenen Lebenswelt aufzeigen, sondern auch eine Bewertung ebendieses Einsatzes von Nanomaterialien im Hinblick auf Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt umfassen. Anzumerken bleibt, dass trotz der äußeren Unterteilung die Konzepte natürlich sehr stark miteinander vernetzt sind.

### Konzepte zum grundlegenden Verständnis (K1 – K4)

**K1: Grundlagen:** In diesem Konzept wird die interdisziplinäre Ausrichtung von „Nano“ als Querschnittstechnologie beschrieben. Eine kurze Beschreibung des gegenwärtigen Stellenwertes in Wirtschaft und Wissenschaft ermöglicht es SuS, die Bedeutung von „Nano“ in unserer aktuellen Gesellschaft einzuschätzen.

Darüber hinaus können optional eine historische Einführung sowie die zukünftigen Möglichkeiten für die Bewältigung von technischen, gesellschaftlichen und sozioökonomischen Herausforderungen thematisiert werden.

**K2: Größendimension:** Dieses Konzept umfasst die Entwicklung eines detaillierten Verständnisses der Größenordnung von Teilchen und Teilchenverbänden. Mithilfe dieses Verständnisses können SuS einerseits sicher zwischen makro-, mikro- und submikroskopischer Ebene unterscheiden und andererseits die „Nanodimension“ korrekt be-

schreiben. In diesem Zusammenhang erscheint es sinnvoll, SuS die Nanoskala über einen Vergleich mit bekannten Objekten ihrer Lebenswelt erfahrbar zu machen (bspw. einem menschlichen Haar).

**K3: Morphologie und Struktur:** Dieses Konzept umfasst die Kenntnisse verschiedener Morphologien von Nanomaterialien (Partikel, Fasern, Fullerene, Plättchen, nanostrukturierte Materialien, ...). Darüber hinaus werden auch strukturelle Eigenschaften in Zusammenhang mit der geringen Partikelgröße thematisiert, wie etwa das hohe Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis als charakteristische Eigenschaft von Nanomaterialien.

**K4: Größenabhängige Eigenschaften:** Im Fokus dieses Konzepts stehen insbesondere Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge von Nanomaterialien, wie bspw. die Änderung der wahrgenommenen Farbe von Nanopartikeln in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers. Neben gesteigerten, veränderten oder neuen Eigenschaften von Nanomaterialien (bspw. elektrische oder magnetische Kräfte) umfasst dieses Konzept für fortgeschrittene Lernende auch Quanteneffekte, wie etwa diskrete Energieniveaus oder die Fluoreszenz von Quantum Dots. Als weiteres Beispiel kann auch das oberflächendominierte Verhalten von Nanopartikeln dienen, wie etwa katalytische Eigenschaften oder die Herabsetzung des Schmelzpunkts.

### Konzepte zur Herstellung und Charakterisierung (K5 – K6)

**K5: Synthese und Stabilisierung:** Unter diesem Konzept sind übergeordnet die grundlegenden zwei Synthesestrategien für die Erzeugung von Nanomaterialien – Top-Down- und Bottom-Up-Prozesse – zusammengefasst. Des Weiteren können die SuS mehrere Synthesemethoden innerhalb dieser Strategien kennen lernen, wie etwa Sol-Gel-Verfahren, Mahlprozesse, EUV-Lithografie oder Templatierungsverfahren (Soft- bzw. Hard-Matter-Templating). Hierbei können im Zusammenhang mit der Ostwald-Reifung problemorientiert auch Verfahren zur Stabilisierung von Nanopartikeln behandelt werden.

**K6: Charakterisierungsmethoden:** Im Zusammenhang mit der betrachteten Größendimension werden innerhalb dieses Konzeptes entsprechende wissenschaftliche Verfahren für die Charakterisierung der Partikel thematisiert. Besonders interessant sind an dieser Stelle einfache, schulisch durchführbare Methoden, wie etwa die Tyndall-Probe sowie einfache Nachweise im Zusammenhang mit Partikelgröße-Eigenschafts-Zusammenhängen (bspw. halbquantitative Charakterisierung anhand der Fluoreszenzfarbe von Nanopartikeln). Darüber hinaus können optional auch fortschrittlichere Methoden vereinfacht thematisiert werden, wie etwa rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen oder die Pulver-Röntgendiffraktometrie.

### Konzepte zum Einsatz, Chancen und Risiken (K7 – K8)

**K7: Anwendungsfelder:** Das Konzept der Anwendung von Nanotechnologie oder nanotechnologisch veränderten Produkten spielt eine wichtige Rolle für die Vermittlung

dieses Themengebietes. Der Fokus liegt dabei bevorzugt auf Anwendungsfeldern in der eigenen Lebenswelt; aber auch technische Produkte und Einsatzgebiete sind dabei nicht zu vernachlässigen.

**K8: Chancen und Risiken - Gefährdungsbeurteilung von Nanomaterialien:** Abschließend ist die Bewertung des in K8 beschriebenen Einsatzes von Nanomaterialien von großer Bedeutung. Hierbei sollen für die Verwendung von Nanotechnologie in verschiedenen Einsatzgebieten, von *functional food* bis hin zur Wasserfiltration, Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt herausgearbeitet und fachlich reflektiert abgewogen werden.

Tabelle 6 stellt eine entsprechende Übersicht dar mit Verweis auf die entsprechenden Kapitel innerhalb dieser Arbeit.

Tabelle 6 – Grundlegende Konzepte für die Vermittlung von „Nano“. Essentielle Aspekte sind dabei fett markiert, darüber hinaus sind vertiefende Aspekte aufgeführt.

<b>Konzept</b>	<b>Inhalte</b>	<b>Kapitel</b>
K1: Grundlagen	Interdisziplinäre Ausrichtung, historische Einführung, wirt- und wissenschaftliche Bedeutung	5.1
K2: Größendimension	Definition, Größendimension von Nanomaterialien	5.2
K3: Morphologie und Struktur	Struktur, Aufbau sowie Morphologien von Nanomaterialien, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis	5.3
K4: Größenabhängige Eigenschaften & Quanteneffekte	Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge, Oberflächenge-steuerte Reaktionen (Katalyse), elektrische und magnetische Kräfte von nanoskaligen Objekten, inter- und intramolekulare Wechselwirkungen. Quanteneffekte, diskrete Energieniveaus, Quantum Dots	5.4
K5: Synthese und Stabilisierung	Synthesestrategien (Top-Down vs. Bottom-Up), Syntheseverfahren von Nanomaterialien, Partikelwachstum und -stabilisierung (Ostwald-Reifung)	5.5
K6: Charakterisierungsmethoden	Methoden und Verfahren zur Charakterisierung wesentlicher Merkmale von Nanomaterialien (Partikelgröße, Oberfläche, ...)	5.6
K7: Anwendungsfelder	Alltagsprodukte, Anwendungen in wissenschaftlichen und technischen Feldern	5.7
K8: Chancen und Risiken - Gefährdungsbeurteilung von Nanomaterialien	Gefährdungspotenziale für Mensch und Umwelt (im Zusammenhang mit verschiedenen Anwendungsfeldern von Nanomaterialien), Bezüge zur aktuellen Forschung	5.7 5.8

Zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit konnte in der einschlägigen Literatur keine ähnliche Untersuchung im deutschsprachigen Raum für eine vergleichende Diskussion gefunden werden. Der englischsprachige Raum hingegen bietet diese Möglichkeit – 2009 analysierten STEVENS, SUTHERLAND und KRAJCIK unter Vermittlungsabsicht die fachlichen Strukturen des Themenfeldes „Nanotechnologie“. Hieraus erarbeiteten sie neun Konzepte („*Big Ideas*“), welche unterteilt in vier Felder unterteilt und in einem Guidebook<sup>[3]</sup> von der NATIONAL SCIENCE TEACHERS ASSOCIATION herausgegeben wurden:

### **1. „The Foundational Science Content**

- 1.1. Size and Scale
- 1.2. Structure of Matter
- 1.3. Forces and Interactions
- 1.4. Quantum Effects

### **2. Applying the Foundational Science Content**

- 2.1. Size-Dependent Properties
- 2.2. Self-Assembly

### **3. Moving Nanoscience Education Forward**

- 3.1. Tools and Instrumentation
- 3.2. Models and Simulations

### **4. Nanoscience Education and Society**

- 4.1. Science, Technology, and Society“

Im Folgenden soll verglichen werden, inwiefern die beiden Untersuchungen inhaltlich und strukturell übereinstimmen. Tabelle 7 bietet einen detaillierteren Einblick in beide Übersichten, darüber hinaus stellt Abbildung 25 beide Sachstrukturen unter der Fragestellung der inhaltlichen Zuordnung von Themengebieten in Konzepte gegenüber.

Tabelle 7 – Vergleich der ermittelten Sachstruktur mit den "Big Ideas of Nanoscale Science"<sup>[3]</sup>.

<b>Big Idea</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Inhalte</b>	<b>Konzept</b>
-	(Grundlagen werden hier nicht als eigenes Konzept aufgeführt)	Interdisziplinäre Ausrichtung, historische Einführung, wirt- und wissenschaftliche Bedeutung	K1: Grundlagen
Size and Scale	Factors relating to size and geometry (e.g., size, scale, shape, proportionality, dimensionality) help describe matter and predict its behavior	Definition, Größendimension von Nanomaterialien	K2: Größen-dimension
Structure of Matter	Materials consist of building blocks that often form a hierarchy of structures. Atoms interact with each other to form molecules. The next higher level of organization involves atoms, molecules, or nanoscale structures interacting with each other to form nanoscale assemblies and structures.	Struktur, Aufbau sowie Morphologien von Nanomaterialien, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis	K3: Morphologie und Struktur
Forces and Interactions	All interactions can be described by multiple types of forces, but the relative impact of each type of force changes with scale. On the nanoscale, a range of electrical forces with varying strengths tends to dominate the interactions between bonds.	Oberflächengesteuerte Reaktionen (Katalyse), elektrische und magnetische Kräfte von nanoskaligen Objekten, inter- und intramolekulare Wechselwirkungen.	K4: Größenabhängige Eigenschaften und Quanteneffekte
Quantum Effects	Different models explain and predict the behavior of matter better, depending on the scale and conditions of the system. In particular, as the size or mass of an object becomes smaller and transitions through the nanoscale, quantum effects become more important.	Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge (bspw. Cadmiumselenid-Nanopartikel), Quanteneffekte, diskrete Energieniveaus, Quantum Dots	
Size-Dependent Properties	The properties of matter can change with scale. In particular, during the transition between the bulk material and		

	individual atoms or molecules – generally at the nanoscale – a material often exhibits unexpected properties that lead to new functionality.		
Self-Assembly	Under specific conditions, some materials can spontaneously assemble into organized structures. This process provides a useful means for manipulating matter at the nanoscale.	Synthesestrategien (Top-Down vs. Bottom-Up), Syntheseverfahren von Nanomaterialien, Partikelwachstum und -stabilisierung (Ostwald-Reifung)	K5: Synthese und Stabilisierung
Tools and Instrumentation	The development of new tools and instruments helps drive scientific progress. Recent development of specialized tools has led to new levels of understanding of matter by helping scientists detect, manipulate, isolate, measure, fabricate, and investigate nanoscale matter with unprecedented precision and accuracy.	Methoden und Verfahren zur Charakterisierung wesentlicher Merkmale von Nanomaterialien (Partikelgröße, Oberfläche, ...)	K6: Charakterisierungsmethoden
Models and Simulations	Scientists use models and simulations to help them visualize, explain, predict, and hypothesize about the structures, properties, and behaviors of phenomena (e.g. objects, materials, processes, systems). The extremely small size and complexity of nanoscale targets make models and simulations useful for the study and design of nanoscale phenomena.	(Modelle sind hier kein eigenes Konzept, jedoch fester Bestandteil aller vorgestellten Konzepte)	-
-	-	Alltagsprodukte, Anwendungen in wissenschaftlichen und technischen Feldern	K7: Anwendungsfelder
Science, Technology, and Society	The advancement of science involves developing explanations for how and why things work and using technology to apply that knowledge to meet objectives, solve problems, and answer questions of social interest., Because nanotechnology is an emerging science, it provides an	Gefährdungspotenziale für Mensch und Umwelt (im Zusammenhang mit verschiedenen Anwendungsfeldern von Nanomaterialien), Bezüge zur aktuellen Forschung	K8: Chancen und Risiken - Gefährdungsbeurteilung von Nanomaterialien

opportunity to witness and actively participate in scientific progress and in decision making about how to use new technologies.

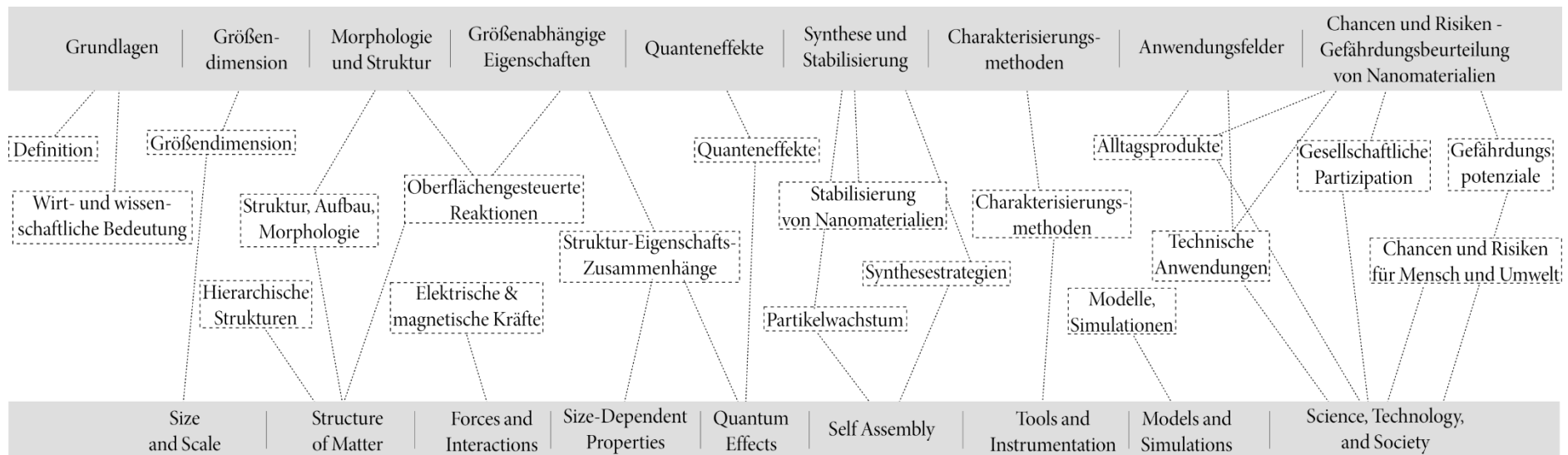


Abbildung 25 – Grafische Übersicht der Inhalte und Konzepte.

Sowohl die grafische als auch die tabellarische Übersicht zeigt eine hohe Übereinstimmung auf inhaltlicher Ebene. Zwar werden einige Themengebiete unterschiedlichen Konzepten zugeordnet, der überwiegende Teil entspricht jedoch dem Ergebnis von STEVENS, SUTHERLAND und KRAJCIK. Zudem ist die Konzeptuelle Einteilung der Inhalte für eine unterrichtliche Betrachtung auch von eher nachrangiger Bedeutung. Somit zeigen beide Untersuchungen vergleichbare Ergebnisse und die in diesem Kapitel erarbeitete Sachstruktur kann somit als eine Grundlage für die Konstruktion von Unterrichtsprojekten und –materialien eingesetzt werden.

## 6 Erfassung von Lerner- und Lehrerperspektiven

Im bisherigen Verlauf wurde der gegenwärtige und zukünftige Stellenwert der Nanotechnologie gemeinsam mit den Chancen einer Nanoscience Education illustriert, zudem wurde eine fachliche Klärung des Themengebietes vorgenommen. Es scheint allerdings wenig zielführend, Materialien und Experimente für schulische und außerschulische Vermittlungszusammenhänge auf dieser Basis zu erstellen, ohne dabei die Lernerperspektive zu berücksichtigen. Insbesondere vor dem Hintergrund dieses fachlich anspruchsvollen Themengebietes, welches zusätzlich aufgrund der Größendimensionen hohe Ansprüche an die Vorstellungskraft der SuS stellt, ist die Identifizierung und Berücksichtigung von Vorwissen und Präkonzepten von besonderem Interesse. Auch affektive Komponenten („*affective variables*“), wie etwa das Interesse, sich mit der Thematik zu befassen, besitzen einen wesentlichen Einfluss<sup>[94]</sup>. Im MDR nimmt die Erfassung von Lernerperspektiven aus ebendiesen Gründen eine elementare Rolle für die spätere Konstruktion von Unterrichtsmaterialien ein<sup>[87, 97]</sup>. In diesem Abschnitt wird daher die Erfassung von Lernerperspektiven zum Thema Nanotechnologie beschrieben.

### 6.1 Empirische Studie zu Lernerperspektiven<sup>13</sup>

#### 6.1.1 Theoretische Überlegungen, Methodenwahl und Forschungsfragen

Ausgehend von dieser Zielsetzung sollen zunächst konkrete Forschungsfragen hergeleitet werden. Bei diesem Prozess müssen einige Vorüberlegungen und Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. Was kann eine empirische Erhebung in diesem konkreten Fall leisten und was nicht? So stellen sich unter anderem die Fragen, welche Erkenntnisse für die didaktische Rekonstruktion von großem Nutzen sein können (und welche nicht) und ob in der Literatur bereits Voruntersuchungen veröffentlicht wurden.

Eine Literaturrecherche zur Erhebung von Schülervorstellungen und Präkonzepten zu Nanotechnologie im deutschsprachigen Raum weist auf einen großen Forschungsbedarf in diesem Themenbereich hin. Auch wenn in den gängigen fachdidaktischen Journalen bereits einige Experimente und Unterrichtseinheiten veröffentlicht wurden, so finden sich nahezu keine empirischen Voruntersuchungen.

Da bislang kaum gesicherte Erkenntnisse zu diesem Themengebiet vorliegen, sind für die vorliegende Zielsetzung dieser Arbeit insbesondere grundlegende Untersuchungen erforderlich. Eine vertiefte Analyse von eng fokussierten Fragestellungen ist dabei weniger zielführend als eine breitere Erhebung von Präkonzepten, Einstellungen und affektiven Komponenten. Ausgehend von diesen Vorüberlegungen und der oben genannten inhaltlichen Zielsetzung ergeben sich somit für die konkrete Untersuchung folgende Forschungsfragen:

1. Was stellen sich SuS unter dem Begriff „Nano“ vor (bspw. zur Größendimension)?

---

<sup>13</sup> Die Erfassung von Lernerperspektiven wurde zum Teil bereits im Rahmen der Masterarbeit des Autors<sup>[216]</sup> durchgeführt, die Ergebnisse (N = 100) hierzu wurden veröffentlicht<sup>[217]</sup>. Für die vorliegende Arbeit wurde die Stichprobe signifikant vergrößert (N = 268) und die erweiterten Ergebnisse wiederum veröffentlicht<sup>[1]</sup>.



2. Welche Anwendungsgebiete verbinden sie mit dem Begriff „Nano“?
3. Wie schätzen sie den Einfluss von „Nano“ auf ihr Leben ein?
4. Wie bewerten sie diesen Einfluss?
5. Wie schätzen die SuS ihren eigenen Kenntnisstand zum Themengebiet „Nano“ ein?
6. Sind die SuS an einer unterrichtlichen Behandlung dieses Stoffes interessiert?

Grundsätzlich leitet sich die Auswahl und auch die genaue Ausgestaltung der Untersuchungsmethode aus der oder den Forschungsfragen und der Natur des zu untersuchenden Forschungsgegenstandes ab<sup>[218]</sup>. Die Untersuchung der Kerncurricula in den Kapiteln 3.2 und 3.3 zeigen, dass nanotechnologische Unterrichtsinhalte aktuell nur in seltenen Fällen verpflichtend im Unterricht behandelt werden. Somit kann nicht davon ausgegangen werden, dass die SuS systematische Grundkenntnisse erwerben konnten. Entsprechendes Vorwissen und Präkonzepte zu diesem Themengebiet sollten demnach größtenteils aus anderen Quellen stammen. In Verbindung mit der wenig ergiebigen Studienlage werden für die vorliegende Studie folglich ein explorativer Ansatz und damit qualitative Methoden gewählt<sup>[219, 220]</sup>.

### 6.1.2 Forschungs- und Fragebogendesign

Für eine qualitative Datenerhebung stehen eine Vielzahl an Methoden (Interviewstudien, Gruppendiskussionen, *Mind-* und *Concept-Maps* uvm.) zur Verfügung. Im Hinblick auf die Eignung der Verfahren und die zur Verfügung stehenden Ressourcen (Zeit, Partnerschulen, ...) wurde ein *Paper-Pencil-Test* ausgewählt. Diese Methode erfordert eine hohe Strukturiertheit des Befragungsinhaltes im Vorfeld und bietet als Vorteil, dass sie leicht und kostengünstig durchzuführen ist und sich gut zur Befragung mittelgroßer Gruppen eignet. Literaturbekanntem Kritikpunkten, wie etwa der schwer zu kontrollierende Erhebungssituation, soll nach RAAB-STEINER und BENESCH<sup>[221]</sup> durch die Anwesenheit des Untersuchungsleiters bei der Erhebung entgegen gewirkt werden. Dies trägt zu einer höheren Vergleichbarkeit der Bedingungen bei.

Für die Konstruktion des Fragebogens steht der explorative Ansatz an erster Stelle – aus diesem Grund sollen die Fragen im Hauptteil generell möglichst offen gestaltet werden, um eine breite Vielfalt an Antworten und auch Vorstellungen bzw. Vermutungen zu erhalten. Geschlossene Fragen mit vorgegebenen Kategorien oder hybride Formen bieten diese Möglichkeit nur in geringem Umfang, sodass von diesen Antwortformaten abgesehen wurde.

Zu Beginn wurde eine kurze Einleitung verfasst, deren Ziel es war, die SuS auf die Thematik des Fragebogens einzustimmen. Es wurden so wenig Informationen wie möglich und so viele wie nötig gegeben, um keine etwaigen Antworten vorwegzunehmen oder vorzugeben. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, den Text wertungsfrei zu verfassen, um Antworttendenzen (beispielsweise *Akquieszenz*) zu vermeiden<sup>[222]</sup>:

*„Nano ist in aller Munde. Es handelt sich dabei um einen Oberbegriff für die Nanotechnologie und Nanomaterialien, welche in Wissenschaft und Medien einen immer größeren Stellenwert einnehmen.“*

Der erste Teil des Fragebogens umfasst vier Items:

1. Beschreibe bitte, was du dir unter dem Begriff „Nano“ vorstellst.
2. Wo glaubst du, kommt Nanotechnologie überall vor? Versuche – wenn möglich – Beispiele zu nennen.
3. Welchen Einfluss hat Nanotechnologie auf dein Leben? Inwiefern?
4. Wie bewertest du den Einfluss von Nanotechnologie?

Die Items wurden unter Berücksichtigung gängiger Konstruktionshinweise erstellt (formale Bedingungen, ansprechendes Layout, Prägnanz der Fragen, sinnvolle Fragenabfolge etc.). Der Vorteil dieses Antwortformates – ausführlichere und detailliertere Antworten – kann aber auch gleichzeitig ein Nachteil sein; für einige SuS ist es angenehmer und/oder leichter, vorgegebene Antworten auszuwählen, als einen Fließtext zu verfassen<sup>[221]</sup>. Aus diesem Grund wurde der Fragebogen kurz und einfach gehalten, um möglichst viele Teilnehmer zu ausführlichen Antworten zu motivieren und einer Verfälschung aufgrund der zu raschen Bearbeitung entgegenzuwirken.

In zwei abschließenden Fragen schätzen die SuS ihre eigenen Kenntnisse zu diesem Themengebiet sowie ihr Interesse an einer unterrichtlichen Behandlung ein. Aufgrund der begrenzten Antwortmöglichkeiten bieten sich an dieser Stelle Multiple-Choice-Fragen an:

1. Wie schätzt du deine Kenntnisse im Bereich „Nanotechnologie“ ein? (Antwortmöglichkeiten: Viele, Einige, Kaum, Keine)
2. Würdest du gerne mehr über das Thema „Nanotechnologie“ im Unterricht erfahren? (Antwortmöglichkeiten: Ja, Nein)

Die Platzierung am Ende des Fragebogens ist dadurch begründet, dass die SuS durch die vorherige Bearbeitung der offenen Fragen ihren Kenntnisstand zu und ihr Interesse an „Nano“ reflektieren können, bevor sie antworten. Um eine Tendenz zur Mitte zu verringern, wurde für Frage 5 eine gerade Zahl an Antwortmöglichkeiten gewählt.

Vor der Datenerhebung wurde ein Pretest (N = 20) durchgeführt, um zu untersuchen, ob

- die geplante Bearbeitungszeit angemessen war,
- die Fragen eindeutig und verständlich gestellt wurden,
- der Fragebogen auf die Zielgruppe abgestimmt ist und
- mit den vorliegenden Fragen die eingangs gestellten Hypothesen beantwortet werden können<sup>[221]</sup>.

Der Pretest lieferte im Hinblick auf die Anforderungen ein zufriedenstellendes Resultat; lediglich die Bearbeitungszeit musste angepasst werden. Der gesamte Fragebogen findet sich im Anhang (A2.1).

### 6.1.3 Resultate

Die vorliegenden Resultate wurden von SuS (N = 268) an verschiedenen Gymnasien und einer Gesamtschule in Norddeutschland in den Klassenstufen 7 – 12 erhalten. Die Antworten wurden dabei zunächst Frage für Frage gesammelt, systematisiert und anschließend bei Eignung kategorisiert, um inhaltsgleiche oder –ähnliche Aussagen zusammenzufassen und daraus Schluss-

folgerungen ziehen zu können. Zur Steigerung der Objektivität erfolgte die Auswertung der Fragebögen zusätzlich von einer zweiten Person. Die wichtigsten Ergebnisse sollen im Folgenden präsentiert werden.

**(1) Beschreibe bitte, was du dir unter dem Begriff „Nano“ vorstellst.**

*Intention:* Auch wenn der Chemieunterricht das Thema Nanotechnologie bislang nur selten aufgreift, nimmt es in den Medien oder im Alltag einen immer größeren Stellenwert ein. Frage 1 zielte darauf ab, entsprechende Präkonzepte zu erfassen. Darüber hinaus sollten auch allgemeine Vorstellungen erhoben werden.

*Resultate:* Die Auswertung der Daten zeigt, dass die Vorstellungen zum Begriff „Nano“ in Abhängigkeit vom Alter der SuS (qualitativ) stark divergieren. Jüngere Teilnehmende (insb. 7. Klasse) können einerseits seltener Vorstellungen beschreiben und zudem sind diese häufiger mit Fehlvorstellungen behaftet. So wird Nano häufig mit dem Begriff der „kleinsten Teilchen“ (kleiner oder gleich groß wie Atome) beschrieben oder auch zum Teil mit Begriffen wie Strom oder Licht verwechselt, wie die folgenden Schülerzitate zeigen:

*„Ich stelle mir unter dem Begriff ein bestimmtes Licht vor.“*

*„ ... kleinste Teilchen, die etwas mit Elektrizität zu tun haben.“*

*„Winzig kleine Partikel.“*

Einige SuS bringen dies zusätzlich in den Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontexten:

*„Darunter stelle ich mir eine Sache, zum Beispiel eine Wissenschaft in kleinstem Maße vor.“*

*„Unter dem Begriff „Nano“ stelle ich mir auf jeden Fall etwas sehr Kleines vor, als dass kleinste Teile verarbeitet werden.“*

*„Unter dem Begriff stelle ich mir etwas „Kleines“ vor, was in der Technologie einen großen Wert hat“.*

In den höheren Jahrgängen werden die Vorstellungen über „Nano“ konkreter formuliert und es finden vermehrt Einordnungen in eine Größendimension statt, teilweise über Vergleiche mit ähnlich großen Objekten:

*„Kleine Sachen (Molekül-/Atomgröße) – mit Elektronenmikroskop sichtbar“*

*„Nanotechnologie ist hochentwickelte Technik auf einem kleinen Raum.“*

*„Den Begriff „Nano“ verbinde ich mit sehr kleinen Dingen. Wenn ich mich nicht täusche, ist ein Nanometer 1 / 1.000.000 eines Meters.“*

Die korrekte Größendimension eines Nanometers ( $10^{-9}$  m) wird in Klasse 11 von einigen, in Klasse 12 von mehreren SuS richtig benannt. Eine Definition der Größendimension von Nanomaterialien (1 – 100 Nanometer) wird von keinem Teilnehmenden genannt.

**(2) Wo glaubst du, kommt Nanotechnologie überall vor? Versuche – wenn möglich – Beispiele zu nennen.**

*Intention:* In dieser Frage sollte zum einen Vorwissen in Form von bekannten Anwendungsgebieten, zum anderen die von SuS am häufigsten wahrgenommenen Einsatzfelder der Nanotechnologie ermittelt werden. Die Resultate können aufzeigen, ob und inwiefern Produkte der Nanotechnologie von SuS wahrgenommen werden. Darüber hinaus können die somit erhaltenen Lebensweltbezüge für die Gestaltung motivierender alltagsorientierter Zugänge für die zukünftigen Unterrichtsmaterialien verwendet werden.

*Resultate:* In den Jahrgängen 7 und 9 wird der Begriff „Nano“ oftmals mit neueren Entwicklungen aus dem technischen Bereich (EDV, Prozessoren, mp3-Player) in Verbindung gebracht (65 % der Antworten in diesen Jahrgängen), andere Domänen erhalten meist nur Einzelnennungen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die SuS Nanotechnologie häufig mit dem bekannten *iPod nano* oder den ebenfalls umworbenen Prozessoren<sup>14</sup> verbinden.

„Der einzige Gegenstand, der mir mit „Nano“ einfällt, ist: *iPod nano*.“

„Vielleicht bei Mikrochips“

In den höheren Jahrgängen 11 und 12 wird das Bild etwas differenzierter: Zwar dominieren auch hier technikbezogene Anwendungen (35 % der Nennungen), aber es werden fast doppelt so viele Anwendungsgebiete und Beispiele genannt, unter anderem in der Medizin (10 %) und Chemie (5 %). Gleichzeitig liegt eine breitere Verteilung an Schülernennungen bezüglich der Anwendungen vor (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8 – Häufigkeiten genannter bzw. vermuteter Anwendungen von Nanotechnologie in verschiedenen Jahrgängen.

Klassenstufe	Technik	Medizin	Textilien	Chemie	Oberflächen	Wissenschaften
<b>Klasse 7</b>	83 %	3 %	3 %	0 %	7 %	0 %
<b>Klasse 9</b>	46 %	3 %	3 %	3 %	0 %	22 %
<b>Klasse 11</b>	56 %	22 %	0 %	0 %	2 %	8 %
<b>Klasse 12</b>	35 %	13 %	9 %	11 %	9 %	7 %
<b>Gesamt</b>	55 %	10 %	9 %	5 %	4 %	4 %

<sup>14</sup> Der Abstand im Prozessorkern zwischen den einzelnen Transistoren bestimmt deren Dichte und damit die Rechenleistung. Die von Herstellern wie INTEL oder AMD explizit beworbenen Abstände befinden sich im Nanometerbereich. Die weitere Verwendung von EUV-Lithografie (siehe Kap 5.5.1) zur Herstellung von noch kleineren Abständen ist für kommende Prozessorgenerationen geplant <sup>[223]</sup>.

Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass in der Oberstufe fast alle SuS mindestens ein Anwendungsgebiet von Nanotechnologie nennen können. Zudem werden vereinzelt Hinweise auf Kenntnisse zur Wirkungsweise genannt:

*„Man kann Oberflächenstrukturen im Nanobereich anpassen, um gewisse Eigenschaften, zum Beispiel wasserabweisend, hervorzurufen.“*

*„Nano-Spray wird genutzt, um Schuhe wasserabweisend zu machen.“*

### **(3) Welchen Einfluss hat Nanotechnologie auf dein Leben? Inwiefern?**

*Intention:* Die Intention von Frage 3 war die Erfassung des konkreten, selbstbezogenen Einflusses von Nanotechnologie. Durch die Konkretisierung „Inwiefern“ sollten kurze Antworten nach Möglichkeit vermieden und die SuS ermutigt werden, ihre Einschätzungen zu erläutern oder zu begründen.

*Resultate:* Knapp die Hälfte (46 %) der SuS geben an, dass sie den Einfluss von Nanotechnologie auf ihr Leben zwar nicht genau beziffern können, dieser aber sicherlich groß sei.

*„Wahrscheinlich größer, als man vermutet. Doch ich habe keine Ahnung.“*

12 % gaben an, dass ihr Leben dadurch kaum beeinflusst werde.

*„Ich weiß es nicht genau. Ich glaube, dass Nanotechnologie eine nicht ganz so große Rolle in meinem Leben spielt.“*

Des Weiteren wird festgestellt, dass die Einschätzung der SuS oftmals in konkretem Zusammenhang mit nanotechnologischen Anwendung in technischen Bereichen steht.

*„Meiner Meinung nach kommt Nanotechnologie nur in elektronischen Geräten vor.“*

Ein großer Teil (42 %) konnte sich keine eigene Meinung bilden.

*„Ich weiß nicht, wieso man Nanotechnologie einsetzt, also kann ich mir auch nicht denken, inwiefern Nanotechnologie mein Leben beeinflusst.“*

SuS der Jahrgänge 11 und 12 lokalisieren den Einsatz von Nanotechnologie in einer größeren Anzahl von Anwendungsgebieten und schätzen den Einfluss tendenziell größer ein als die jüngeren Jahrgänge. Allerdings werden diese Einschätzungen nur in Ausnahmen durch Beispiele belegt. Zudem ist den Antworten keine klare Tendenz darüber zu entnehmen, welches Ausmaß SuS dem Einfluss von Nanotechnologie auf ihr Leben einräumen. Dem Großteil der SuS ist nicht bewusst, in welchem Maße sie bereits von Nanotechnologie umgeben sind und sie nehmen entsprechende Produkte in ihrer Lebenswelt oftmals nicht als solche wahr.

### **(4) Wie bewertest du den Einfluss von Nanotechnologie?**

*Intention:* In dieser Frage sollen Aspekte der Bewertung der SuS hinsichtlich der Nanotechnologie ermittelt werden. Wird der verstärkte Einsatz von Nanotechnologie (unreflektiert / begründet) befürwortet, werden (diffuse / konkrete) Bedenken geäußert? Von besonderem Interesse sind darüber hinaus bekannte Fälle zur öffentlichen Diskussionen um nanotechnologische Produkte, wie beispielsweise im Falle von JACK WOLFSKIN.<sup>15</sup>

*Resultate:* In den jüngeren Jahrgängen 7 und 9 bewerten die SuS den Einsatz von Nanotechnologie fast durchgängig positiv, meist jedoch ohne Angabe von konkreten Gründe (90 % der Antworten ohne Berücksichtigung derjenigen, die keine Bewertung abgeben konnten).

*„Ich bewerte ihn sehr gut!“*

*„Der Einfluss von Nanotechnologie ist gut, da alles moderner wird“*

*„Ich finde ihn wichtig, da ohne Nanotechnologie einige wichtige Dinge fehlen würden.“*

Es zeigt sich insgesamt die Tendenz, dass kaum Bedenken, Skepsis oder ein Risiko- und Gefahrenbewusstsein gegenüber neuen und teilweise unerforschten Technologien geäußert wird. In den wenigen Ausnahmen werden diese jedoch eher allgemein formuliert.

*„Es gibt immer positive und negative Argumente, die ich nicht kenne. Ich habe keine Ahnung.“*

*„Ich finde, dass die Nanotechnologie positive sowie negative Auswirkungen auf unser Leben haben kann. Sinnvoll ist, wenn sie ein Leben retten könnte, aber wenn sie im Medienbereich ein Leben abhängig macht vom Computer etc. sehe ich es als nicht sinnvoll.“*

Hervorzuheben ist, dass 72 % der SuS den Einsatz von Nanotechnologie ihrer Ansicht nach überhaupt nicht bewerten können.

In den älteren Jahrgangsstufen 11 und 12 ist ebenfalls eine insgesamt positive Einstellung zur Nanotechnologie erkennbar (86 % der Antworten ohne Berücksichtigung derjenigen, die keine Bewertung abgeben konnten). Viele SuS merken an, dass der Einfluss in Zukunft noch wachsen wird und bewerten dies ebenfalls positiv für Anwender und Umwelt. Darüber hinaus werden die Bewertungen zum Teil etwas differenzierter.

*„Sehr gut, da viele Geräte auf der Nanotechnologie basieren. Die Nanotechnologie ermöglicht erst die Nutzung vieler praktischer Geräte“*

*„Nanotechnologie ermöglicht Material- und energietechnische Optimierungen“*

Über mögliche Gefahren und Nebenwirkungen reflektieren nur sehr wenige SuS (3 %), in Einzelfällen werden sogar konkrete Sicherheitsbedenken geäußert

---

<sup>15</sup> Die Textilfirma JACK WOLFSKIN hat aufgrund der verstärkten öffentlichen Debatte 2010 ihre Nano-Tex-Produktreihe eingestellt (siehe Anhang A2.2).

„Bin mir nicht sicher, weil ich über negative Auswirkungen keine Kenntnis habe.“

„Silberpartikel → Lunge → Verträglichkeit?“.

### (5) Wie schätzt du deine Kenntnisse im Bereich „Nanotechnologie“ ein?

*Intention:* Mit dieser Frage soll eine Selbsteinschätzung der SuS zu ihrem fachspezifischen Leistungsstand erhoben werden. Eine Einschätzung der Teilnehmenden, einige oder viele Kenntnisse zu besitzen, kann darauf hindeuten, dass entsprechendes Wissen durch außerunterrichtliche Quellen erlangt wurde. Hieran könnten ggf. entsprechend angeknüpft werden.

*Resultate:* Abbildung 26 zeigt die Antworten aufgeschlüsselt nach Klassenstufen.

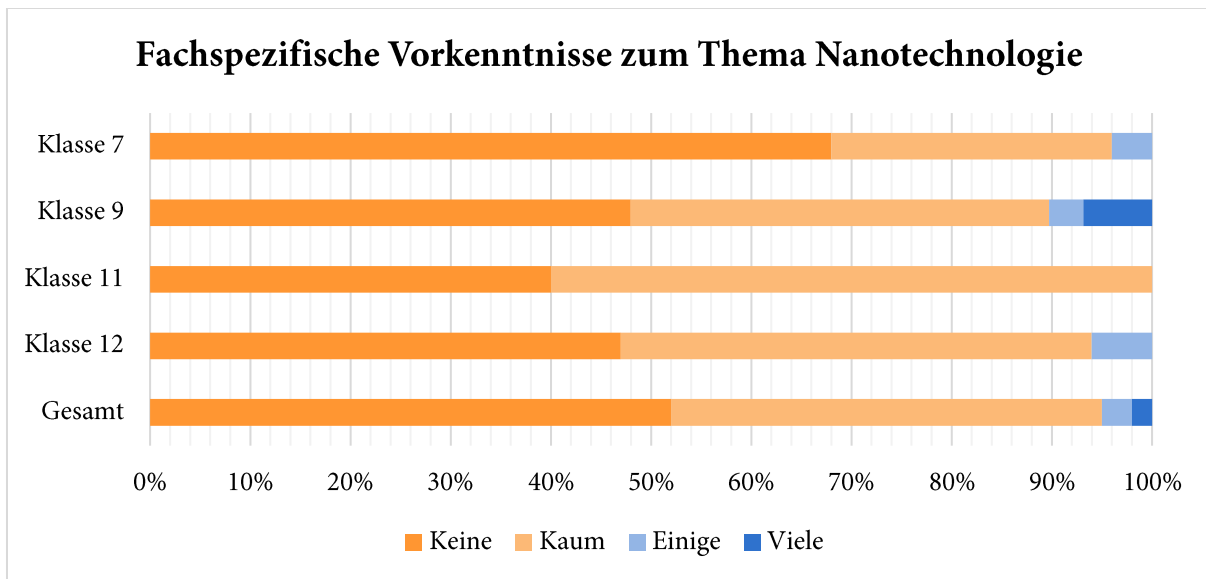


Abbildung 26 – Selbsteinschätzung der fachspezifischen Vorkenntnisse zum Thema Nanotechnologie von SuS.

52 % aller Teilnehmenden geben an, keine Kenntnisse zum Themenbereich Nano zu besitzen. 43 % haben kaum Kenntnisse, 5 % besitzen einige oder sogar viele Kenntnisse. 95 % – also fast alle SuS – geben demnach an, nichts oder nur sehr wenig über den Themenbereich „Nano“ zu wissen. Insgesamt zeigen sich über alle untersuchten Jahrgangsstufen hinweg vergleichbare Resultate.

### (6) Würdest du gerne mehr über das Thema „Nanotechnologie“ im Unterricht erfahren?

*Intention:* Frage 6 soll nach der Reflexion des eigenen Vorwissens, bekannter oder vermuteter Berührungspunkte mit der eigenen Lebenswelt und dessen Bewertung mit dem Interesse an einer unterrichtlichen Behandlung des Themengebietes Nanotechnologie eine affektive Komponente der SuS ermitteln.

*Resultat:* 87 % der SuS zeigen Interesse an der unterrichtlichen Behandlung des Themas im Chemieunterricht (siehe Abbildung 27).

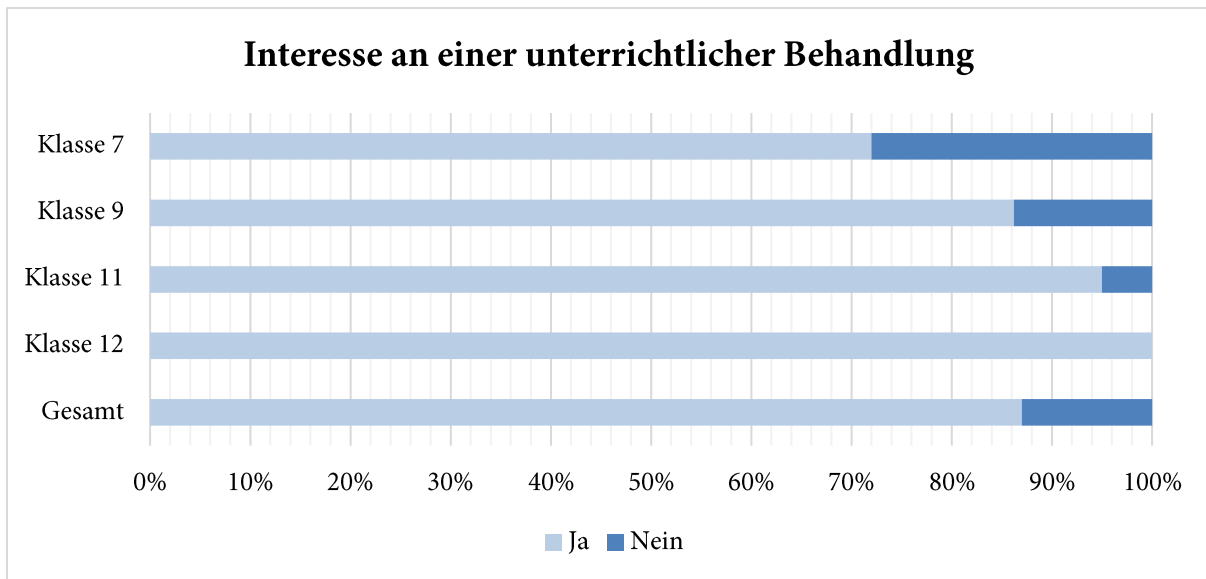


Abbildung 27 – Interesse der SuS an einer unterrichtlichen Behandlung des Themenfeldes Nanotechnologie in den Chemieunterricht.

#### 6.1.4 Lernerperspektiven für die Vermittlung von „Nano“

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen insgesamt, dass das Thema Nanotechnologie bis auf einige Schlagworte der großen Mehrheit der SuS nicht bekannt ist – damit reflektieren die Erkenntnisse der vorliegenden Studie die schwache Verankerung in den Schulcurricula. Darüber hinaus ergeben sich konkrete Lernerperspektiven bzw. Erkenntnisse für die Konstruktion von Unterrichtsmaterialien - im Folgenden sollen die Wichtigsten dargelegt werden.

**L1: Größendimension:** Es zeigt sich, dass in allen Jahrgangsstufen diverse Fehlvorstellungen bei den SuS vorliegen. Viele SuS und Studierende besitzen nur eine sehr vage Vorstellung von Nanotechnologie und insbesondere die Größendimension ist über die Jahrgangsgrenzen hinweg dem Großteil unklar. Sehr deutlich treten Probleme mit klaren Vorstellungen und korrekten Einschätzung der Größendimension insbesondere in jüngeren Klassenstufen hervor. Doch selbst in der Sekundarstufe II finden sich korrekte Einordnungen oder konkrete Größenbezeichnung (wie bspw.  $10^{-9}$  m) nur in Ausnahmefällen.

Dies ist besonders problematisch, da die Größendimension das Grundprinzip der Nanotechnologie (siehe Kap. 5) und somit einen Schlüssel für ihre Behandlung im Unterricht darstellt. Dieser Aspekt sollte daher frühzeitig in entsprechenden Unterrichtseinheiten aufgegriffen werden, um SuS nicht von Beginn an zu überfordert bzw. im Unklaren zu lassen. Methodisch bietet sich dabei die Entwicklung von geeigneten Modellen oder Visualisierungen an, um den SuS eine Vorstellung dieser schwer greifbaren Ausmaße zu vermitteln.

**L2: Anwendungen in Alltag und Technik:** Ein ähnliches Bild zeigt sich hinsichtlich der bekannten oder vermuteten Anwendungen von Nanotechnologie in der eigenen Lebens-



welt und anderen Bereichen. Als wesentliches Anwendungsfeld wurden mit großem Abstand (55 %) technische Bereiche vermutet; als konkrete Produkte wurden sehr häufig der „iPod nano“ und „Computerchips“ genannt. Hier zeigt sich besonders im Falle des iPods ein starker Einfluss von Werbung auf die Teilnehmer, da diese Produktbezeichnung vielmehr auf die geringe Größe des Gerätes anspielt denn auf die verwendete Technologie. Darüber hinaus zeigt sich, dass die SuS nur wenige Anwendungsgebiete kennen und kaum in der Lage sind, die Bedeutung dieser wichtigen Technologie einzuschätzen. Insgesamt konnte nur jeder sechste Teilnehmer Nanotechnologie oder Nanomaterialien in einem der hauptsächlichen Anwendungsgebiete (siehe Kap. 3.1.2, Abbildung 3) Medizin (10 %), Chemische Industrie (5 %), Nahrung und Kosmetik (je ca. 0,5 %) lokalisieren.

Im Wesentlichen waren vielen SuS demnach nur sehr wenige ihrer Berührungspunkte mit Nanotechnologie bewusst. Diese Erkenntnis steht einer Vielzahl von Produkten aus ihrem Alltag gegenüber, welche bereits Nanotechnologie enthalten. Die Alltagsorientierung ist natürlich eine grundlegende Säule der chemiedidaktischen Unterrichtsplanung, für das Themengebiet Nanotechnologie sind Alltagsanschlüsse jedoch von besonderer Bedeutung. Sie stellen eine besonders wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von Unterrichtsmaterialien dar, um die vorhandenen lebensweltlichen Berührungspunkte sichtbar und die gegenwärtige Bedeutung dieser Technologie greifbarer zu machen.

**L3: Fachwissen und Bewertung:** Trotz dieses fehlenden Bewusstseins schätzten knapp die Hälfte (46 %) der Teilnehmer, dass der Einfluss dieser Technologie „sicherlich sehr groß sei“, auch wenn sie ihn nicht genau beziffern können. Ein anderer großer Teil wollte aus diesem Grund keine Prognose wagen (42 %). Hinsichtlich der Reflexion und Bewertung von Nanotechnologie ist insgesamt eine deutliche positive Grundhaltung zur Nanotechnologie zu erkennen; allerdings beruht diese selten auf Wissen und wird kaum kritisch reflektiert. Hinsichtlich der hohen Nennung von technikbezogenen Anwendungsgebieten in den vorherigen Fragen liegt die Vermutung nahe, dass in vielen Fällen nur der Einsatz von Nanotechnologie in dieser relativ ungefährlichen Domäne bewertet wurde und problematischere Gebiete, wie der Einsatz in Kosmetika oder Lebensmitteln, nicht einbezogen wurden bzw. werden konnten. Insgesamt zeigt sich die Tendenz, dass kaum Bedenken, Skepsis oder ein Risiko- und Gefahrenbewusstsein gegenüber neuen und teilweise unerforschten Technologien geäußert wird. In den wenigen Ausnahmen werden diese jedoch eher allgemein formuliert.

Insgesamt zeigen sich eine sehr unkritische Haltung gegenüber neuen Technologien und ein diesbezügliches geringes Risikobewusstsein. Dass eine kritische Haltung hinsichtlich der fehlenden Langzeitstudien und des oftmals ungeklärten Gefahrenpotenzials angebracht wäre, ist allerdings im Hinblick auf bekannte Beispiele aus der Vergangenheit (Asbest, Contergan) unbestritten. Am Beispiel Nanotechnologie ist diese ausbleibende Kritik im Zusammenhang mit dem bekannten Fachwissen und Anwendungen zu sehen, die den SuS bekannt (oder eben nicht bekannt) sind. Ohne eine solche Wissensbasis ist eine

reflektierte Bewertung nur sehr schwer möglich und führte mit hoher Wahrscheinlichkeit zu den in dieser Umfrage erhaltenen Antworten.

Neben der Vermittlung der fachlichen Grundlagen und Alltagsanschlüsse ist demnach auch die Förderung einer kritischen Haltung des Einsatzes neuer Technologien von großer Bedeutung für die didaktische Rekonstruktion. Entsprechende Vernetzungsmöglichkeiten finden sich dabei sowohl in der fachlichen Struktur des Themengebietes (siehe Kap. 5.9) und im Kerncurriculum als dedizierter Kompetenzbereich Bewertung. Für die Förderung der Bewertungskompetenz bietet das Themengebiet dabei einen Fundus an passenden und alltagsorientierten Themen, wie etwa die Anwendung von Nanotechnologie in Lebensmitteln <sup>[125, 224]</sup>, was ein Risikobewusstsein für den kritischen Umgang mit neuen Technologien und besonders mit Nanomaterialien schaffen kann. Weitere leicht verständliche Beispiele aus dem täglichen Leben stehen reichlich zur Verfügung, die allerdings noch nicht für den Unterricht didaktisch umgesetzt wurden (Energie <sup>[193, 225, 226]</sup>, Medizin <sup>[151, 183, 227, 228]</sup>, Umwelt <sup>[229, 230]</sup> uvm.).

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die wesentlichen Erkenntnisse und nennt einige exemplarische Schüleraussagen.

Tabelle 9 – Übersicht der ermittelten Lernerperspektiven und Schlussfolgerungen mit Zitaten von SuS.

### Lernerperspektiven und Schlussfolgerungen

Lernerperspektive	Ergebnis / Schlussfolgerung	SchülerInnenzitate
<b>L1: Vorstellungen &amp; Größendimension</b>	• Probleme bei der Repräsentation nanoskaliger Größendimensionen	"... etwas sehr kleines" "... kleinste Teilchen... kleiner als Atome"
	• generell sehr diffuses Bild zum Themengebiet „Nano“	"... eine Art Strom oder Licht"
	• Vielfältige Fehlvorstellungen genereller Natur	
<b>L2: Anwendungen in Alltag und Technik</b>	• Wenige Anwendungsgebiete sind den SuS bekannt	"... iPod nano. Vielleicht noch was bei Mikrochips"
	• Oftmals in technischen Bereichen verortet, vermutlich starke Beeinflussung durch Werbung. Darüber hinaus sind kaum Anwendungen/Anwendungsfelder bekannt	"... Blätter haben Nanostrukturen"
	• Viele Bezüge zur Physik	
<b>L3: Fachwissen &amp; Bewertung</b>	• Tendenziell positive Assoziationen (Fortschrittsdenken)	"... bin mir nicht sicher, da ich über negative Einfluss keine Kenntnisse habe"
	• Zu geringe Expertise für reflektierte Bewertung wird oftmals eingeräumt	
	• Ein generelles Risikobewusstsein zeigt sich nur selten, konkrete Risiken können nur vereinzelt genannt werden.	"... gut, da alles moderner ist"

Die gesammelten Erkenntnisse decken also insgesamt sich mit den Ergebnissen der vorherigen Untersuchung der Kerncurricula (siehe Kap. 3.3.2) und heben erneut die Chancen einer Integration von Nanotechnologie in den Chemieunterricht hervor. Dies wird nicht zuletzt durch das jahrgangsübergreifend als „hoch“ eingeschätzte Interesse (87 %) der SuS an einer unterrichtlichen Behandlung untermauert.

## 6.2 Empirische Studie zu Perspektiven von Lehrkräften <sup>16</sup>

### 6.2.1 Theoretische Überlegungen und Forschungsfragen

Anknüpfend an die Umfrageergebnisse von SuS soll in einer weiteren empirischen Studie Aufschluss darüber erhalten werden, welches fachliche und fachdidaktische Vorwissen Lehrkräfte verschiedener Schulformen besitzen und welche Bereitschaften hinsichtlich einer unterrichtlichen Implementierung vorhanden sind. Welche Fachkenntnisse besitzen sie, wie oft und regelmäßig wird „Nano“ unterrichtet, und auf welche Weise? Aufgrund des fehlenden Zugangs zu didaktisch aufbereitetem Material aus Schulbüchern (siehe Kap. 3.3.2) müssen Lehrkräfte folglich auf (teilweise kostenpflichtiges) Unterrichtsmaterial aus dem Internet zurückgreifen oder sich auf dieser Basis selbst Material erstellen. Stellt dies eine (große) Herausforderung für sie und damit eine ebenso große Barriere für die unterrichtliche Behandlung von Nanotechnologie dar? Wenn ja - wie viele Lehrkräfte überwinden sie? Welche weiteren intrinsischen und extrinsischen Barrieren können noch ausgemacht werden? Ziel dieser zweiten Umfrage ist es durch Untersuchung der folgenden Forschungsfragen einen ersten Überblick über diese Perspektiven der Lehrkräfte zu gewinnen:

1. Wie schätzen Sie das Interesse ihrer SuS zum Thema „Nano“ ein?
2. Wie häufig stellen Lehrkräfte in ihrem Unterricht Bezüge zum Thema „Nano“ her?
3. Welche Unterrichtsformate wählen sie für die Vermittlung von „Nano“?
4. Nehmen sie dabei Bildungsangebote wahr (und wenn ja, welche)?
5. Welche intrinsischen und extrinsischen Barrieren (bspw. Ausstattung der Sammlung, Unterrichtsmaterial etc.) liegen vor?
6. Wie schätzen Lehrkräfte ihr Fachwissen zum Thema „Nano“ ein?
7. Welche Wünsche, Erwartungen und Einschätzungen besitzen Lehrkräfte für die Vermittlung von „Nano“?
8. Haben sie Interesse an Fortbildungen zu „Nano“? Wenn ja, zu welchen Themengebieten?

Hinsichtlich des Forschungsdesigns und der Methodik gelten vergleichbare Voraussetzungen wie bei der Erfassung der Lernerperspektiven (qualitative Grundrichtung, explorativer Ansatz, Fragebogenstudie); da der Fragebogen unter Berücksichtigung der gleichen Grundprinzipien erstellt wurde (siehe Kap. 6.1.2), werden diese hier nicht erneut aufgeführt.

---

<sup>16</sup> Die Erfassung der Perspektiven von Lehrkräften wurde zum Teil bereits veröffentlicht <sup>[1]</sup>. Mit freundlicher Genehmigung des Verlags (siehe Anhang A4.1) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

Im Fragebogen wurden zunächst grundlegende Informationen der Teilnehmenden erfasst (Schulform, Geburtsjahr, Dienstjahre und Fächer) und beinhaltet anschließend folgende 21 Fragen.

### Umfrage zum Thema „Nano im Unterricht?“

1. Wie hoch schätzen Sie das Interesse Ihrer Schülerinnen und Schüler am naturwissenschaftlichen Unterricht ein?
2. Wie hoch schätzen Sie das Interesse Ihrer Schülerinnen und Schüler ein, „Nano“ im naturwissenschaftlichen Unterricht zu thematisieren?
3. Schätzen Sie, wie häufig Aspekte aus dem Themenbereich „Nano“ in Ihrer Schule im naturwissenschaftlichen Unterricht vermittelt werden.
4. Geben Sie an, wie häufig Aspekte aus dem Themenbereich „Nano“ in Ihrer Schule im naturwissenschaftlichen Unterricht aus Ihrer Sicht vermittelt werden **sollten**.
5. Welche der folgenden Aussagen trifft am ehesten auf Ihren Unterricht zu? In diesem Schuljahr habe ich zum Themenbereich „Nano“ ...
  - a. kaum Aspekte in meinem Unterricht behandelt
  - b. kurze Bezüge an ausgewählten Stellen hergestellt.
  - c. einzelne Unterrichtsstunden gehalten.
  - d. eine Unterrichtseinheit gehalten.
  - e. eine Projektwoche gestaltet.
6. Haben Sie bereits ein Bildungsangebot (FCI Nanokoffer, Nanotruck etc.) aus dem Bereich „Nano“ für Ihren Unterricht genutzt?
7. Haben Sie bereits Unterrichtsmaterialien mit explizitem Bezug zum Bereich „Nano“ eingesetzt?
8. Wenn ja: Welche Unterrichtsmaterialien mit explizitem Bezug zum Bereich „Nano“ haben Sie eingesetzt? (*Antwortmöglichkeiten: Kopiervorlage, Lehrbuch, Experimentalanleitung, Animation/Film, Lehrbuch, Onlinematerial, selbst erstelltes Material*)
9. Wenn ja: Zu welchen Themen haben Sie diese Unterrichtsmaterialien eingesetzt?
10. Wie relevant sind Ihrer Meinung nach die Kompetenzbereiche Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation, Bewertung bei der Vermittlung von „Nano“ im Unterricht? (*Antwortmöglichkeiten: Fünfstufige LIKERT-Skala von „irrelevant“ bis „sehr relevant“*)
11. Schätzen Sie die Qualität der Ausstattung an Ihrer Schule für die unterrichtliche Behandlung von „Nano“ in Bezug auf folgende Punkte ein. (*Antwortmöglichkeiten: Fünfstufige LIKERT-Skala von „sehr schlecht“ bis „sehr gut“*)
  - a. Schülerexperimente
  - b. Lehrerexperimente
  - c. Medien (z.B. Filme, Lehrbücher, Foliensätze, ...)
12. Finden Sie es notwendig, die Ausstattung Ihrer Schule für Experimente aus dem Themenbereich „Nano“ zu erweitern?

- 
13. In welchem der folgenden Unterrichtsfächer würden Sie das Thema „Nano“ am ehesten ansiedeln? (*Antwortmöglichkeiten: Biologie, Chemie, Physik*).
- 
14. Wie schätzen Sie Ihre Kenntnisse zur Vermittlung von „Nano“ im Unterricht ein? (*Antwortmöglichkeiten: Fünfstufige LIKERT-Skala von „keine“ bis „sehr gut“*)
- 
15. Sind Sie an Fortbildungen aus dem Bereich „Nano“ interessiert?
- 
16. Wenn ja: Gibt es Themen / Themengebiete, die Sie besonders interessieren?
- 
17. Wünschen Sie sich mehr Anleitungen für Schulexperimente zum Thema „Nano“?
- 
18. Wenn ja: Gibt es Themen / Themengebiete, die Sie besonders interessieren?
- 
19. Worin sehen Sie die größte Schwierigkeit, Nano in den Unterricht zu integrieren?
- 
20. Haben Sie Anmerkungen und / oder Kommentare?
- 

Im Anhang (S. A2.3) findet sich ein Exemplar des vollständigen Fragebogens.

### 6.2.2 Stichprobe

An der Studie teilgenommen haben 100 Lehrkräfte (davon 55 % weiblich) mit naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächern aus ganz Deutschland, die Rücklaufquote der vollständig ausgefüllten Fragebögen liegt bei 76 %. Hinsichtlich der vertretenen Unterrichtsfächer (Mehrfachnennung möglich) liegt der Schwerpunkt auf Chemie (74,4 %), die Fächer Biologie (50 %), Mathematik (32,1 %) und Physik (29,5 %) sind jedoch auch häufig vertreten. Die Daten der Teilnehmenden weisen eine breite Altersverteilung auf (siehe Abbildung 28), im Mittel besitzen sie über 11 Dienstjahre Erfahrung.

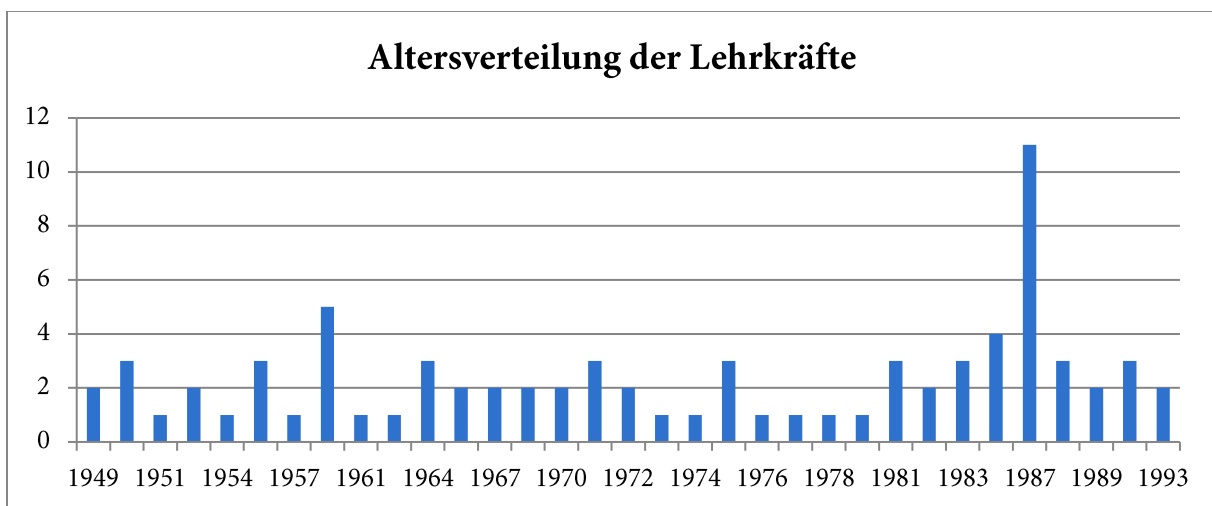


Abbildung 28 – Altersverteilung der befragten Lehrkräfte.

### 6.2.3 Resultate und Auswertung

Nachfolgend werden ausgewählte Resultate des Fragebogens gruppiert in verschiedene Kategorien präsentiert.

### Wie schätzen Sie das Interesse ihrer SuS zum Thema „Nano“ ein?

Der erste Abschnitt des Fragebogens betrifft zum ersten das vermutete Interesse seitens der SuS am Themengebiet „Nano“, welches die Teilnehmenden vergleichend zum generellen Interesse am naturwissenschaftlichen Unterricht einschätzen sollten. Hier zeigt sich (siehe Abbildung 29), dass die Lehrkräfte ein im Mittel geringeres Interesse (Mittelwert (MW 3,0: mittel) an „Nano“ vermuten, als am allgemeinen naturwissenschaftlichen Unterricht (MW 3,4: mittel-hoch).

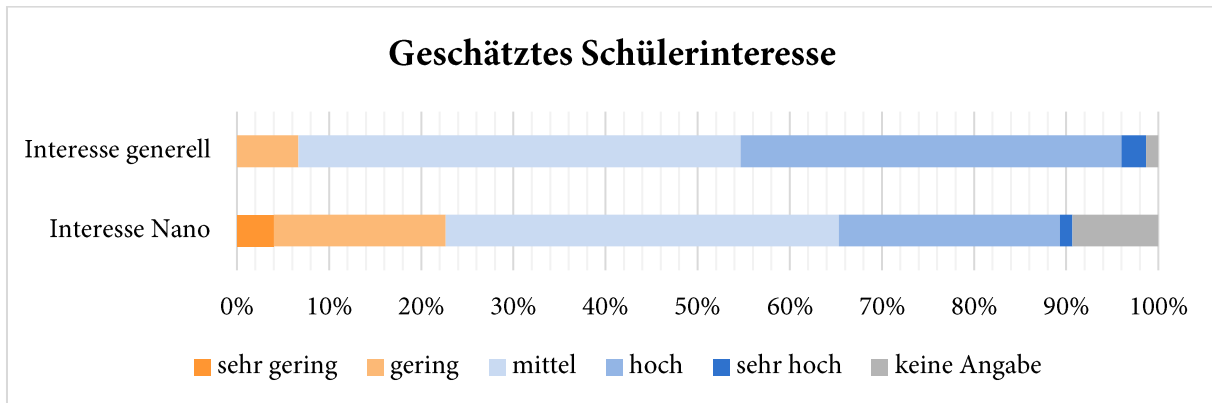


Abbildung 29 – Vergleichende Einschätzung des Schülerinteresses durch die Lehrkräfte am allgemeinen naturwissenschaftlichen Unterricht und dem Themengebiet „Nano“.

Im Kontrast dazu steht die eigene Einstellung der Lehrkräfte hinsichtlich der unterrichtlichen Behandlung des Themas (siehe Abbildung 30). Im Durchschnitt sollte das Themengebiet deutlich häufiger vermittelt werden (MW 3,1: gelegentlich), als es derzeit der Fall ist (MW 2,0: selten). Mit einer Ausnahme sind alle Teilnehmenden der Meinung, dass „Nano“ ein größerer Stellenwert eingeräumt werden sollte, als dies gegenwärtig der Fall ist.

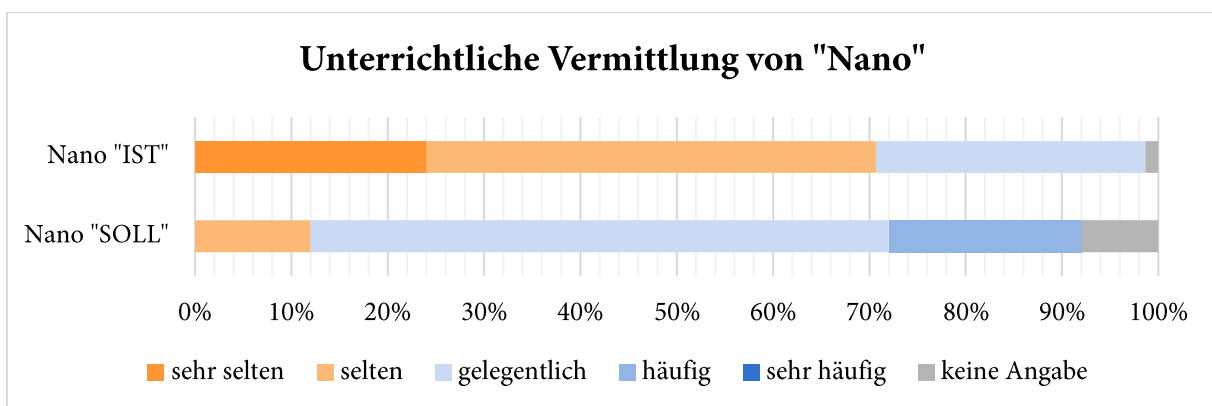


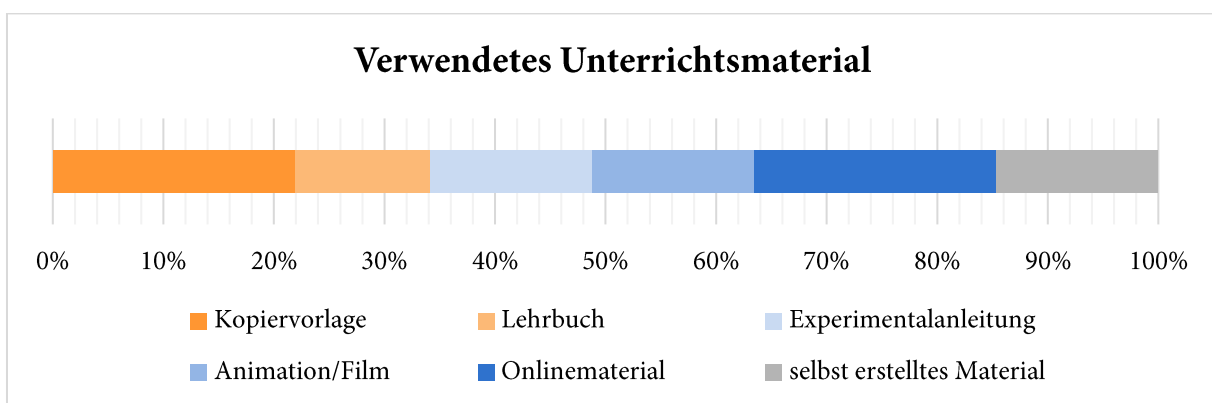
Abbildung 30 – Häufigkeit der unterrichtlichen Behandlung von "Nano". Reihe 1 (Nano "IST", oben) zeigt die Einschätzung, wie häufig "Nano" gegenwärtig vermittelt wird, Reihe 2 (Nano "SOLL", unten), wie häufig es vermittelt werden sollte.

### Wie häufig stellen Lehrkräfte in ihrem Unterricht Bezüge zum Thema „Nano“ her? Welche Unterrichtsformate wählen sie für die Vermittlung von „Nano“? Nehmen sie dabei Bildungsangebote wahr (und wenn ja, welche)?

Kontrastiv zu dem gewünschten Stellenwert von „Nano“ zeigen die Umfrageergebnisse, dass nur sehr wenige Lehrkräfte das Themengebiet unterrichtlich aufgegriffen haben. Über die Hälfte der

Teilnehmenden haben keine Aspekte hierzu behandelt (50,7 %), viele Lehrkräfte (40 %) haben kurze Bezüge an ausgewählten Stellen hergestellt. Dedizierte Unterrichtsstunden (6,7 %) oder -einheiten (2,7 %) zum Thema Nanotechnologie haben lediglich eine kleine Minderheit gehalten. Hierbei wurde auch die Verwendung existierender Bildungsangebote erfragt – diese wurden von 5 % genutzt (namentlich der NANO TRUCK und die NANO BOX, siehe Kap. 3.2).

Über die Nutzung von Bildungsangeboten hinaus wurden die Lehrkräfte auch nach ihren verwendeten Unterrichtsmaterialien befragt; die Ergebnisse zeigen eine relativ homogene Verteilung mit leichtem Schwerpunkt auf Kopiervorlagen und Onlinematerial (siehe Abbildung 31). Eine Verteilung von Unterrichtsmaterialien über diese Medien bzw. Zugänge kann folglich eine erfolgreiche Disseminierung von neu entwickelten Unterrichtsmaterialien unterstützen und wird bei der Konstruktion in den folgenden Kapiteln berücksichtigt.



**Abbildung 31 – Verwendetes Unterrichtsmaterial für die Vermittlung von "Nano" im eigenen Unterricht.**

Um das Thema „Nano“ erfolgreich im Chemieunterricht oder Schülerlabor zu integrieren, ist eine Anbindung an das Kerncurriculum unabdinglich. Neben inhaltlichen Fragen sind aber auch entsprechende Anbindungen an die Kompetenzbereiche von großer Bedeutung. Welche Vorstellungen besitzen Lehrkräfte hierzu? Welche Kompetenzbereiche schätzen sie als relevant für die Vermittlung von „Nano“ ein?

In dieser Studie bewerten die Lehrkräfte insbesondere den Kompetenzbereich „Fachwissen“ (MW 3,83: ziemlich relevant) als besonders wichtig für die Vermittlung von „Nano“ ein (siehe Abbildung 32). Zu beachten ist dabei die relativ große Anzahl an Einzelnennungen für „sehr relevant“ – hier könnte vermutet werden, dass einige Lehrkräfte den Anteil dieses Kompetenzbereiches ggf. für zu hoch halten bzw. hiermit ausdrücken wollen, dass sehr viel Fachwissen dazu benötigt wird (siehe unten, Abbildung 35). Darüber hinaus liegen die Mittelwerte recht nah beieinander (Erkenntnisgewinnung: 3,68; Kommunikation: 3,25; Bewertung: 3,56)

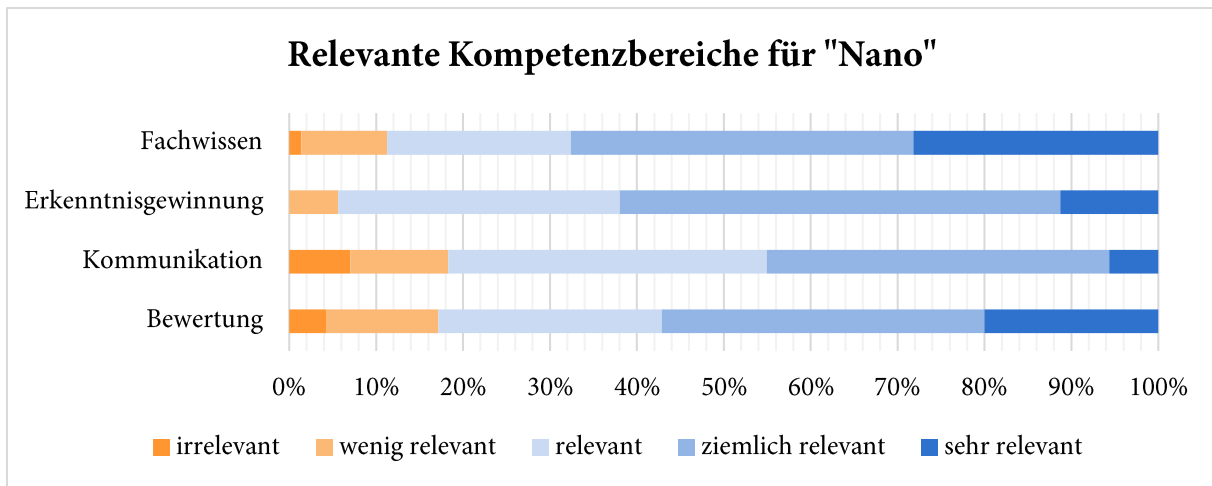


Abbildung 32 – Relevante Kompetenzbereiche für die Vermittlung von „Nano“.

### Welche intrinsischen und extrinsischen Barrieren (bspw. Ausstattung der Sammlung, Unterrichtsmaterial etc.) liegen vor? Wie schätzen Lehrkräfte ihr Fachwissen zum Thema „Nano“ ein?

Einer häufigeren Thematisierung im Chemieunterricht stehen allerdings auch einige Bedenken seitens der Lehrkräfte entgegen – die Identifizierung möglicher intrinsischer wie extrinsischer Barrieren für eine unterrichtliche Implementierung stellt daher einen Schwerpunkt des Fragebogens dar.

Ein wichtiger Faktor ist die Einschätzung der eigenen fachbezogenen Kenntnisse, welche oftmals als notwendige Voraussetzung für die Unterrichtung eines Themengebietes angesehen werden. Im Durchschnitt schätzen die Teilnehmenden ihre diesbezüglichen Kompetenzen als gering-mittelmäßig ein (MW: 2,66).

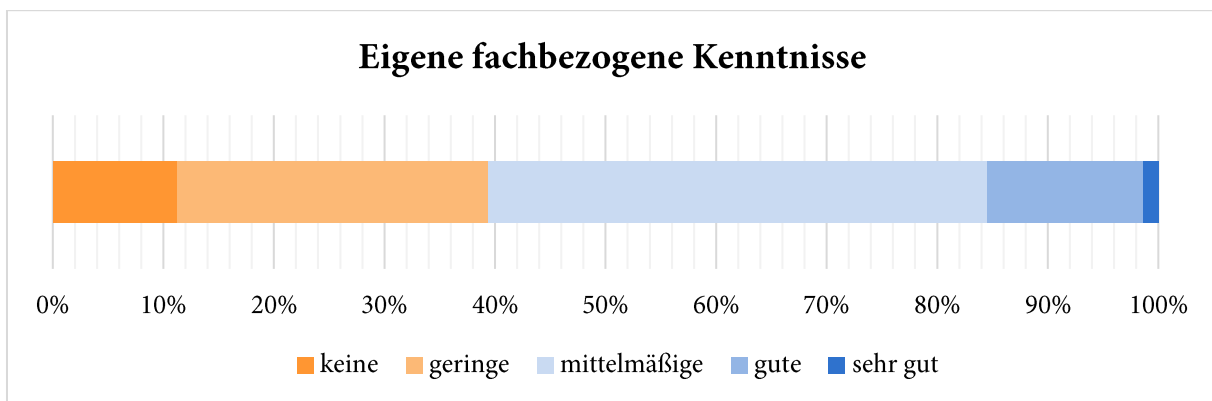


Abbildung 33 – Einschätzung eigener fachbezogener Kenntnisse.

Dieses Ergebnis identifiziert somit eine wichtige intrinsische Barriere – nur rund 15 % der Lehrkräfte besitzen gute oder sehr gute Fachkenntnisse zum Themengebiet „Nano“, knapp 40 % nur keine bis geringe. Forschungsergebnisse von KÄHKÖHNEN<sup>[231]</sup>, BINGIMLAS<sup>[232]</sup>, NEWHOUSE<sup>[233]</sup> zeigen übereinstimmend, dass Lehrkräfte ein Themengebiet grundlegend verstanden oder min-



destens jedoch ein „*threshold comfort level*“<sup>[234]</sup> erreicht haben müssen, bevor sie sich eine Vermittlung desselben zutrauen. Inwiefern die als „mittelmäßig“ eingeschätzten Kompetenzen hierfür ausreichen, um das Themengebiet im naturwissenschaftlichen Unterricht zu behandeln und ob sich die Lehrkräfte dies darüber hinaus auch zutrauen, ist mit den vorliegenden Daten allein nicht abzuschätzen. Die Verknüpfung der bisherigen Erkenntnisse liefert jedoch erste Hinweise: Wenn „Nano“ nach Meinung der Lehrkräfte häufiger unterrichtet werden sollte (siehe Abbildung 30), aber nur sehr selten unterrichtet wird (90 % haben höchstens kurze Bezüge hergestellt, siehe oben), können die fehlenden Kenntnisse hierfür eine der Ursache darstellen.

In diesem Kontext zeigt oben beschriebene Analyse der Curricula und Modulbeschreibungen lehrerbildender Institute (wie Hochschulen und Studienseminare), dass das Thema Nanotechnologie dort selten verankert ist (siehe Kap. 3.3). Folglich wird im Bereich der Lehramtsausbildung selten ein grundlegendes Basiswissen vermittelt mit der Konsequenz, dass sich das in dieser Umfrage gezeigte Bild auch in naher Zukunft nicht ändern wird.

Neben den eigenen Kompetenzen der Lehrkräfte sollten zudem auch eine Einschätzung der vorhandenen materiellen Ressourcen erhoben werden. Fehlende Ausstattung bzw. finanzielle Mittel können eine extrinsische für die unterrichtliche Vermittlung darstellen. Abbildung 34 zeigt eine Einschätzung der Qualität und Ausstattung der schuleigenen Laborsammlung in Bezug auf Schülerexperimente, Lehrerexperimente und Medien (Filme, Lehrbücher, Foliensätze).

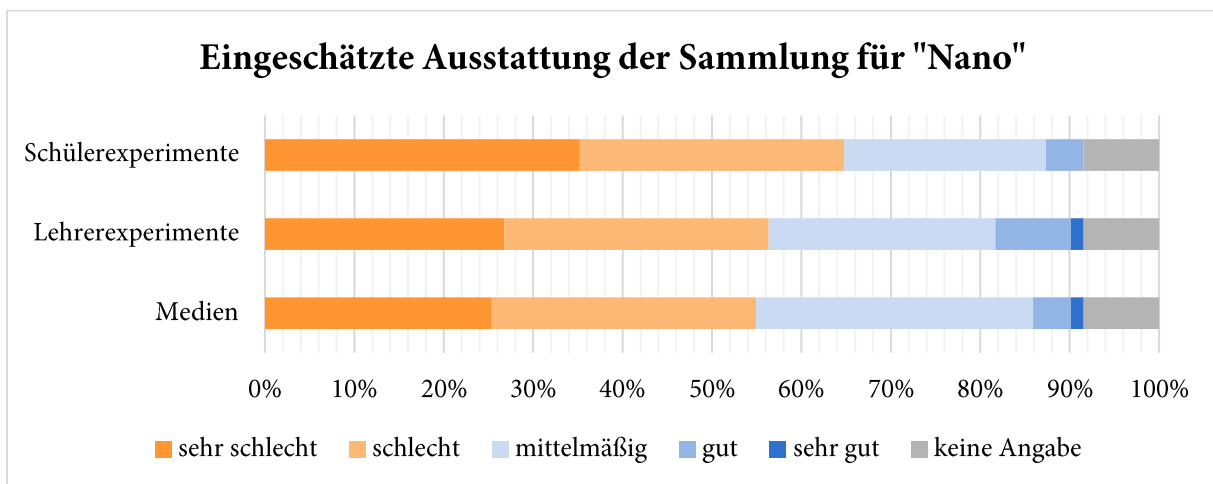


Abbildung 34 – Eingeschätzte Qualität und Ausstattung der schuleigenen Laborammlung für die Vermittlung von „Nano“.

In dieser Abbildung wird eine extrinsische Barriere sichtbar - viele Lehrkräfte äußerten, dass die Sammlung ihrer Schulen für Nanotechnologie nicht gut genug ausgestattet ist – insbesondere für Schülerexperimente beurteilten knapp zwei Drittel (65 %) die Qualität ihrer Ausstattung als „schlecht“ oder „sehr schlecht“ (MW 1,9: schlecht). Mehr als drei Viertel (76 %) hingegen halten es für notwendig, die Ausstattung der Schule für den Themenbereich „Nano“ zu erweitern.

Die Ursache für diese Barriere liegt möglicherweise in dem Fachgebiet „Nano“ selbst – die betreffenden Strukturen und Größendimensionen sind mit schulischen Charakterisierungsmethoden nur schwer zu untersuchen. Stattdessen wird mit dem Themengebiet aufgrund seiner Aktualität oftmals die aktuelle „cutting edge“ (Spitzen-)Forschung verbunden, welche auf deutlich größere Mittel zurückgreifen kann. Dass diese nicht benötigt werden und insbesondere Experimente auch mit schulisch verfügbaren Chemikalien bzw. Alltagsgegenständen durchgeführt werden können, scheint vielen Lehrkräften nicht bekannt zu sein.

An dieser Stelle bieten sich drei Lösungswege an: (1) Die Entwicklung von Experimenten, welche auf bereits schulisch verfügbare Ressourcen zurückgreifen, (2) die Entwicklung von kooperativen Unterrichtsprojekten zwischen Schule und Hochschulen oder geeigneten Laboreinrichtungen, welche auf entsprechende Ressourcen und Expertise zurückgreifen können und (3) die Entwicklung eigener Kurse für Schülerlabore. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen alle drei Lösungswege verfolgt werden.

Weitaus schwerer ins Gewicht als die (fehlende) Ausstattung fällt allerdings die oben angesprochene, schwache Verankerung von Nanotechnologie in den Kerncurricula (siehe Kap. 3.3.2). Als Antwort auf die Frage nach der größten Schwierigkeit, „Nano“ in den Unterricht zu integrieren, vertreten viele Lehrkräfte in diesem Zusammenhang die Auffassung, „dass der aktuelle Lehrplan bereits kaum zu bewältigen“ sei, für „Themen ohne direkten Bezug zum Lehrplan“ sei aufgrund der „Stofffülle“ keine Zeit.

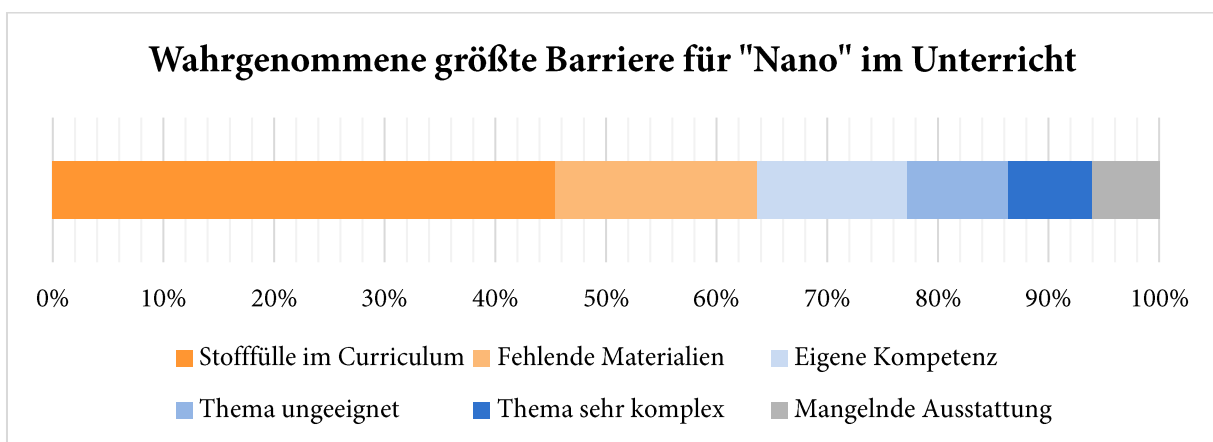


Abbildung 35 – Wahrgenommene größte Barrieren für die Integration des Themenbereiches "Nano" in den Unterricht.

Abbildung 35 gibt die relative Verteilung der wahrgenommenen Barrieren wieder. Hieraus geht hervor, dass die Stofffülle im Kerncurriculum bzw. Bildungsplan und der damit verbundene Zeitmangel als wesentlichste Barriere angesehen werden. Bei Berücksichtigung von Mehrfachnennungen bezeichnen 63 % der Teilnehmenden diesen Umstand als wesentliche Barriere. Bemerkenswert ist zudem, dass viele Lehrkräfte trotz fehlender Zeit gleichzeitig auch Interesse an dem Themengebiet zeigen. Folgendes Zitat steht exemplarisch für viele Rückmeldungen:

*„Das Curriculum / der Lehrplan in der Oberstufe ist so bemessen, dass die Zeit schon für die regulären Themen knapp wird. Ich wüsste einfach nicht, wo die Zeit für Nanothemen herkommen soll – klar wäre dies sehr interessant, nur kann ich deswegen nicht einen anderen abiturrelevanten Themenblock streichen!“*

Die vorliegenden Ergebnisse betonen die Bedeutung der curricularen Anschlussfähigkeit von Experimenten und Unterrichtseinheiten zu diesem Themengebiet; eine erfolgreiche Implementierung kann entsprechend nur gelingen, indem entweder die Kerncurricula und Bildungspläne um das Themengebiet „Nano“ erweitert werden oder die unterrichtliche Betrachtung eine Vermittlung klassischer und curricular relevanter Inhalte des Chemieunterrichts ermöglicht. Da auf ersteren Punkt kein unmittelbarer Einfluss genommen werden kann, fokussiert sich die Konstruktion der Unterrichtsprojekte auf den letztgenannten Punkt.

### **Welche Wünsche, Erwartungen und Einschätzungen besitzen Lehrkräfte für die Vermittlung von „Nano“? Haben sie Interesse an Fortbildungen zu „Nano“? Wenn ja, zu welchen Themengebieten?**

Neben der Identifikation von Barrieren sollten in dem vorliegenden Fragebogen auch Vorschläge, Interesse und Wünsche der Lehrkräfte abgefragt werden, um eine unterrichtliche Implementierung zu fördern. Diese Wünsche betreffen einerseits gewünschte Themen für Unterrichtsprojekte und Fortbildungen sowie andererseits die gewünschte Art der Vermittlung.

Vor der Themenauswahl stellt sich zunächst grundsätzlich die Frage, ob diese überhaupt gewünscht werden. Entsprechende Fragen wurden von den Teilnehmenden in beiden Fällen befragt – über 80 % der befragten Lehrkräfte sind an Fortbildungen zum Thema „Nano“ interessiert, über 90 % wünschen sich diesbezüglich mehr Experimente und Unterrichtsmaterialien.

Hinsichtlich der Themenwünsche für Unterrichtsmaterialien ergab sich ein breit verteiltes Bild der Resultate mit vielen speziellen Einzelwünschen:

*„Zusatzstoffe in Lebensmitteln“*

*„Magnetische Flüssigkeiten / Suspensionen“*

*„Selbstreinigende Oberflächen jeglicher Art“*

Die häufigsten Nennungen konnten den folgenden Bereichen zugeordnet werden:

- „Nano“ im Alltag (17 %)
- Oberflächen und Beschichtungen (12 %)
- Nanomedizin (12 %)
- Auswirkungen auf Mensch und Umwelt (9 %)

Hierbei muss berücksichtigt werden, dass der Ausdruck „häufige Nennung“ relativ zu betrachten ist. Klare Tendenzen sind in den Antworten nicht abzulesen. Viele Teilnehmenden besitzen darüber hinaus nach eigener Aussage auch *„zu wenig Fachwissen, um dies zu beantworten“*,

und ein Großteil gab auf diese Frage entsprechend keine Antwort. Somit kann fehlende Kenntnis der Materie als eine Ursache für das erhaltene Antwortbild vermutet werden.

Im Hinblick auf Themenwünsche für Fortbildungen zeigen sich ähnliche Ergebnisse; auch hier haben viele Teilnehmende keine Antwort gegeben bzw. geben können. Oftmals wurde der Wunsch nach allgemeinen Grundlagen und Möglichkeiten der schulischen Vermittlung geäußert:

„Allgemeine, grundlegende Einblicke + Möglichkeiten der Vermittlung in der Schule“

„Einbindung in den Kontext / Schülerexperimente“

„Grundlagen“

Thematisch entfielen die meisten Stimmen mit überraschend deutlicher Mehrheit auf mögliche „Auswirkungen auf Mensch und Umwelt“ (38 %). Im Vergleich zu den SuS (siehe Kap. 6.1.3) zeigen die Lehrkräfte somit ein deutlich gesteigertes Bewusstsein für etwaige Gefährdungspotenziale junger Technologien und die Bereitschaft, sich darüber zu informieren. Darüber hinaus entfielen die meisten weiteren Stimmen auf die Bereiche „Nano“ im Alltag (13 %) und Nanomedizin (13 %). Insgesamt sollten folglich diese genannten Themen sowie entsprechende Grundlagen Gegenstand von Fortbildungen sein, um möglichst viele Lehrkräfte anzusprechen.

Abschließend wurden hinsichtlich der Vermittlungsart das Interesse an verschiedenen Möglichkeiten verglichen (siehe Abbildung 36).

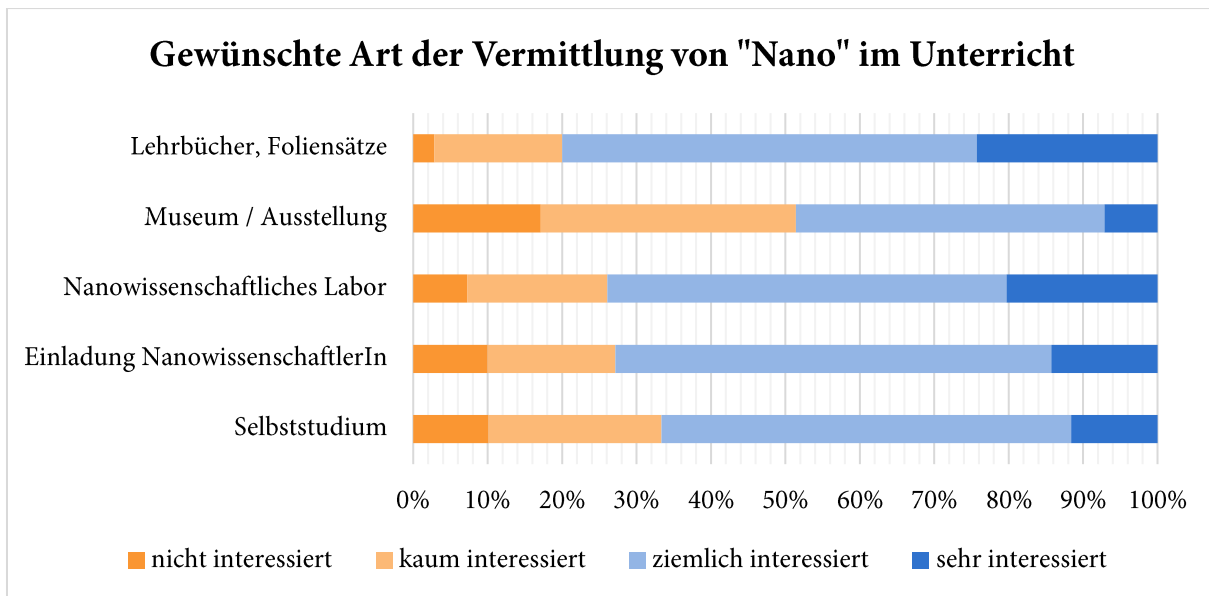


Abbildung 36 – Interesse an mehreren Möglichkeiten der Vermittlung von "Nano" im Chemieunterricht.

Favorisiert wird folglich die Vermittlung durch klassische Medien wie Schulbücher oder Kopiervorlagen (MW 3: ziemlich interessiert); dies ist aufgrund des geringen Aufwandes (und Kosten) zu erwarten gewesen. Interesse besteht allerdings auch insbesondere am Besuch eines entsprechenden (Schüler-)Labors (MW 2,9: ziemlich interessiert). Zusätzlich zum höheren Mittelwert

im Vergleich zu den anderen Optionen ist für diese Schlussfolgerung insbesondere die Anzahl der „sehr interessierten“ Teilnehmenden ausschlaggebend.

#### **6.2.4 Fazit**

Insgesamt betont diese Umfrage – ähnlich wie bei den SuS – das Interesse vieler Lehrkräfte, Inhalte zur Nanotechnologie in den Chemieunterricht zu implementieren – dies deckt sich weitgehend mit einer vergleichbaren Untersuchung in Finnland (2011) von KÄHKÖNEN <sup>[231]</sup>.

Die Ergebnisse zeigen allerdings auch wichtige extrinsische und intrinsische Barrieren seitens auf; so schätzen etwa ihre eigenen diesbezüglichen Kenntnisse als eher gering, die materielle Ausstattung nicht ausreichend ein. Zudem fehlt es nach ihrer Einschätzung an Unterrichtsmaterialien. Die größte Hürde für eine unterrichtliche Implementierung stellt jedoch die wahrgenommene Stofffülle dar.

Darüber hinaus äußerten die Teilnehmenden auch Wünsche; hier äußern die Teilnehmer ein nennenswertes Interesse an entsprechenden Fortbildungen zum Thema „Nano“, insbesondere zu den inhaltlichen und vermittlungsrelevanten Grundlagen. Ebenfalls gewünscht werden weitere Unterrichtsmaterialien sowie Experimente zu einer Vielzahl an alltagsnahen Themen.

Nach KELLY <sup>[95]</sup> und ANDERSON <sup>[96]</sup> sind es oftmals die Lehrkräfte, die hinsichtlich einer erfolgreichen Umsetzung zwischen „make it or break it“ entscheiden – nicht zuletzt aus diesem Grund werden diese Perspektiven im weiteren Vorgehen entsprechend berücksichtigt.

## 7 Didaktische Strukturierung: Konstruktion von Unterricht

Als Didaktische Strukturierung wird der „Planungsprozess bezeichnet, der zu grundsätzlichen und verallgemeinerbaren Ziel-, Inhalts- und Methodenentscheidungen für den Unterricht führt“<sup>[235]</sup>. Aufbauend auf den bisherigen Betrachtungen werden daher nun die ermittelten fachlichen Konzepte sowie die Perspektiven der Lernenden und Lehrenden im Rahmen der didaktischen Strukturierung miteinander für die Konstruktion von Unterrichtsmaterialien verknüpft – im Idealfall können sich dabei in diesem wechselseitigen Vergleich beide Untersuchungen „gegenseitig erhellen“<sup>[86]</sup>. Die Analyse erfolgt dabei nach KATTMANN unter Vermittlungsabsicht insbesondere mit Hinblick auf folgende Fragestellungen:

1. „Welches sind die wichtigsten Elemente der Alltagsvorstellungen von Lernenden, die im Unterricht berücksichtigt werden müssen?
2. Welche unterrichtlichen Möglichkeiten eröffnen sich, wenn die Schülervorstellungen beachtet werden?
3. Welche der Alltagsvorstellungen von SuS korrespondieren mit wissenschaftlichen Konzepten dergestalt, dass sie für ein angemesseneres Lernen genutzt werden können?“<sup>[87]</sup>

Die Ergebnisse der didaktischen Strukturierung können dabei nach KATTMANN auf unterschiedlichen Ebenen in vielen verschiedenen Formen dargestellt werden<sup>[235]</sup>. So können etwa wesentliche Lernpfade ermittelt<sup>[236]</sup>, fachliche und lebensweltliche Vorstellungen und lernrelevante Korrespondenzen beschrieben<sup>[237]</sup> oder fachliche Unterrichtskonzeptionen entwickelt werden<sup>[238]</sup>. Diese Arbeit fokussiert die Entwicklung und Evaluation von didaktisch rekonstruierten Unterrichtsmaterialien; dieses Ziel soll erreicht werden, indem in einem ersten Schritt Leitlinien zur Vermittlung des Themengebietes formuliert werden. Hierauf aufbauend erfolgt anschließend die Entwicklung von Lernangeboten in Form von Schlüsselementen, Unterrichtsmaterialien sowie Unterrichtseinheiten.

In Tabelle 10 werden überblicksartig die ermittelten Konzepte und die korrespondierenden Lernerperspektiven gegenübergestellt und schließlich die Leitlinien, welche sich aus der Verknüpfung dieser beiden Elemente ableiten lassen.

Tabelle 10 – Gegenüberstellung der ermittelten Konzepte und Lernerperspektiven.

### Gegenüberstellung: Konzepte und Lernerperspektiven

Konzepte	Lernerperspektiven
K1: Grundlagen	L1: Viele SuS haben nur eine sehr diffuse Vorstellung von „Nano“ und dem gegenwärtigen sowie zukünftigem Stellenwert dieser Technologie.
<p><b>Leitlinie 1 (LL1):</b> „Nano“ ist ein Sammelbegriff für interdisziplinäre Forschung und Technologie in vielfältigen Bereichen. Eine Klärung des (alltagssprachlich ggf. vorgelegten) ist eine Voraussetzung für ein weiteres Verständnis dieses Themengebietes.</p> <p><b>Leitlinie 2 (LL2):</b> „Nano“ nimmt in unserem Alltag bereits heute einen festen Stellenwert ein, der in Zukunft aller Voraussicht nach weiter steigen wird. Zur Förderung einer aktiven gesellschaftlichen</p>	

---

Partizipation der SuS und im Sinne einer Alltagsorientierung ist die Vermittlung des Stellenwertes von „Nano“ und die Anknüpfung an die Lebenswelt der SuS ein wichtiges Element der Konstruktion von Unterrichtsmaterialien.

---

K2: Größendimension L1: Sehr vielen SuS ist klar, dass es sich um „etwas sehr Kleines“ handelt. Detailliertere Repräsentationen der „Nanodimension“ werden nur in seltenen Fällen sichtbar, wobei diesbezüglich viele Fehlvorstellungen auftreten („Nano ist kleiner als ein Atom“).

---

**Leitlinie 3 (LL3):** Die Größendimension stellt ein Schlüsselement und die Grundlage der inhaltlichen Vermittlung von „Nano“ dar - entsprechend ist die Thematisierung geeigneter Repräsentationen der „Nanodimensionen“ von großer Bedeutung. Von großem Vorteil ist dabei die Verwendung von geeigneten Modellen.

---

K3: Morphologie und Struktur L2: Wenn Nanomaterialien genannt werden, handelt es sich fast ausschließlich um sphärische Nanopartikel. Ausnahmen sind in Einzelnennungen Carbon Nanotubes.

---

**Leitlinie 4 (LL4):** Da die Struktur bzw. Morphologie einen großen Einfluss auf die Eigenschaften des Materials besitzt, bietet eine Thematisierung dieses Struktur-Eigenschaft-Zusammenhanges vielfältige Verständnismöglichkeiten für SuS. Neben sphärischen Nanopartikeln erscheint die Thematisierung von weiteren Morphologien und auch von nanostrukturierten Materialien sinnvoll.

---

K4: Größenabhängige Eigenschaften L3: 95 % der SuS in der durchgeführten Umfrage verfügen  
 K5: Synthese und Stabilisierung nach eigener Schätzung nur über wenige bis sehr wenige fachliche Vorkenntnisse zum Thema „Nano“.  
 K6: Charakterisierungsmethoden

---

**Leitlinie 5 (LL5):** Der Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften eines Stoffes wird bei Nanomaterialien in besonderem Maße deutlich – diese Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge bieten daher für die Konstruktion von Unterrichtsmaterialien (und deren curriculare Anschlussfähigkeit) einen großen Gewinn. Zur Illustration sind insbesondere konkrete Anwendungsbeispiele geeignet, wie bspw. Quantenpunkte oder Stoffe mit oberflächendominiertem Verhalten.

**Leitlinie 6 (LL6):** Über die Herstellung von Nanomaterialien, ihre Charakterisierung sowie ggf. deren Einbettung in gewünschte Werkstoffe können Fachwissen und Praxisbezug an vielerlei Kontexten sinnvoll miteinander verknüpft werden, wodurch Anwendungs- und Alltagsorientierung gefördert und träges Wissen vermieden wird. Je nach Leistungsstufe können die Prozesse und Charakterisierungsmethoden auf entsprechenden Verständnistiefen mit adäquaten Modellen untersucht werden.

---

K7: Anwendungsfelder L2: Ein großer Teil der Befragten kennt keine Anwendungsfelder von Nanotechnologie. Bekannte Anwendungen und Produkte werden mit großer Mehrheit in technischen Feldern verortet („iPod nano“). Anwendungen in Kosmetika, Nahrungsmitteln und vielen weiteren wichtigen Gebieten sind größtenteils unbekannt.

---

**Leitlinie 7 (LL7):** Viele SuS nehmen den Begriff „Nano“ in den Medien wahr; die dort verwendeten Begriffe (bspw. „iPod nano“) können für eine unterrichtliche Behandlung der Begriffe und entsprechenden Hintergründe aufgegriffen werden.

---

---

**Leitlinie 8 (LL8):** SuS lokalisieren „Nano“ insbesondere in technischen Anwendungsfeldern. Ein wichtiges Ziel bei der Konstruktion von Unterrichtsmaterialien ist es daher, nanotechnologische Anwendungen und ihre Bedeutung in weiteren, breit gestreuten Anwendungsgebieten aufzuzeigen. Dies spielt darüber hinaus auch eine wesentliche Rolle für die Betrachtung des Stellenwertes von „Nano“ und für die reflektierte Bewertung dieser Technologie.

---

K8: Chancen und Risiken – Gefährdungsbeurteilung von Nanomaterialien

L3: Hinsichtlich der Chancen und Risiken ist ein Fortschrittsdenken seitens der Befragten zu erkennen. „Nano“ wird als Gegenstand aktueller Forschung wahrgenommen und oftmals ohne eigene Wissensgrundlage positiv bewertet. Potenzielle Risiken für Mensch und Umwelt werden nur in Einzelfällen geäußert.

---

**Leitlinie 9 (LL9):** Die bereits vorhandene positive Einstellung der SuS hinsichtlich „Nano“ als modernes und interessantes Forschungsthema soll für einen motivierenden Unterricht genutzt werden. Andererseits soll durch das Aufzeigen von potenziellen Risiken für Mensch und Umwelt die Einnahme einer kritisch-reflektierten Perspektive gefördert werden.

---

Die ermittelten Leitlinien LL1 – LL9 stellen eine didaktische Grundlage für das weitere Vorgehen dar. Allerdings müssen neben der inhaltlich-didaktischen Betrachtung noch viele weitere (didaktisch-methodische) Überlegungen in die Strukturierung und konkrete Planung einbezogen werden: Für welche Lernorte und –gruppen sollen Unterrichtsmaterialien und –projekte entworfen werden? Welche Themengebiete sind besonders gut geeignet? Welche Anknüpfungen an das Kerncurriculum und klassische Inhalte des Chemieunterrichts bieten sich? Welche Formate sind am effektivsten und welche Ressourcen (zeitlich und finanziell) sind verfügbar?

Die verschiedenen Fragen illustrieren auf anschauliche Weise, dass eine breite Vielfalt an Möglichkeiten existiert, um Unterrichtsmaterialien und –einheiten zum Thema „Nano“ zu entwickeln. Zwar liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Vermittlung des Themengebietes „Nano“ in formalen Bildungszusammenhängen – wie im bisherigen Verlauf dieser Arbeit bereits erläutert, nehmen aber auch außerschulische Lernangebote eine wichtige Rolle in der Bildungslandschaft im Allgemeinen und für die Vermittlung neuer Themenfelder im Speziellen ein (siehe Kap. 3.2). Darüber hinaus erfordert eine erfolgreiche und nachhaltige Implementierung selbstverständlich auch die Integration in Phase I und II der Lehrerbildung. Aus diesen Gründen wurde der Fokus nicht nur auf den schulischen Chemieunterricht gelegt, sondern umfasst ebenso Schülerlabore und Hochschulen.

Überdies ist die Wahl des Formates, des Themengebietes und vieler weiterer Aspekte in vielen Fällen von äußeren Voraussetzungen abhängig. Ebenso wie mehrere Themengebiete ein hohes didaktisches Potenzial besitzen, sind unterschiedliche Lernformate für unterschiedliche Lernorte unterschiedlich gut geeignet. Beispielsweise besitzen Hochschulen eine andere apparative Ausstattung im Vergleich zu den meisten Schulen. Aus diesem Grund wurde bei der Entwicklung der folgenden Projekte Wert darauf gelegt, eine breite inhaltliche und methodische Vielfalt an Materialien zu entwickeln, welche die jeweiligen Voraussetzungen so weit wie möglich berücksichtigen.



Diesem Grundgedanken entsprechend wurden die entwickelten Projekte und Unterrichtsmaterialien in Abhängigkeit des Lernortes in drei Kapitel gegliedert und weiter in einzelne Projekte unterteilt. Trotz dieser Strukturierung können bspw. einige Angebote für Schülerlabore auch im Chemieunterricht verwendet werden (und umgekehrt). Je nach Bedeutung und Eignung werden auch einige Elemente entsprechend mehrfach verwendet – in der Literatur werden diese oftmals als Schlüsselemente bezeichnet <sup>[93]</sup>. Abbildung 37 gibt einen Überblick über die Gliederung der entwickelten Angebote.



Abbildung 37 – Vorgehensweise und Gliederung der entwickelten Angebote.

## 7.1 Angebote für den Chemieunterricht

Die Konstruktion von Unterrichtsmaterialien für formale Bildungszusammenhänge stellt den Schwerpunkt dieses Kapitels und gleichzeitig - vor dem Hintergrund knapper Ressourcen und wenig verfügbarer Zeit - eine besondere Herausforderung dar. Zusätzlich zu den in dieser Arbeit ermittelten Konzepten, Lernerperspektiven und Leitlinien ist die Berücksichtigung dieser Voraussetzungen von großer Bedeutung für eine gelungene Implementierung. Hohe materielle Anforderungen können insbesondere in diesen Lernorten starke Barrieren darstellen oder zumindest als solche aufgefasst werden.

Um breite Möglichkeiten zur Umsetzung zu schaffen, wurden Unterrichtsmaterialien in verschiedenen Formaten für verschiedene Einsatzsituationen entwickelt und an Kooperationsschulen der Georg-August-Universität Göttingen sowie der Fakultät für Chemie erprobt. Diese umfassen Angebote ...

- für Wahlpflichtunterricht in Klassenstufe 11,
- für Kurse auf grundlegendem Anforderungsniveau (gA) in Klassenstufe 11
- für Kurse auf grundlegendem Anforderungsniveau (gA) in Klassenstufe 12 und
- für Kurse auf erhöhtem Anforderungsniveau (eA) in Klassenstufe 12.

Im Folgenden sollen vier Projekte für diese Klassenstufen vorgestellt werden.

### **7.1.1 Projekt 1: Nanomaterialien im Alltag - Isolierung von und Experimente mit Titandioxid-Nanopartikeln**<sup>17</sup>

#### **7.1.1.1 Ziele und Beschreibung des Projektes**

In dem vorliegenden Projekt wird das Ziel verfolgt, SuS einen grundlegenden Überblick über die wesentlichen Inhalte und Konzepte des Themengebietes „Nano“ anhand von Nanomaterialien in ihrer Lebenswelt zu vermitteln. Die ermittelten Lernerperspektiven lassen insgesamt zwar darauf schließen, dass "Nano" im Lebensalltag durchaus von ihnen wahrgenommen und reflektiert wird, detailliertere Kenntnisse jedoch nur in seltenen Fällen wiedergeben werden können (siehe Kap. 6.1.3). Unsicherheiten treten zudem auch in anderen (Kompetenz-)bereichen auf, so etwa zu Aspekten, wie Entwicklungen aus dem Bereich "Nano" zu bewerten sind, welchen Einfluss diese auf das tägliche Leben haben oder welche Anwendungsgebiete mit dem Begriff "Nano" verknüpft sind.

Diesen Herausforderungen soll im Rahmen des vorliegenden Projektes begegnet und hierzu eine entsprechende Unterrichtseinheit für den Chemieunterricht entwickelt werden. Als Format bzw. Lerngruppe wurde der Wahlpflichtunterricht in der 11. Klassenstufe gewählt<sup>18</sup>. Dieser Schritt bietet mehrere Vorteile: Einerseits gewährt Wahlpflichtunterricht mehr Freiräume hinsichtlich der zu behandelnden Inhalte, andererseits kann in dieser Klassenstufe schon an notwendige fachliche Grundlagen angeknüpft werden. Zudem kann diese Unterrichtseinheit in Kooperation mit einer Partnerschule der Universität Göttingen, dem Otto-Hahn-Gymnasium, durchgeführt, evaluiert und optimiert werden.

Die konkreten Lernziele bzw. zu fördernden Kompetenzen für dieses Unterrichtsprojekt lauten:

1. Die SuS beschreiben Nanotechnologie als interdisziplinäres Forschungsfeld mit großer Bedeutung für Alltag, Wirt- und Wissenschaft (Leitlinie 1<sup>19</sup>, LL2).
2. Die SuS entwickeln ein genaueres Verständnis für die „Nanodimension“ und ordnen Nanomaterialien korrekt in eine Größenskala ein (LL3).
3. Die SuS beschreiben das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis als charakteristische Eigenschaft von Nanomaterialien (LL4).
4. Die SuS können mehrere Nanomaterialien in ihrer Lebenswelt nennen (LL2, LL8).
5. Die SuS planen und führen Schülerexperimente zu Isolation, Nachweis und den Eigenschaften von Titandioxid-Nanopartikeln durch (LL5, LL6).
6. Die SuS erläutern mehrere Eigenschaften und Anwendungen von ausgewählten Nanopartikeln (LL5, LL8).
7. Die SuS erörtern und bewerten den Einsatz von Titandioxid-Nanopartikeln und weiterer Nanomaterialien (LL9).

---

<sup>17</sup> Die Inhalte von Projekt 1 (Kap. 7.1.1) wurden vom Autor zusätzlich in den Fachzeitschriften JOURNAL OF NANO EDUCATION<sup>[144]</sup> und PRAXIS DER NATURWISSENSCHAFTEN – CHEMIE IN DER SCHULE<sup>[239]</sup> veröffentlicht. Mit freundlicher Genehmigung der Verlage (siehe Anhang A4.2, A4.3) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

<sup>18</sup> Unterrichtsangebote für regulären Unterricht in der Sekundarstufe I & II werden in folgenden Kapiteln vorgestellt.

<sup>19</sup> Verweise auf die Leitlinien werden im Text zukünftig mit LL abgekürzt, bspw. LL1.

### 7.1.1.2 *Inhalte und didaktisch-methodische Überlegungen*

Neben der Vermittlung der grundlegenden theoretischen Erkenntnisse zu „Nano“ ist der zentrale Inhalt dieses Projektes die (experimentelle) Untersuchung von Nanomaterialien aus der Lebenswelt der SuS – aber welches entsprechende Nanomaterial eignet sich dafür nun besonders gut? Längst sind in unserem Alltag eine Vielzahl verschiedener Nanomaterialien zu finden: Beispielsweise remineralisieren Hydroxylapatit-Nanopartikel in Zahnpasta empfindliche Zähne, Silber vermindert Gerüche an Textilien und Silica erhält die Rieselfähigkeit von Salz und Gewürzen. Viele SuS geben an, ein großes Interesse an diesem Themengebiet zu besitzen (siehe Kap. 6.1.3). Dieses Interesse soll nun aufgegriffen und vertieft werden, indem SuS Nanomaterialien aus Alltagsgegenständen isolieren, nachweisen sowie ihre Eigenschaften experimentell erschließen. Auf der Suche nach Alltagsprodukten, die Nanomaterialien enthalten (beispielsweise in der Nanoproduktdatenbank des BUND) stößt man schnell auf eine Vielzahl an Artikeln aus dem Haushalt, die für den experimentellen Chemieunterricht jedoch nur eingeschränkt geeignet sind. So beinhalten viele Produkte, nur sehr geringe Mengen an Nanomaterial, die sich mit schulischen Mitteln nur unter hohem Aufwand oder gar nicht isolieren lassen bzw. in ihrer Struktur stark verändert oder zerstört werden. Beispiele sind etwa Gold- und Silber-Nanopartikel in Körperpflegeprodukten, Siliziumdioxid-Nanopartikel in Nahrungsmitteln, Lacken und Farben oder auch Carbon Nanotubes in Tennisschlägern und Textilsprays.

Darüber hinaus eignen sich nicht alle isolierbaren Nanomaterialien für die Schule. Viele Eigenschaften, wie etwa Festigkeit und Leitfähigkeit von Carbon Nanotubes, sind in diesem Rahmen nur schwer zu untersuchen. Des Weiteren wurden zu vielen Materialien noch keine Schulexperimente entwickelt oder die isolierten Materialien weisen ein noch ungeklärtes Gefahrenpotenzial auf. Ein möglicherweise besser geeigneter Stoff für die unterrichtliche Behandlung ist Titandioxid, welcher in nanoskaliger Größe in vielen Alltagsprodukten und in oftmals hoher Konzentration Verwendung findet (bspw. in Zahnpasta <sup>[240]</sup>, Verpackungsmaterialien sowie als Beschichtung auf Textilien <sup>[241, 242]</sup>). Zudem ist das Material weitgehend thermisch und chemisch stabil, leicht zu handhaben und ungefährlich; eine Isolierung kann daher einfach mit geringem apparativen Aufwand im Chemieunterricht erfolgen, beispielsweise durch einfaches Kalzinieren. Weiterhin liegen zum Thema Titandioxid bereits anschauliche und erprobte Schulexperimente vor <sup>[243]</sup>, sodass SuS mit dem selbst isolierten Nanomaterial in Anschlussexperimenten weitere Eigenschaften und Anwendungen erarbeiten können. Aus fachdidaktischer Perspektive ergeben sich daher vielfältige Möglichkeiten, über die Lebenswelt von SuS Zugänge zu den Themen „Nano“ und „Titandioxid“ in einem Unterrichtskonzept synergistisch miteinander zu vernetzen.

Für die schulische Behandlung bietet sich eine dreigeteilte Gliederung der Einheit an, welche aus einem Einführungsseminar, einem experimentellen Teil sowie der Reflexion und Bewertung des Einsatzes von Nanotechnologie besteht (siehe Abbildung 38).

1   Einführungsseminar	2   Experimenteller Abschnitt	3   WebQuest
"Nano" in Wissenschaft und Alltag Einstieg über das Herstellen von Alltagsbe- zügen, interdisziplinärer Charakter, heutige & zukünftige Bedeutung in Alltag, Wissen- schaft und Industrie.	Isolierung von TiO <sub>2</sub> -NP 1.1 aus Sonnencreme und anderen Alltagsgegenständen	Diskussion Erschließen des Gefahrenpotenzials von TiO <sub>2</sub> -Nanopartikeln für Mikroorganismen. Übertragung auf potenzielles Risiko für Mensch, Tier und Umwelt.
"Nano"-Grundlagen Größendimension, Definition, Morpholo- gien von Nanomaterialien, besondere Ei- genschaften	Indirekter Nachweis von Titan 1.2 Nasschemischer Nachweis von Titan- Ionen	WebQuest zur Bewertung des Einsatzes verschiedener Nano-materialien in diversen Kontexten (Nahrung, Industrie, Kosmetik, ...)
Größendimension Vergleich der "Nano"-Ebene und makros- kopischer Ebene über eine REM-Aufnahme	1.3 Photokatalyse mit TiO <sub>2</sub> -NP Entfärbung von Farbstoffen	Ergebnissicherung Erstellen und Präsentieren des Handouts
Charakteristische Eigenschaften "Nanocubes"-Experiment, Oberfläche-zu- Volumen-Verhältnis	1.4 Superhydrophile Nanoschicht Superhydrophilie, Bottom-Up- Synthese, Transparente TiO <sub>2</sub> -Schicht	Abschluss Expertendiskussion zu Nanotechnologie
	1.5 Antibakterielle Wirkung auf Joghurt-Kulturen	

**Abbildung 38 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.**

Insgesamt ist die Einheit für etwa 10 Unterrichtsstunden bzw. 5 Doppelstunden ausgelegt, sie kann aber hinsichtlich des Umfangs und der inhaltlichen Tiefe an die konkreten Bedürfnisse der Lernenden und Lehrenden angepasst werden. Im weiteren Verlauf wird ein Beispiel für die unterrichtliche Umsetzung beschrieben, welche so auch in einer 11. Klasse an einem niedersächsischen Gymnasium durchgeführt wurde.

### 7.1.1.3 Ablauf des Unterrichtsprojektes und Materialien

Die Resultate der Lernerbefragung haben die eingangs gestellte These bestätigt, dass viele SuS nur sehr wenige und diffuse Fachkenntnisse zum Thema „Nano“ besitzen. Insofern kann zu Beginn der Unterrichtseinheit kaum an vorhandenes Wissen angeknüpft werden; stattdessen müssen entsprechende fachliche Grundlagen aufgebaut werden. In dem ersten Abschnitt, dem Einführungsseminar, befassen sich SuS daher mit den notwendigen allgemeinen nanowissenschaftlichen Grundlagen (LL1).

#### Einführungsseminar

Der Einstieg in die Thematik erfolgt zunächst über die Sammlung von Alltagsbezügen, die SuS zum Themengebiet „Nano“ kennen oder vermuten (LL2). Abgrenzend zu ihren persönlichen Kenntnissen zeigt die Anzahl und Breite der gesammelten Nennungen aus der gesamten Lerngruppe, dass bereits heute eine breite Vielfalt an „Nano-Produkten“ aus verschiedenen Bereichen existiert (LL7 & LL8). Abbildung 39 zeigt Beispiele, die hierzu von SuS genannt werden können.



Abbildung 39 – Nanomaterialien im Alltag.

Anknüpfend an die von ihnen genannten Alltagsbeispiele werden die SuS gebeten, deren Eigenschaften zu beschreiben und diese den Schulfächern, Biologie (Lotos-Effekt), Chemie (Motoröl-Additiv, Lackpolitur), Physik (nanoskalige Hardwarekomponenten, bspw. der Transistorenabstand bei Computerprozessoren), zuzuordnen. Auch wenn die SuS die detaillierten Funktionen der Nanomaterialien nicht kennen, dienen sie dennoch als Grundlage für Fragen und Diskussionen. Als Resultat wird indes herausgestellt, dass Nanotechnologie eine interdisziplinäre Technologie ist und die nanoskalige Größendimension ihr verbindendes Element (LL1, LL3). Bei Bedarf können an dieser Stelle weitere eindrucksvolle und alltagsnahe Anwendungsbeispiele (Lotus-Effekt, Haifischhaut, Sonnencreme) thematisiert werden (siehe Abbildung 22 a).

Während dieses Abschnitts entwickeln SuS eine Vielzahl von Fragen – wie genau beeinflusst die Größe die Eigenschaften eines Materials? Und wie klein ist eigentlich „Nano“? Auf die Beantwortung dieser Fragen, oder konkret: die Vermittlung einer detaillierteren Vorstellung zu nanoskaligen Größendimensionen, wird der erste Schwerpunkt des Einführungsseminars gelegt (LL3).

Für eine Einführung in die Nanodimension werden in der Literatur<sup>[244]</sup> oftmals Analogien oder Größenvergleichen verwendet; auch auf dem Internetauftritt der Bundesregierung findet sich ein entsprechendes Beispiel (siehe Abbildung 40).

Die Bundesregierung

---

### Was ist Nanotechnologie?

Ein Nanometer verhält sich zu einem Meter wie eine Haselnuss zur Erde.

Foto: Picture-Alliance / Photoshot

Normalerweise bestimmen sich Technologien durch ihren Anwendungsbezug. Die Luftfahrttechnologie beispielsweise beschäftigt sich mit der Entwicklung und Verbesserung von Flugzeugen.

Die Nanotechnologie jedoch grenzt sich nicht durch ihren Anwendungsbezug von anderen Technologien ab.

Vielmehr bestimmt sich die Nanotechnologie zunächst nur durch die Größe der Materialien, die untersucht werden. Ganz allgemein sind diese kleiner als 100 Nanometer bis hin zur Größe eines Atoms.

Foto: earth observatory/nasa

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

---

**Ministerium**      **Themen**      **Service**

---

[Startseite](#) • [Themen](#) • [Gesundheit](#) • [Chemikalien](#) • [Nanotechnologie](#) • [Kurzinfor](#)

---

#### Kurzinfor Nanotechnologie

Nanometer

:

Meter

© BMU/Broschüre: www.bmu.de/Steigfeldt-und-Herzig

Die Vorsilbe "Nano" gibt bereits einen Hinweis darauf, dass man es bei dieser Querschnittstechnologie mit äußerst kleinen Strukturen zu tun hat. Nano ist die Vorsilbe für die Maßeinheit Nanometer (nm), die ein Milliardstel von einem Meter beschreibt. Im Oktober 2011 veröffentlichte die Europäische Kommission eine Empfehlung, nach der Nanomaterialien auf eine Größe von etwa 1 bis 100 Nanometern definiert werden (Ausnahmen möglich).

Abbildung 40 – Beispiele für Analogien zur Vorstellung eines Nanometers<sup>[245, 246]</sup>.

Solche Ansätze können allerdings kritisch gesehen werden, da es für SuS sehr anspruchsvoll ist, die sich die Größe des Planeten Erde vorzustellen (gleiches gilt im Übrigen auch für Lehrkräfte).

Um den Lernern das Verständnis dieser Größendimension zu erleichtern, wird in diesem Projekt eine eigene Herangehensweise gewählt. Hierbei werden ein relativ kleines Objekt der makroskopischen Ebene (menschliches Haar,  $\varnothing$  100  $\mu\text{m}$ ) und ein relativ großes Objekt der nanoskaligen Ebene (Silica Nanopartikel:  $\varnothing$  125 nm) in einer rasterelektronenmikroskopischen Darstellung verglichen.

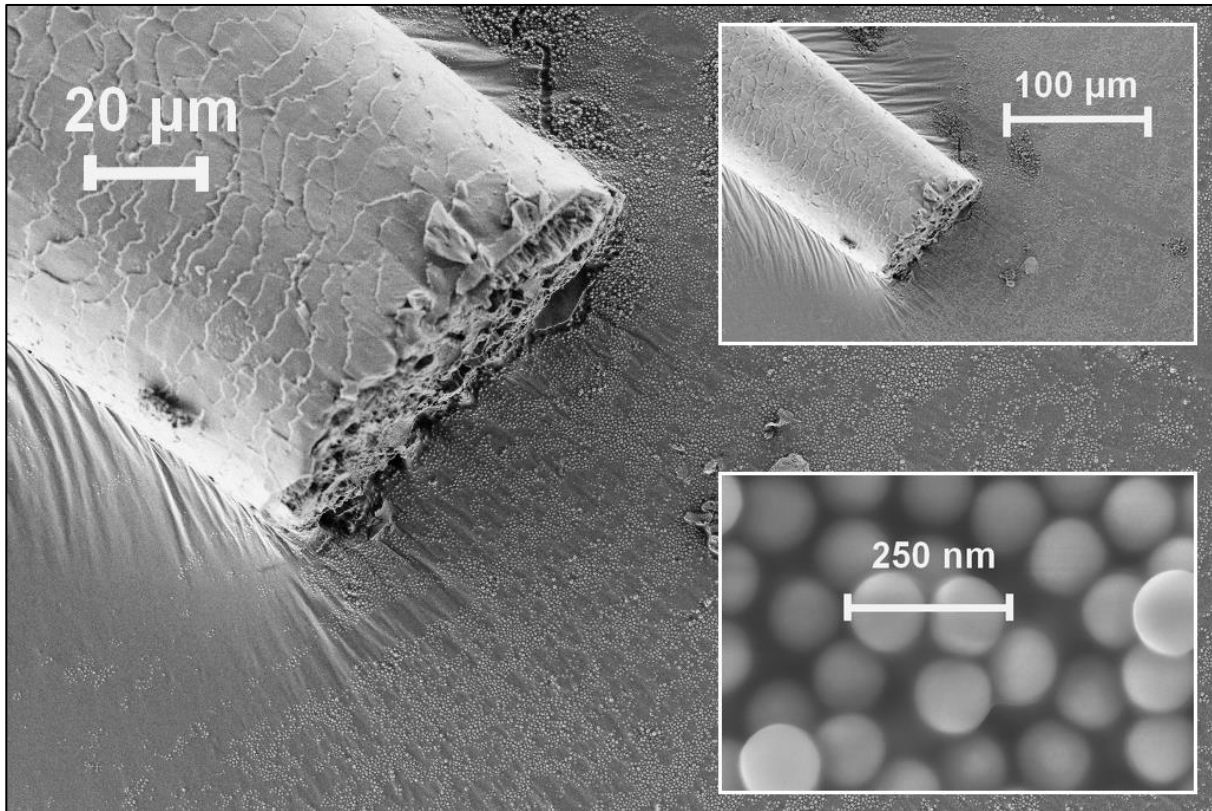


Abbildung 41 – Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines menschlichen Haares und sphärischer Silica-Nanopartikel mit eingezeichneten *scale bars*.

Abbildung 41, welche beide Ebenen vereint, wird den SuS präsentiert; dazu erhalten diese die Aufgabe, mithilfe der *scale bars* die Anzahl der Silica-Nanopartikel zu berechnen, welche nebeneinander gelegt den Durchmesser des Haares ergeben (800). Insgesamt sollte durch diese Vorgehensweise und den Bezug zu (be)greifbaren Objekten und Zahlenräumen ein illustrativer und greifbarer Vergleich erhalten werden. Eigene Erfahrungen bei der unterrichtlichen Durchführung ergeben, dass etwa 8 von 10 SuS im weiteren Unterrichtsgang auf dieses Erklärungsbeispiel zurückgreifen und verweisen werden.

Neben der Größendimension wird der zweite Schwerpunkt auf das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis gelegt (LL4). Diese Eigenschaft, welche ein wesentliches Charakteristikum von Nanomaterialien darstellt, soll von den SuS mithilfe eines simplen („Nanocubes“-)Modellexperiments selbst erarbeitet werden. In diesem wird durch die kontinuierliche Teilung eines Würfels in nanoskalige Teilchen diese Dimension auf einfache Weise erschlossen; gleichzeitig betrachten SuS dabei die steigende Gesamtoberfläche aller Würfel (siehe Abbildung 42).



**Abbildung 42 – Einfaches Modellexperiment für eine mathematische Erschließung des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses über die fortgesetzte Teilung eines Würfels.**

Es ist nun die Aufgabe der SuS, eine Formel für die Berechnung der gesamten Oberfläche aller Würfel bei einer beliebigen Anzahl an Teilungen zu abzuleiten. Auf den ersten Blick erscheint es sehr anspruchsvoll, die Oberfläche so vieler Würfel mathematisch zu beschreiben. Hier hat es sich in der Unterrichtspraxis besonders bewährt, den Vorgang der Teilung zunächst an echten Würfeln zu demonstrieren. Mithilfe einer strukturierten Hilfestellung (Tabelle 11) können die SuS jedoch anschließend eine allgemeine Formel für die Abhängigkeit der Gesamtoberfläche von der Partikelgröße bzw. dem Zerteilungsgrad aufstellen.

**Tabelle 11 – Ausschnitt eines Arbeitsblattes mit strukturierter Lernhilfe für die Berechnung der Gesamtoberfläche und Ermittlung einer Formel zur Beschreibung derselben. Die von den SuS auszufüllenden Felder sind grau hinterlegt.**

Teilungen	Anzahl der Würfel	Kantenlänge $a$ [cm]	Oberfläche $A$
0	1	1	$6 \text{ cm}^2$
1	8	$1/2$	$12 \text{ cm}^2$
2	64	$1/4$	$24 \text{ cm}^2$
3	512	$1/8$	$48 \text{ cm}^2$
4	4.096	$1/16$	$96 \text{ cm}^2$
5	32.768	$1/32$	$192 \text{ cm}^2$
12	68.719.476.736	$1/4.096$	$24.576 \text{ cm}^2$
n	$8^n$	$a/2^n$	$8^n \cdot 6 \cdot (a/2^n)^2$

Durch die vorgegebenen Tabellenspalten kann die gesuchte Formel auf ihre zwei Kernelemente reduziert werden - die Anzahl aller Würfel und die Oberfläche eines Würfels.

$$\text{Oberfläche} = \text{Anzahl aller Würfel} \cdot [\text{Seiten eines Würfels} \cdot (\text{Kantenlänge eines Würfels})^2]$$

Allgemein formuliert ergibt sich schließlich die Formel:

$$A = 8^n \cdot 6 \cdot (a / 2^n)^2$$



welche anhand von der Tabellenreihe 12 überprüft werden kann. Zudem verfolgt die Hilfestellung das Ziel, den SuS die Ergebnisse zu visualisieren und somit das Herleiten der Formeln zu erleichtern.

Mithilfe eines grafikfähigen Taschenrechners oder eines Tabellenkalkulationsprogramms werden anschließend von den SuS die Gesamtoberfläche gegen die Kantenlänge grafisch aufgetragen (siehe Abbildung 43).

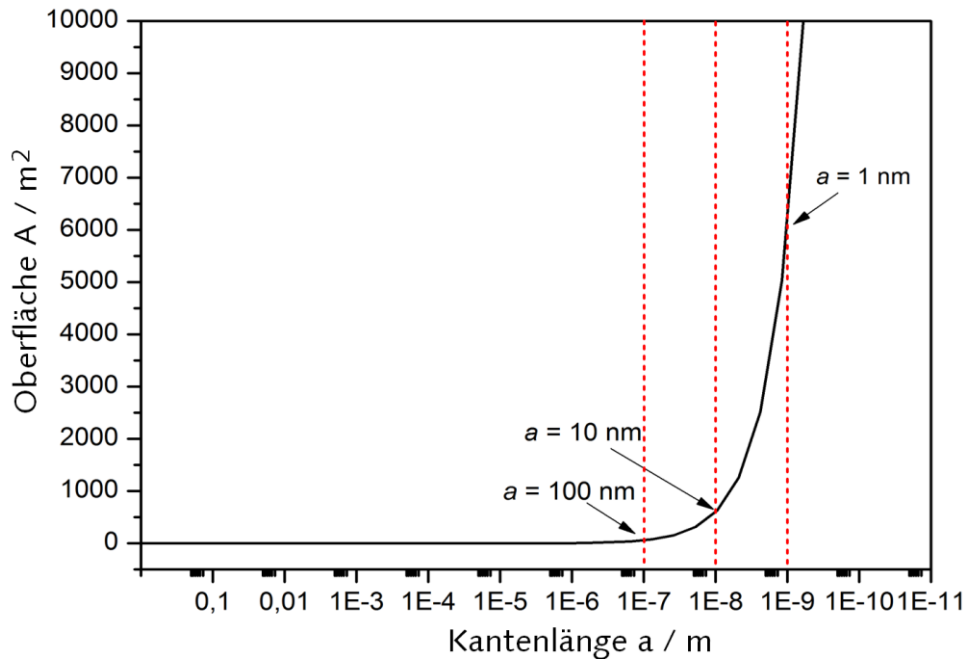


Abbildung 43 – Graph der ermittelten Funktion.

Die SuS erhalten nun die Aufgabe, das erhaltene Diagramm zu interpretieren. Dabei stellen sie einen starken Anstieg der Gesamtoberfläche (auf bis zu  $6.000 \text{ m}^2$ ) fest, sobald die Kantenlänge der Würfel in nanoskalige Dimensionen (1 - 100 nm) fällt – das Volumen bleibt dabei konstant. Somit kann von den SuS das gesteigerte Verhältnis von Oberfläche zu Volumen als wichtige Eigenschaft von Nanomaterialien hergeleitet werden. Um dieses Verständnis zu vertiefen, können darüber hinaus verschiedene Bulk- und Nanomaterialien zu diesem Zusammenhang hinsichtlich der Adsorptionskapazität verglichen werden. Um Letzteres zu illustrieren, wird den SuS das folgende Modell auf einer Folie präsentiert (LL5, Abbildung 44).



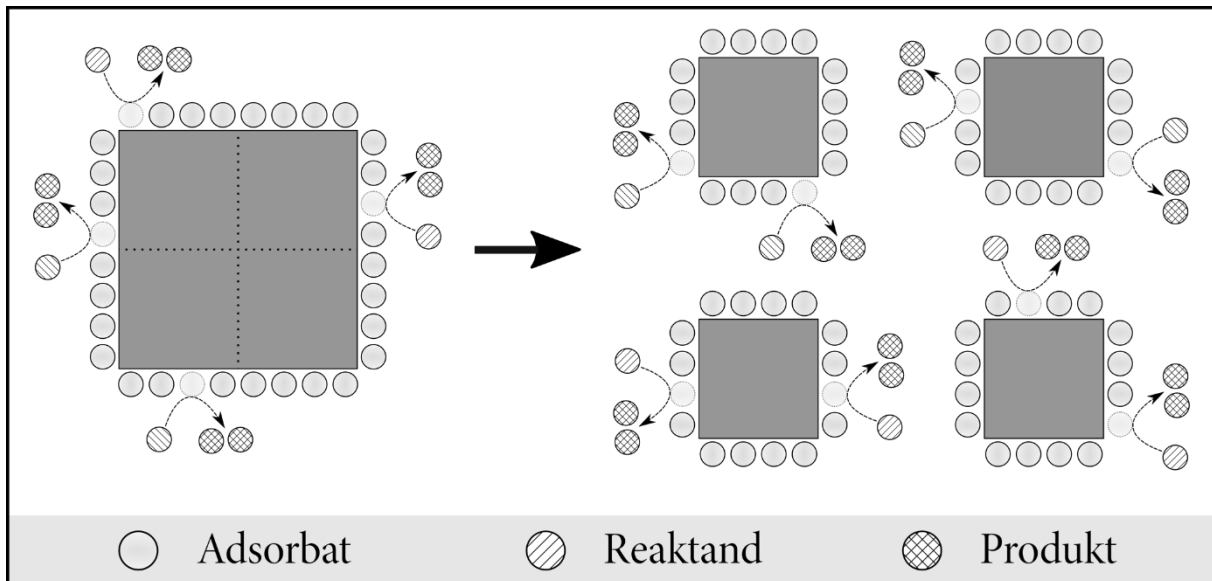


Abbildung 44 – Vereinfachtes zweidimensionales Modell: Illustration der Bedeutung der Oberfläche verschiedener (Nano-)Partikel für die Adsorption und Reaktivität.

Basierend auf diesen offenkundigen Struktur-Eigenschafts-Zusammenhängen („je kleiner die Partikel, desto mehr Moleküle können adsorbiert werden“) können die SuS im Unterrichtsgespräch dieses Modell besprechen – hierbei leiten sie die gesteigerte Katalyseleistung mit einem einfachen Kollisionsmodell her. Weitere Aufgaben und Arbeitsblätter hierzu finden sich im Anhang dieser Arbeit (A3.1).

### Experimenteller Abschnitt

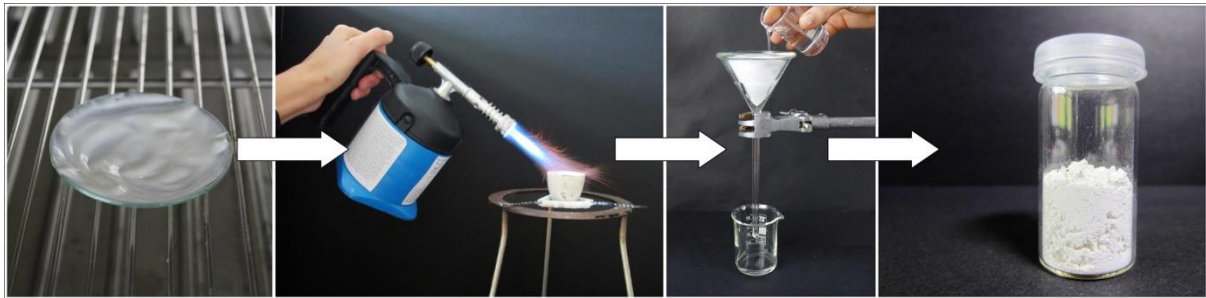
Im Anschluss an das Einführungsseminar fokussiert der zweite Abschnitt praktische Zugänge zu den theoretisch behandelten Inhalten – konkret sollen die SuS insbesondere die Herstellung und Eigenschaften von Nanomaterialien experimentell erschließen. Der Fokus dieses Abschnitts soll aus den oben erwähnten Gründen im Wesentlichen auf Titandioxid-Nanopartikeln liegen. Ein geeigneter Einstieg ist daher an dieser Stelle dessen Isolation aus Alltagsgegenständen (LL2, LL8). Das nachfolgende Experiment 1.1 stellt eine einfache Möglichkeit vor, wie SuS Titandioxid-Nanopartikel zum Nachweis und für weitere Experimente gewinnen. Im Anschlussexperiment 1.2 weisen sie Titan dabei nasschemisch nach.

#### Experiment 1.1 - Isolierung von Nanopartikeln aus Sonnencreme

Ein einfacher Weg, um große Mengen Titandioxid-Nanopartikel zu gewinnen und gleichzeitig Alltagsbezüge herzustellen, ist die Kalzinierung von ausgewählten Alltagsgegenständen. Diese Möglichkeit soll in diesem Experiment am Beispiel von Sonnencreme gezeigt werden; alternativ sind aber auch viele andere Produkte geeignet, wie etwa Schokolinsen, Kaugummis und Zahnpasta.

*Geräte und Chemikalien:* verschiedene Sonnencremes mit Titandioxid-Nanopartikeln als mineralischer UV-Filter, verdünnte Salzsäure (ca. 1 M), Porzellantiegel, Dreifuß mit Tondreieck, Gasbrenner, Uhrglas, Trichter, Becherglas, Faltenfilter, Filtriergestell.

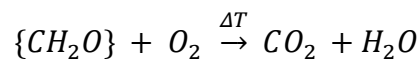
**Versuchsdurchführung:** Eine kleine Menge Sonnencreme (ca. 10 g) wird auf einem Uhrglas verteilt und für mindestens 2 Stunden im Trockenschrank oder Ofen bei 120 °C getrocknet, um Siedeverzug und lange Versuchszeiten im Unterricht zu vermeiden. Anschließend wird die zu untersuchende Probe in den Porzellantiegel gegeben und kalziniert. Dazu wird der Tiegel mithilfe des Tondreiecks auf dem Dreifuß befestigt und mit einem Gasbrenner zunächst von oben und anschließend von allen Seiten für mindestens 5 Minuten erhitzt (siehe Abbildung 45). Das erhaltene Pulver kann ggf. zur Aufreinigung mit 3 mL verdünnter Salzsäure gewaschen und filtriert werden.



**Abbildung 45 – Isolierung des mineralischen Filters;** die Sonnencreme wird getrocknet, kalziniert, gewaschen, filtriert. Schließlich werden die verbleibenden anorganischen Bestandteile als weißes Pulver erhalten.

**Beobachtung:** Beim Erhitzen wird zunächst schwarze Asche sichtbar; bei fortgesetzter Wärmezufuhr ist diese nicht mehr zu erkennen. Es verbleibt ein weißes Pulver als Rückstand.

**Auswertung:** Durch das starke Erhitzen werden alle organischen Komponenten der Probe (Fette, Öle, Glycerin, ...) umgesetzt. Dies kann im Unterricht auf Formelebene wie folgt dargestellt werden:



wobei  $\{CH_2O\}$  idealisiert für die organischen Verbindungen in der Probe steht. Aufgrund der hohen Temperaturstabilität (Siede-/Sublimationstemperatur) verbleibt das mineralische Titan-dioxid im Tiegel.

**Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:** Die folgende Auswertungsaufgabe bietet eine zusätzliche Möglichkeit, die Reaktion und ablaufenden Prozesse zu erschließen und Kenntnisse zur Verbrennung von Kohlenwasserstoffen zu wiederholen und festigen:

*Aufgabe 1: Geben Sie an, welche Stoffe (zusätzlich zum weißen Pulver) höchstwahrscheinlich bei der Verbrennung der organischen Restsubstanzen entstehen. Entwerfen und erläutern Sie einen experimentellen Aufbau (Skizze), um diese nachzuweisen.*

Anhand des Etiketts können die SuS eine Vielzahl der Inhaltsstoffe als organische Kohlenwasserstoffe identifizieren (bspw. Glycerin, Alkohol, ...). Da bei deren (idealisierter) Verbrennung Kohlenstoffdioxid und Wasser entstehen, können die SuS der 11. Klasse die Kalkwasserprobe und wasserfreies Kupfersulfat als geeignete Nachweise anführen. Der Entwurf eines Experimentes fördert hierbei zusätzlich den Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung; ggf. kann diese

Aufgabe im Sinne einer Binnendifferenzierung von einer besonders leistungsstarken Schülergruppe als Demonstrationsexperiment vorbereitet und durchgeführt werden.

### **Experiment 1.2 – Indirekter Nachweis von Titandioxid-Nanopartikeln**

Titandioxid wird in einer Vielzahl an Alltagsprodukten eingesetzt und dient dort unter anderem als Weißpigment zur Aufhellung (bspw. von Textilien), als UV-Filter (bspw. in Sonnencreme oder Kosmetika) und als Schmelzschutz (bspw. als Überzug für Schokolade). In Lebensmitteln wird es unter der Bezeichnung E 171 aufgeführt. Heutzutage liegt dieser Stoff in Alltagsgegenständen häufig in nanopartikulärer Form vor <sup>[125,247]</sup>. Titandioxid-Nanopartikel können indirekt nasschemisch über einen sauren Aufschluss und anschließendem Nachweis der Titan-Ionen mit Wasserstoffperoxid als orange-gelber Titanperoxo-Komplex identifiziert werden.

*Geräte und Chemikalien:* Weißes Pulver aus Experiment 1.1, Kaliumhydrogensulfat, Schwefelsäure (2 M), Wasserstoffperoxid-Lösung (3 %), Gasbrenner, Reagenzglas, Reagenzglashalter.

*Versuchsdurchführung:* Für den sauren Aufschluss wird die fünffache Menge Kaliumhydrogensulfat zu dem Filtrückstand aus Experiment 1.1 in ein Reagenzglas gegeben und vorsichtig so lange im Abzug erhitzt, bis das Gemisch schmilzt und weiße Dämpfe aufsteigen. Nachdem die Schmelze erstarrt ist, wird dieselbe Menge an verdünnter Schwefelsäure hinzugegeben und ebenfalls vorsichtig bis zum Sieden und Lösen der Schmelze erhitzt. Anschließend wird ein Tropfen der Wasserstoffperoxid-Lösung hinzugegeben.

In ein zweites Reagenzglas (positive Blindprobe) werden statt der eigenen Probe 0,1 g Titandioxid gegeben und wie oben beschrieben fortgeföhren.

*Beobachtung:* Nach Mischen der Probe mit Kaliumhydrogensulfat, anschließendem Erhitzen des Gemischs und folgender Zugabe von verdünnter Schwefelsäure bildet sich eine farblose Lösung. Beim Zutropfen von Wasserstoffperoxid-Lösung föhrt sich diese intensiv orange-gelb (siehe Abbildung 46). Bei der zweiten Probe wird Gleiches beobachtet.

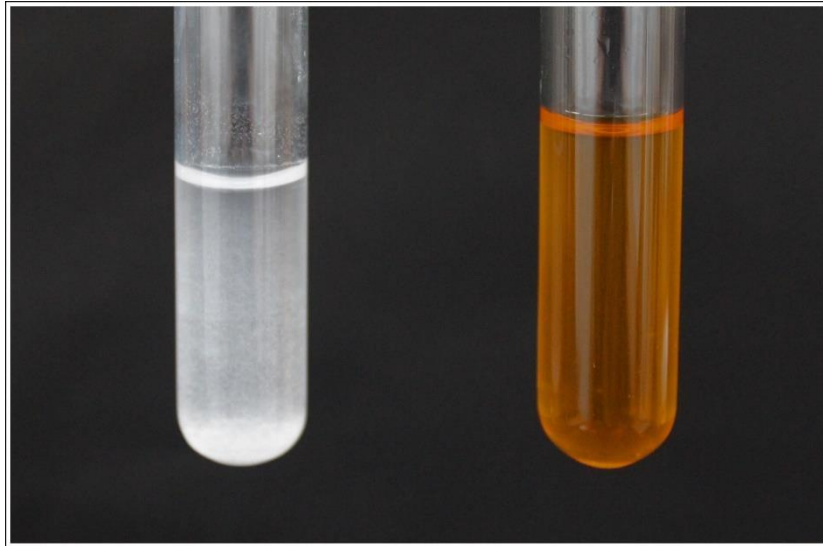


Abbildung 46 – Nachweis von Titan-Ionen; Lösung der untersuchten Probe vor (links) und nach der Zugabe von Wasserstoffperoxid-Lösung (rechts).

*Auswertung:* Beim Aufschluss von Titandioxid mit Kaliumhydrogensulfat entsteht wasserlösliches Titanyl-sulfat, das im Unterricht auf Formelebene wie folgt dargestellt werden kann <sup>[248]</sup>:



Bei der Zugabe von Wasserstoffperoxid-Lösung bildet sich der gelb-orangene Titanperoxo-Komplex. Die Intensität der Färbung hängt dabei von der Menge an Titandioxid in der Probe ab. Die Bildung des Komplexes kann auf Formelebene wie folgt dargestellt werden:

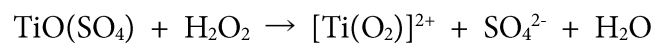


Abbildung 47 zeigt Nachweise von Titan-Ionen bei verschiedenen Alltagsprodukten; für den weiteren Verlauf der Unterrichtseinheit ist Sonnencreme zu empfehlen, da dort die Konzentration an Titandioxid-Nanopartikeln am höchsten ist.

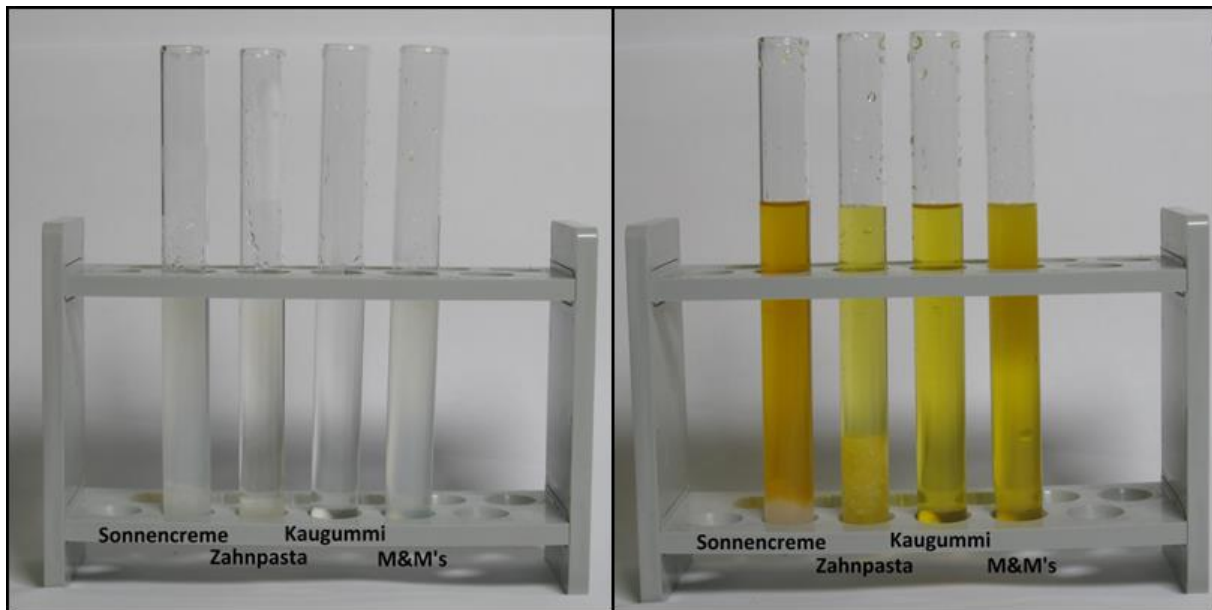


Abbildung 47 – Nachweise von Titan aus verschiedenen Alltagsprodukten (Vortrag MNU Bremerhaven 2013).

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Für die detaillierte Auswertung dieser Nachweisreaktion benötigen die SuS Grundkenntnisse der Komplexchemie. In Lerngruppen, die über entsprechende Kenntnisse nicht verfügen, wurde die entsprechende Reaktion stattdessen auf phänomenologischer Ebene mit Hilfe der positiven Blindprobe ausgewertet. Dies geschieht im Unterrichtsgespräch oder mit Hilfe des folgenden Lückentextes.

*Aufgabe 1: Vervollständigen Sie mit unten angegebenen Wörtern den vorliegenden Lückentext!*

*Titandioxid löst sich nicht in \_\_\_\_\_; mit Hilfe von \_\_\_\_\_ wird das schwerlösliche Titandioxid aber in eine wasserlösliche Verbindung überführt. Mit der zugegebenen Wasserstoffperoxid-Lösung bildet schließlich sich eine Titanverbindung, die \_\_\_\_\_ gefärbt ist. Diese Färbung tritt schon bei einer sehr geringen Konzentration von \_\_\_\_\_-Ionen in der Lösung auf, sodass letztere durch diese Reaktion gut nachgewiesen werden können.*

gelb-orange	Wasser	Titan	Kaliumhydrogensulfat
-------------	--------	-------	----------------------

Als negative Blindprobe kann zusätzlich auch eine Sonnencreme mit organischem UV-Filter-System oder Zinkoxid-Nanopartikeln als mineralischer UV-Filter verwendet werden. Diese Möglichkeit wurde aus Zeitgründen in diesem Unterrichtsgang nicht berücksichtigt, wird aber in Kap. 7.1.3.3 zusammen mit dem entsprechenden Experiment beschrieben.

Die Versuche 1.1 & 1.2 können zunächst in Gruppenarbeit durchgeführt werden, da das Veraschen der Produkte unterschiedlich viel Zeit beansprucht. Das anschließende Schmelzen und der Nachweis selbst können als Schülerdemonstrationsexperiment von je einem SoS aus der

Gruppe durchgeführt werden. Hierfür sollten die SuS jedoch bereits etwas Experimentiererfahrung besitzen, da mit heißer Schmelze und Schwefelsäure gearbeitet wird.

Hinsichtlich des curricularen Anschlusses kann dieser Versuch allgemein unter das Thema Chemie und Ernährung fallen, welches etwa im Kerncurriculum Niedersachsen<sup>[249]</sup> (und weiteren) explizit aufgeführt ist. Direkte Anknüpfungspunkte wären einerseits die Wiederholung bzw. Festigung der Nachweisreaktionen aus den Jahrgangsstufen 7/8 sowie 9/10. Andererseits kann dieser Versuch zudem in den Jahrgangsstufen 9/10 bei den Stoffklassen der Metalloxide bzw. des Metalls Titan Anwendung finden. In der Oberstufe kann zudem die Nachweisreaktion auf Teilchenebene im Rahmen eines Exkurses zur Komplexchemie betrachtet werden und fällt somit unter das Basiskonzept des Donator-Akzeptor-Prinzips.

Nachdem Titandioxid-Nanopartikel erfolgreich isoliert und von den SuS nachgewiesen wurden, stehen im weiteren Verlauf die Eigenschaften dieses Nanomaterials im Mittelpunkt. Für die unterrichtliche Behandlung bietet insbesondere die Anwendung als Photokatalysator besondere Chancen, die Kompetenzbereiche Fachwissen, Erkenntnisgewinnung und Bewertung mit klassischen Inhalten des Chemieunterrichts im Kontext der Green Chemistry zu verknüpfen. Titandioxid-Nanopartikel dienen in vielen Anwendungen als Photokatalysator und sind entsprechend in der Lage, eine Vielzahl von organischen Verbindungen unter Einwirkung von UV-Licht abzubauen. Insbesondere Abwässer können auf diese Weise von belastenden Stoffen gereinigt werden, die mit konventionellen Methoden (wie etwa Filtration, Fällung, ...) nicht oder nur mit großem Aufwand entfernt werden können. Beispiele hierfür sind etwa Medikamentreste (z.B. Östrogen durch künstliche Schwangerschaftsverhütung / „Anti-Baby-Pille“) oder auch Bisphenol A (LL8, LL9).

### **Fachliche Hintergründe: Photokatalytische Eigenschaften von Titandioxid-Nanopartikeln**

Bei nanoskaligem Titandioxid handelt es sich um einen Halbleiter, der in Abhängigkeit der Partikelgröße sehr unterschiedliche optische und photoelektrische Eigenschaften im Vergleich zu den makroskopisch großen Partikeln aufweist. Dies betrifft etwa die Farbe: Wird Bulk-Titandioxid aufgrund seines hohen Brechungsindex als Weißpigment eingesetzt, sind Titandioxid-Nanopartikel mit einem Durchmesser unter 100 nm transparent, da diese ob ihrer geringen Größe nicht mehr mit dem sichtbaren Licht wechselwirken. Diese Eigenschaft wird gegenwärtig in Sonnencremes und Kosmetika ausgenutzt.

Darüber hinaus ändert sich mit der photokatalytischen Aktivität eine weitere photoelektrische Eigenschaft. Durch Anregung in Form von Wärme oder Photonen können Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband promoviert werden. Hierfür muss im Falle der Lichtabsorption die absorbierte Energie mindestens der Energie  $E_G$  der Bandlücke entsprechen. Diese entspricht im Fall von Titandioxid bei der Modifikation Anatas 3,2 – 3,4 eV und bei Rutil 3,0 – 3,1 eV, was einem Wellenlängenbereich von  $< 384$  nm bzw.  $< 409$  nm entspricht<sup>[250]</sup>. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass mit fallender Partikelgröße sich bei Halbleitern die Bandlücke zwischen Va-

lenz- und Leitungsband vergrößert; aus vielfältigen Gründen (Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, passende Energie der Bandlücke  $[E_G]$ , Zugänglichkeit der Oberfläche, ...) weisen Titan-dioxid-Nanopartikel dabei eine weitaus höhere Katalyseleistung auf als Bulk-Titandioxid.

Durch die Anregung wird ein sog. Elektronen-Loch-Paar erzeugt. Hierbei liegen ein angeregtes Elektron im Leitungsband ( $e_{LB}^-$ ) sowie ein unbesetztes Energieniveau im Valenzband ( $h_{VB}^+$ ) vor; letzteres wird auch als Elektronenfehlstelle, Defektelektron oder Elektronenloch bezeichnet <sup>[250]</sup>. Ohne weitere Energiezufuhr fallen die Elektronen in Sekundenbruchteilen in das Valenzband zurück (Rekombination), wobei die Energie in Form von Gitterschwingungen freigesetzt wird <sup>[251]</sup>. In einigen Fällen – bei sog. direkten Halbleitern wie Zinkoxid-Nanopartikeln – kann zusätzlich eine Fluoreszenz beobachtet werden, da das Minimum des Leitungsbandes und das Maximum des Valenzbandes direkt übereinander liegen <sup>[252]</sup> (siehe Kap. 7.1.2.3).

Neben der Rekombination können die Ladungsträger ( $h_{VB}^+$ ,  $e_{LB}^-$ ) jedoch ebenfalls an die Partikeloberfläche diffundieren. Dort wiederum können sie mit umgebenden Stoffen (bspw. dem Lösemittel) Redoxreaktionen eingehen – die Elektronen im Leitungsband reagieren dabei als Elektronendonatoren, Elektronenfehlstellen als Elektronenakzeptoren <sup>[253]</sup> (siehe Abbildung 48).

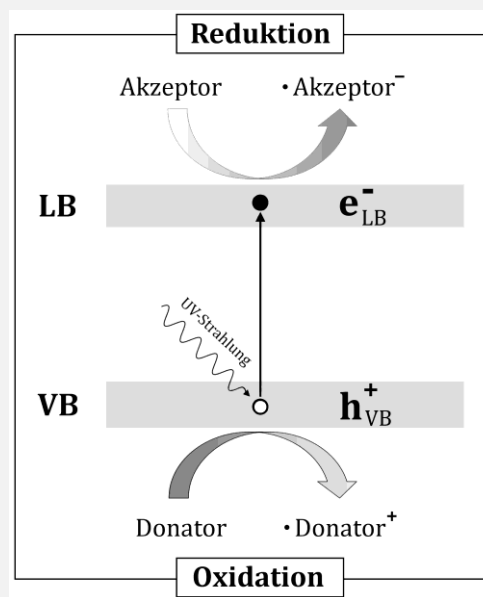
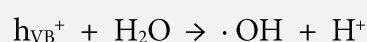


Abbildung 48 – Standardmodell der heterogenen Photokatalyse an Metalloxid-Halbleiterkörnern ( $h_{VB}^+$ : Elektronenfehlstelle im Valenzband, Elektronenakzeptor;  $e_{LB}^-$ : Elektron im Leitungsband, Elektronendonator) nach WÖHRLE, TAUSCH und STOHRER <sup>[250]</sup>.

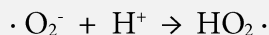
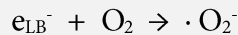
Ausgehend von diesem Punkt können nun eine Vielzahl an Reaktionen ablaufen. Im Hinblick auf eine unterrichtliche Behandlung in der Schule fokussiert sich die folgende (stark vereinfachte) Betrachtung auf die wesentlichen zwei Reaktionen, welche in wässriger Lösung ablaufen.

Die Elektronenfehlstellen ( $h_{VB}^+$ ) besitzen ein sehr hohes Oxidationspotenzial, was eine direkte Reaktion mit Wasser oder Hydroxid-Ionen und damit die Erzeugung von Hydroxylradikalen ermöglicht:





Anders verhält es sich mit den Elektronen im Leitungsband ( $e_{\text{LB}}^-$ ); diese können wiederum durch die Reduktion von gelöstem Luftsauerstoff zunächst Hyperoxid-Radikale und über eine Anschlussreaktion Peroxy-Radikale erzeugen, gemäß <sup>[250]</sup>:



Die hier aufgeführten Grundlagen und Prozesse stellen nur einen sehr stark vereinfachten Ausschnitt dar. Detailliertere Beschreibungen finden sich in der fachwissenschaftlichen Literatur, besonders hervorzuheben sind dabei WÖHRLE, TAUSCH und STOHRER <sup>[250]</sup>.

Im folgenden Modellexperiment sollen die Grundlagen der Photokatalyse erschlossen werden. Dieser Versuch kann thematisch je nach Unterrichtsgang und curricularen Anforderungen in die Kontexte der Luft- oder Abwasserreinigung eingebettet werden. Als Modellsubstanz für einen löslichen, organischen Farbstoff können hierbei etwa ungefährliche Farbstoffe wie Methylenblau oder auch (für einen stärkeren Alltagsbezug) Gemüse- bzw. Fruchtsäfte verwendet werden.

### Experiment 1.3 – Photokatalyse mit Titandioxid-Nanopartikeln

*Geräte und Chemikalien:* Titandioxid-Nanopartikel, Methylenblau-Lösung (0,2 %) oder Fruchtsaft<sup>20</sup>, demin. Wasser, UV-Lampe (UV-Handlampe oder besser: Ultra-Vitalux-Lampe [300 W] mit Fassung), Magnetrührer, Magnetührstäbchen, Waage, Spatel, 4 Bechergläser (100 mL), Messpipette, Messzylinder, Stativ, Klemme, Muffe

*Versuchsdurchführung:* Die UV-Lampe wird in das Stativ eingespannt und direkt über dem Magnetrührer angebracht. In alle Bechergläser (BG) werden 1 mL 0,2 %ige Methylenblau-Lösung, 50 mL demin. Wasser und jeweils ein Magnetührstäbchen gegeben und anschließend werden sie auf Magnetrührer platziert. In BG 1 und 3 werden je 2 g Titandioxid-Nanopartikel mit einem Spatel hinzugegeben. BG 1 und 2 werden für einige Minuten unter Rühren mit UV-Licht bestrahlt; BG 3 und 4 werden vor der UV-Strahlung geschützt (siehe Abbildung 49). Nach Eintreten einer sichtbaren Farbänderung kann für ein klareres Resultat der Magnetrührer ausgeschaltet werden, sodass die Titandioxid-Nanopartikel sedimentieren können.

<sup>20</sup> Hierbei ist darauf zu achten, möglichst keine Säfte mit hohem Gehalt bzw. Zusatz von Vitamin C oder anderen Antioxidantien zu verwenden, da diese die benötigte Reaktionsdauer signifikant erhöhen.



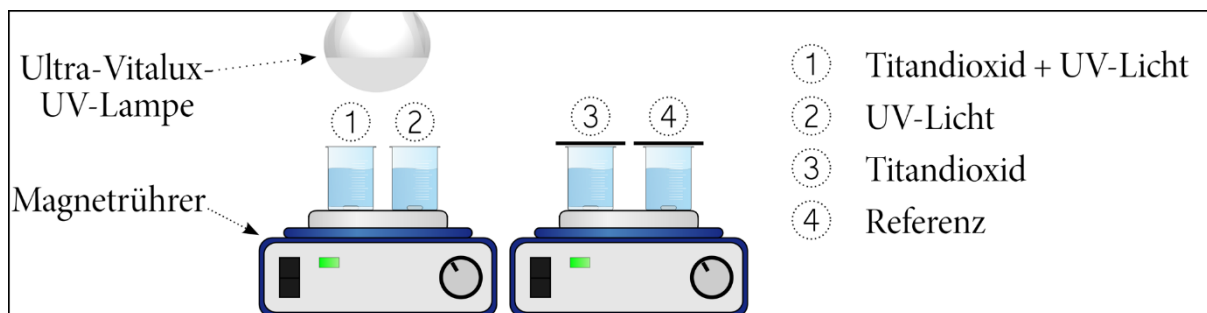


Abbildung 49 – Experimenteller Aufbau für die photokatalytische Zersetzung von Methylblau.

**Beobachtung:** Nach 5 Minuten Bestrahlung mit UV-Licht hat sich die Lösung in BG 1 entfärbt. Die Lösungen in den BG 2 und 3 entsprechen der Rückstellprobe (BG 4). Abbildung 50 zeigt die Lösungen nach fünfminütiger Bestrahlung mit UV-Licht.

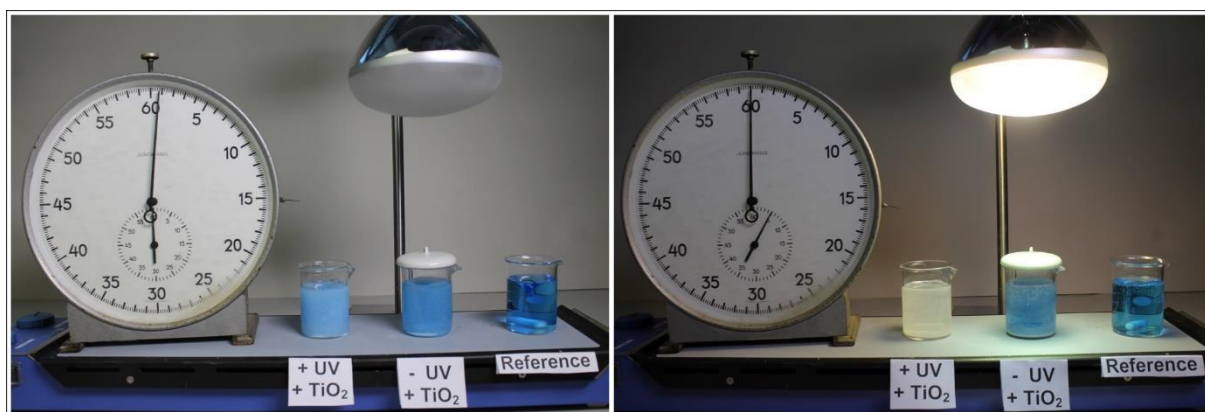
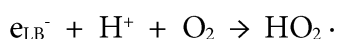
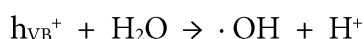


Abbildung 50 – Ausgewählte Proben nach der Reaktion: BG 1 (links), BG 3 (mitte) sowie BG 4 (rechts). Da sich BG 2 und BG 4 nicht unterscheiden, wird BG 2 aus Platzgründen nicht aufgeführt.

**Auswertung:** Durch Bestrahlung mit energiereichem UV-Licht werden Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt. Durch diesen Prozess entstehen sogenannte Elektron-Loch-Paare, bestehend aus Elektronen im Leitungsband ( $e_{LB}^-$ ) und Elektronenfehlstellen (Löchern) im Valenzband ( $h_{VB}^+$ ). An der Titandioxid-Partikeloberfläche adsorbierte Moleküle, wie bspw. Wasser oder Hydroxid-Ionen, können mit diesen Ladungsträgern in Redoxreaktionen zu verschiedenen Radikalspezies reagieren, etwa gemäß:



Die entstehenden Radikale reagieren auf vielfache Weise mit dem Farbstoff Methylblau, wodurch dieser unter fortwährender Bestrahlung und idealen Bedingungen nahezu vollständig zu Kohlenstoffdioxid und Wasser zersetzt werden kann.

Dieses Experiment kann vertiefend auch über eine photometrische Messung ausgewertet werden; eine entsprechende Durchführung wird in Kap. 7.2.1 beschrieben.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Die Photokatalyse im Allgemeinen und das vorgestellte Experiment im Besonderen können für verschiedene Lerngruppen auf unterschiedlichen Auswertungsebenen ausgewertet werden. Für die vorliegende Lerngruppe wurde eine phänomenologische Betrachtung ausgewählt; hierbei wurde von den SuS festgehalten, dass Titandioxid-Nanopartikel (allgemeiner: Photokatalysatoren) unter UV-Licht organische Farbstoffe zerstören. Eine vertiefte Auswertung auf Teilchenebene für einen Oberstufenkurs am Beispiel des Abbaus einer einfachen organischen Verbindung (Acetaldehyd) findet sich in Kap. 7.1.4.3 und entsprechende Materialien im Anhang (A3.2).

Zur konkreten Auswertung des Versuches kann den SuS eine Tabelle als strukturierte Hilfestellung vorgegeben werden (siehe Tabelle 12). Je nach verfügbarer Zeit, Unterrichtsgang und Leistungsstärke der Klasse können die notwendigen Bedingungen der Photokatalyse dabei selbst von den SuS durch geschickte Planung des Experiments erarbeitet und somit neben dem Kompetenzbereich Fachwissen zusätzlich der Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung gefördert werden.

**Tabelle 12 – Strukturierte Lernhilfe mit Musterlösung zur Auswertung der photokatalytischen Zersetzung von Methylblau (ME, Experiment 1.3).** Die von den SuS einzutragenden Felder sind dunkelgrau hinterlegt; sollen die Bedingungen für eine Photokatalyse von den Lernenden selbstständig ermittelt werden, können auch die hellgrau hinterlegten Felder frei gelassen werden.

Teilversuch	Durchführung	Beobachtung	Ergebnis
1	MB + UV + Titandioxid	Entfärbung nach einigen Minuten	MB wurde zersetzt
2	MB + UV	Keine Änderung	Ohne Photokatalysator findet keine Zersetzung von MB statt
3	MB + Titandioxid	Keine Änderung	Ohne UV-Licht findet keine Zersetzung von MB statt
4	MB-Referenzlösung	Keine Änderung	-

Die Auswertung und Ergebnissicherung kann etwa anhand dieser Aufgaben erfolgen:

*Aufgabe 1) Vergleiche die Lösung nach dem entsprechenden Teilversuch mit der ursprünglichen Methylblaulösung und trage deine Beobachtungen in die Tabelle ein.*

*Aufgabe 2) Ergänze anschließend das Ergebnis des Teilversuchs in die entsprechende Spalte – hat eine Entfärbung der Lösung stattgefunden?*

*Aufgabe 3) Erläutere, unter welchen Bedingungen eine Photokatalyse stattfindet.*

Ein entsprechendes Arbeitsblatt findet sich im Anhang dieser Arbeit (A3.2).

Experiment 1.3 thematisiert eine großtechnische Anwendungsmöglichkeit der Photokatalyse von Titandioxid-Nanopartikeln - im Folgenden sollen nun zwei Experimente vorgestellt werden, die einerseits auf diese Grundlage aufbauen und andererseits noch stärker auf praxisorientierte Anwendungen im alltäglichen Leben der SuS ausgerichtet sind.

Dass Titandioxid-Nanopartikel mit einer Partikelgröße  $< 100$  nm optisch transparent erscheinen, ist den SuS aus der anfänglichen Betrachtung im Einführungsseminar anhand des Beispiels der (modernen) Sonnencreme bereits bekannt. Ebenfalls haben sie im vorherigen Experiment die photokatalytischen Eigenschaften bei der Aufbereitung von Wasser kennengelernt. Dabei verbleiben zum einen Fragen ungeklärt und zum anderen werden neue aufgeworfen: Wird diese Technologie bereits angewandt? Wo kann sie eingesetzt werden bzw. wird sie bereits verwendet (LL2, LL8)? Können auch weitere Schadstoffe entfernt werden? Wie effektiv ist diese Technologie? Diese Fragen sollen beantwortet werden, indem die vorher separat stehenden „Nano-Eigenschaften“ – Transparenz und Photokatalyse – zusammengeführt werden.

Neben der Reinigung von Abwasser finden Titandioxid-Nanopartikel zunehmend in selbstreinigenden Fassaden (siehe Abbildung 51 rechts) und Wandfarben zur Aufreinigung von Luftverschmutzungen praktische Anwendung, die zuletzt viel Aufmerksamkeit erfahren hat. Eine populärwissenschaftliche Erklärung dieses Phänomens auf allgemeinverständlichem Niveau bietet etwa die Sendereihe „Die große Show der Naturwunder“ (ARD); der entsprechende Ausschnitt [254, 255] kann bei Bedarf unterstützend im Chemieunterricht eingesetzt werden. Zudem existieren für diese Anwendung bereits Produktserien für Verbraucher, die den Einsatz von Nanotechnologie mehr (TitanActive  $\text{TiO}_2$ , *Muschert Oberflächentechnologie*) oder weniger (BioShield, *BioShield Inc.*) offensiv bewerben (siehe Abbildung 51 links).

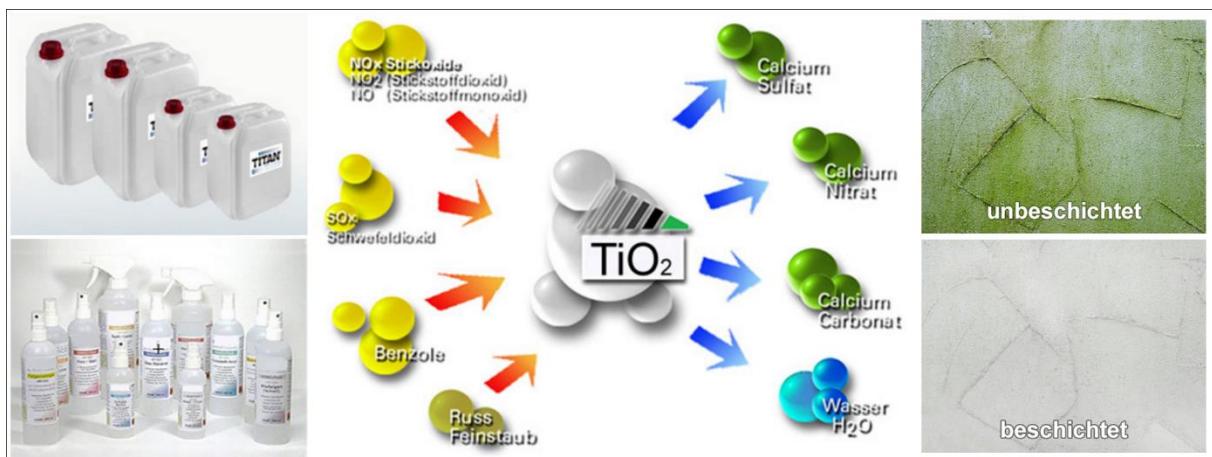


Abbildung 51 – Algenbewuchs auf einer unbeschichteten Fassade (links) und auf einer Fassade mit photokatalytisch aktiver Beschichtung (rechts).

Diese Technik wird darüber hinaus bereits in größerem Maßstab angewandt; Abbildung 52 zeigt eine Illustration des Wirkprinzips sowie die das HOSPITAL MANUEL GEA GONZALES (eine sog. *Multi-Functional Urban Green Infrastructure*), ein Krankenhaus in Mexico City, welches mit einer solchen photokatalytisch aktiven, luftreinigenden Fassade ausgestattet ist.

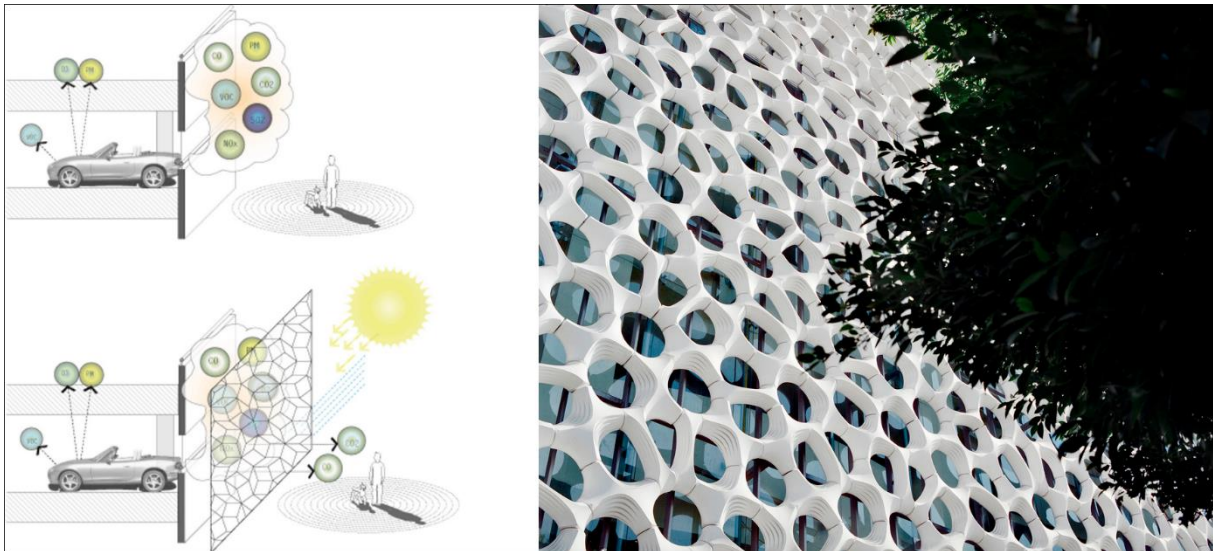


Abbildung 52 – Illustration des Wirkprinzips der photokatalytischen Reinigung von Abgasen mithilfe von UV-Licht und Titandioxid-Nanopartikeln eingebettet in eine Trägerkonstruktion (links); Fassade des *Hospital Manuel Gea Gonzales* als Beispielprojekt der Anwendung dieser Technologie (rechts) <sup>[256]</sup>.

Diese hier aufgeführten Beispiele bieten viele Möglichkeiten für einen alltagsorientierten Einstieg in die Thematik bzw. für einen Anschluss an die Inhalte des vorherigen Experimentes. Nach dieser Einführung kann zudem durch die Lehrperson problematisierend dargelegt werden, dass die Synthese und Einbettung von Nanomaterialien in konventionelle Materialien vielfache technische Herausforderungen bereithält (LL6).

Im folgenden Versuch soll dieser Herausforderung begegnet werden. In vielen Fällen wird dieses Problem durch eine Oberflächenbehandlung gelöst – eine nur mehrere Nanometer dünne Schicht ist oftmals ausreichend, um der Oberfläche des gewünschten Werkstoffes die Eigenschaften des aufgetragenen Nanomaterials zu verleihen (LL4, LL5, LL6). Im folgenden Versuch soll ein mit einer Titandioxid-Nanoschicht beschichteter Objektträger näher untersucht werden.

#### Experiment 1.4 – Erzeugung einer superhydrophilen Titandioxid-Nanoschicht

*Geräte und Chemikalien:* Ethanol, Titan(IV)-tetrakisopropoxid (TTIP), konzentrierte Salzsäure, Methylenblau, Glasplatte, Glasstab, Tesafilm, Becherglas (50 mL), Magnetrührer mit Rührfisch, Sprühflasche, Pasteurpipette, Millimeterpapier.

*Versuchsdurchführung:* Für die benötigte TTIP-Lösung werden in einem 50 mL Becherglas 25mL Ethanol mit 1,8 mL konzentrierter Salzsäure versetzt. Anschließend werden 5 mL Titan(IV)-tetrakisopropoxid zugegeben. Das Becherglas wird mit einem Uhrglas abgedeckt und die Lösung wird etwa fünf Minuten lang gerührt. Die zu beschichtende Glasoberfläche wird zunächst mit Ethanol gereinigt, anschließend wird mittig ein Streifen Tesafilm abgeklebt. Mit einer Pasteurpipette werden vorsichtig 2-3 Tropfen der TTIP-Lösung auf den Streifen gegeben, danach wird die Flüssigkeit vorsichtig mit einem Glasstab auf einer Seite des Objektträgers gleichmäßig und dünn auf dessen Oberfläche verteilt (siehe).

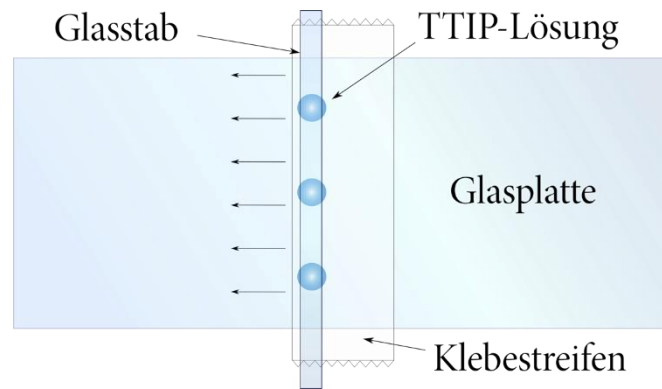
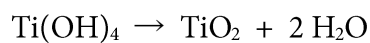
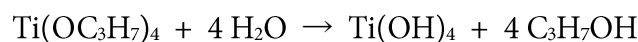


Abbildung 53 – Auftragen der TTIP-Lösung zur Erzeugung einer nanoskaligen Titandioxid-Schicht auf einem Objektträger.

Die Glasplatte wird anschließend etwa 1 Minute an der Luft getrocknet. Ein Föhn oder eine Heißluftpistole beschleunigt diesen Vorgang auf wenige Sekunden.

*Beobachtung:* Nachdem die TTIP-Lösung getrocknet ist, verbleibt die Oberfläche transparent. Je nach eingesetzter Menge an TTIP-Lösung ist ein leichtes, unregelmäßiges Schillern auf der Oberfläche zu erkennen.

*Auswertung:* TTIP hydrolysiert im sauren Milieu mit Luftfeuchtigkeit rasch zu Isopropanol und Titan(IV)-hydroxid, wobei letzteres im Anschluss weiter zu Titandioxid kondensiert, gemäß <sup>[257, 258]</sup>:



Die Transparenz der erzeugten Schicht kann über die Partikelgröße erklärt werden; als Bulk-Material besitzt Titandioxid einen hohen Brechungsindex und ist in der Lage, einfallendes Licht stark zu streuen. Titandioxid-Nanopartikel hingegen verlieren bei Unterschreiten einer gewissen Partikelgröße diese Eigenschaft, sodass eine entsprechende Schicht optische Transparenz aufweist.

Das wahrgenommene Schillern an einigen Stellen des Objektträgers tritt auf, wenn die Schichtdicke in diesen Bereichen geringfügig erhöht ist und somit wieder mit sichtbarem Licht interagieren kann. Anhand der Farbe des Schillerns können dabei Aussagen über die Schichtdicke getroffen werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Interferenz an dünnen Schichten und einen experimentellen Zugang über die Schichtdicke einer Seifenblase bieten BAUM und SCHWARZER <sup>[259]</sup>.

In den zwei folgenden Experimenten können nun die Eigenschaften der nanoskaligen Titandioxid-Schicht untersucht werden.



### Versuchsteil 1.4.1: Superhydrophilie von Titandioxid

**Durchführung:** Mit einer Sprühflasche wird Wasser aus etwa einen halben Meter Entfernung auf das Glas gesprüht. Ein bis zwei Pumphebe reichen aus, um ein Ergebnis zu beobachten.

**Beobachtung:** Auf der unbeschichteten Seite ist nach dem Besprühen eine starke Tröpfchenbildung zu erkennen, die behandelte Seite ist von einem gleichmäßigen, dünnen Wasserfilm bedeckt (siehe Abbildung 54 links).

**Auswertung:** Die Filmbildung auf der behandelten Oberfläche ist durch die Superhydrophilie der aufgetragenen Titandioxid-Nanoschicht zu erklären. Unter Bestrahlung von UV- bzw. Tageslicht bilden sich an dessen Oberfläche Hydroxyl-Gruppen <sup>[260, 261]</sup>, welche entsprechend attraktive Wechselwirkungen mit dem aufgesprühten Wasser aufzeigen. Hierdurch verringert sich der Kontaktwinkel zwischen Oberfläche und Wassertropfen, was zur Ausbildung des dünnen, gleichmäßigen Wasserfilms führt (siehe Abbildung 54 rechts).

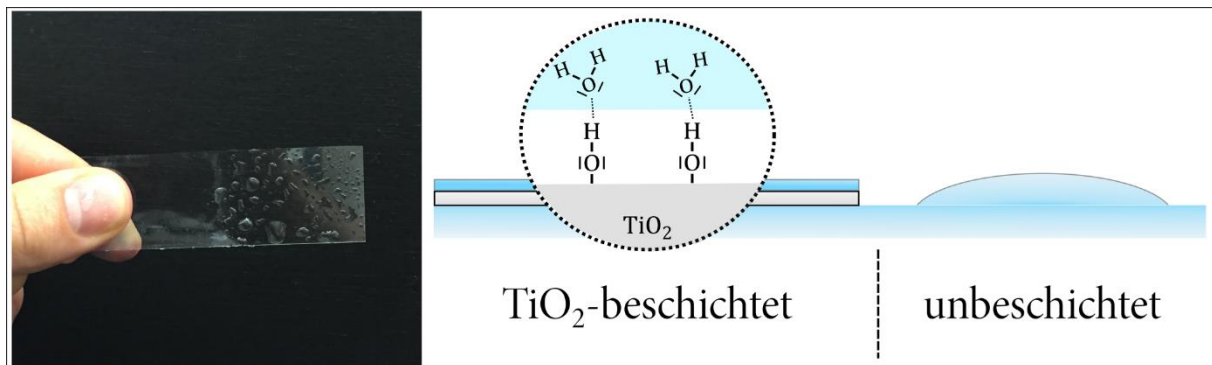


Abbildung 54 – Links: Resultat nach dem Besprühen des Objektträgers mit Wasser (links: beschichtet, rechts: unbeschichtet). Rechts: Modell zur Beschreibung der superhydrophilen Wirkung der nanoskaligen Titandioxid-Schicht.

Für eine detailliertere Auswertung der Superhydrophilie kann zusätzlich der Kontaktwinkel mithilfe einer Kamera untersucht werden <sup>[262]</sup>. Darüber hinaus kann auch die Verringerung des Kontaktwinkels indirekt in einem simplen Experiment mithilfe von Millimeterpapier über die Ausbreitung eines Tropfens illustriert werden <sup>[263]</sup>.

### Versuchsteil 1.4.2: Photokatalytische Aktivität der Titandioxid-Nanoschicht

**Durchführung:** Je ein Tropfen einer 0,02 molaren Methylenblau-Lösung wird auf der beschichteten und unbeschichteten Glasoberfläche platziert. Anschließend wird der Objektträger für einigen Minuten mit UV-Licht bestrahlt.

**Beobachtung:** Nach wenigen Minuten wird festgestellt, dass sich der Tropfen auf der behandelten Oberfläche sichtbar entfärbt hat.

**Auswertung:** Analog zu Experiment 1.3 findet auch hier eine photokatalytische Reaktion statt, wodurch der organische Farbstoff zersetzt wird (siehe oben).

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Über die Auswertung dieser Experimente können die Erkenntnisse der vorherigen Versuche und des Einführungsseminars vertieft und gefestigt werden. Zudem können Alltagsbezüge an dieser Stelle besonders gut genutzt werden, insbesondere zum prominenten Lotos-Effekt. Die hergestellte Titandioxid-Beschichtung beruht auf einem gegenteiligen Wirkprinzip, zeigt aber dennoch ein ebenso wirksames Resultat; entsprechende Beschichtungen für Windschutzscheiben oder Brillen werden als *AntiFog-Beschichtungen* geführt. Ebenfalls sehr interessant ist auch die Fähigkeit zur Photokatalyse. Da hierdurch organischer Schmutz (Fingerabdrücke, Pollen, Graffiti, ...) mit Hilfe von Sonnenlicht zersetzt werden kann, werden entsprechende Materialien als selbstreinigend oder *easy-to-clean* bezeichnet. Letztlich ist anzumerken, dass eine solche superhydrophile Beschichtung oftmals weitaus weniger empfindlich ist als eine vergleichbare Superhydrophobe <sup>[260]</sup>.

Eine Hürde ist sicherlich die Beschaffung von TTIP (CAS: 546-68-9), welches oftmals nicht in Schulen vorhanden ist. Die Chemikalie ist aber erschwinglich in der Anschaffung; eine Einheit à 25 mL (18 €, TCI Deutschland GmbH) ergibt genügend TTIP-Lösung für mehrere Dutzend Klassensätze und kann verschlossen mehrere Monate aufbewahrt werden.

### **Experiment 1.5 – Antibakterielle Wirkung von Titandioxid-Nanopartikeln**

Titandioxid-Nanopartikel zeigen einen antimikrobiellen Effekt und werden aus diesem Grund etwa in Kosmetika als Konservierungsmittel eingesetzt (typischerweise in Verbindung mit Silberverbindungen). Insbesondere in Verbindung mit Sonnenlicht erweisen sich diese Nanokomposite als sehr effektiv gegen Mikroorganismen <sup>[264]</sup>. Dieser Effekt soll nun anhand der Fermentation von Milch dargestellt werden.

*Chemikalien und Geräte:* Joghurt (unpasteurisiert), Titandioxid-Nanopartikel (aus Versuch 1), 4 Bechergläser (25 mL), UV-Lampe.

*Durchführung:* Vier Joghurt-Proben werden wie in Abbildung 55 dargestellt vorbereitet. Für jeden Ansatz werden in jedes Becherglas 20 mL Milch und eine Spatelspitze des unpasteurisierten Joghurts gegeben. Zu den Proben 3 und 4 werden zusätzlich eine Spatelspitze Titandioxid-Nanopartikel gegeben. Die Proben 2 und 4 werden nun für 15 Minuten mit UV-Licht bestrahlt. Abschließend werden alle Bechergläser mit Frischhaltefolie luftdicht verschlossen und bei Raumtemperatur (besser: auf der Heizung) für mindestens fünf Tage in einem dunklen Raum (ohne Tageslicht) gelagert.

*Beobachtung:* Während der fünf Tage bildet sich auf den Proben 1 und 2 sichtbar Schimmel; Probe 3 ist deutlich dicker bzw. viskoser, als zu Beginn. Probe 4 ist unverändert (siehe Abbildung 55).



Abbildung 55 – Einfluss von Titandioxid-Nanopartikeln auf die Fermentation von Milch.

*Auswertung:* Der Ansatz Nr. 1 (= Referenz) zeigt das Resultat der Fermentation (bzw. genauer: Milchsäuregärung); hierbei spalten die Kulturen aus dem Joghurt zunächst mithilfe des Enzyms Laktase den Milchzucker Laktose in die Einfachzucker Glucose und Galaktose. Diese wiederum können von den Bakterien zu Milchsäure umgesetzt werden. Bei Unterschreitung des pH-Wertes 5,5 gerinnt das Milcheiweiß Kasein (Dicklegung), wodurch die typische Konsistenz von Joghurt erhalten wird. Das Ergebnis dieses Prozesses ist bei dem Ansatz 1 (= Referenz) zu beobachten.

Ansatz 2 zeigt, dass UV-Licht alleine diesen Prozess höchstens geringfügig beeinflussen kann. Werden Titandioxid-Nanopartikel zugegeben (Ansatz 3), wird der gesamte Prozess verzögert; dennoch ist an der festen Konsistenz eine Milchsäuregärung erkennbar. Einzig Ansatz 4 verbleibt unverändert – dies deutet an, dass die photokatalytisch erzeugten Radikale die für die Fermentation notwendigen Kulturen geschädigt haben.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Die tatsächlich ablaufenden Prozesse bei der Schädigung der Mikroorganismen sind weitaus komplexer als obenstehend beschrieben; eine detailliertere Beschreibung des antimikrobiellen Effektes auf der Formelebene ist unter <sup>[265]</sup> zu finden. Für die schulische Untersuchung wurden diese Prozesse daher phänomenologischer Ebene beschrieben.

Mit Hilfe ihrer Kenntnisse aus den vorangegangenen Experimenten sind die SuS in der Lage, dieses Experiment selbstständig zu deuten. Die Fermentation im Allgemeinen und die Milchsäuregärung im Speziellen können dabei übergreifend zum Fach Biologie behandelt oder wiederholt werden. Alternativ kann als Hilfestellung auf die Rolle der Joghurt-Kulturen verwiesen werden. Oftmals sind einigen SuS entsprechende Grundlagen aus dem Alltag bekannt, an die angeknüpft werden kann.

### Bewertung und Ergebnissicherung

Nach der Durchführung und Auswertung der Experimente erfolgt der Übergang in den letzten Abschnitt der Unterrichtseinheit. Bis zu diesem Zeitpunkt haben SuS die interessanten Eigen-



schaften und ebenso vielfältige wie vielversprechende Anwendungen von Nanomaterialien kennengelernt. Hieran anknüpfend ist es von großer Bedeutung – nicht zuletzt im Hinblick auf die Ergebnisse aus Kap. 6 und die Leitlinien – diesen Einsatz in unterschiedlichen Kontexten auf Basis des erlangten Fachwissens zu reflektieren und zu bewerten (LL9). Das (bewusst) zuletzt durchgeführte Experiment 1.5 kann hierbei als Ausgangspunkt für kritische Fragestellungen dienen. Wenn Nanopartikel Mikroorganismen schädigen können – welchen Effekt haben Nanopartikel aus dem Alltag auf unseren Körper? Können sie auch uns schaden? Und falls ja, rechtfertigen die Vorteile den Einsatz im Hinblick auf dieses Risiko?

An dieser Stelle wird deutlich, dass das Themengebiet „Nano“ großes Potenzial für eine kritische Reflexion und die Förderung der prozessbezogenen Kompetenzen (insb. der Bewertungskompetenz) bietet. Wie im Vorfeld ermittelt, besteht an dieser Stelle noch ein großer Förderbedarf – allerdings haben die gängigen Schulbücher dieses Feld bislang nur sehr selten aufgegriffen, so dass SuS sowie Lehrerinnen und Lehrer kaum Zugang zu didaktisch aufbereitetem Material haben.

### **Fachdidaktischer Hintergrund: WebQuest**

Aus diesem Grund wurde für dieses Unterrichtsprojekt ein WebQuest zum Thema „Nanomaterialien“ entwickelt. Bei einem WebQuest, welches erstmals 1995 von DODGE und MARCH beschrieben wurde <sup>[266]</sup>, handelt es sich kurz gefasst um eine Methode, das Potenzial des Internets für eine strukturierte Recherche- und Forschungsarbeit zu nutzen. Beispielsweise können SuS eine im Unterricht aufgekommene Fragestellung mithilfe der von der Lehrkraft bereitgestellten Internetquellen überprüfen. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Vorauswahl des Materials; durch die angegebenen Links soll vermieden werden, dass die SuS zum einen fehlerhaftes oder unbrauchbares Material verwenden und zum anderen von der Masse des Angebotes überfordert werden (Zeitverlust durch Suche und Selektion). Zusätzlich sollten etwaige Ablenkungen vermieden werden. Als Stärken von dieser Methode werden der Einsatz von neuen Medien (z.B. Förderung der Methodenkompetenz, Einsatz aktueller Materialien, hohe Lerner motivation), die hohe Aktivität der SuS und eine hohe Zielführung durch die Vorstrukturierung durch die Lehrkräfte genannt. Eine ausführlichere Darstellung zu dieser Thematik wurde vom Autor außerhalb dieser Arbeit veröffentlicht <sup>[267]</sup>.

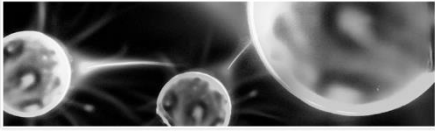
Das entwickelte WebQuest <sup>[268]</sup> kann sich in der vorliegenden Unterrichtseinheit den großen Fundus an gesicherten sowie kontrovers diskutierten Materialien zunutze machen, der zum Themengebiet „Nano“ im Internet existiert. Zu diesem Zweck wurden vier aktuelle Kontroversen zum Einsatz von vier verschiedenen Nanomaterialien aufgegriffen und durch aussagekräftige, repräsentative und fachlich angemessene Quellen abgebildet. Abbildung 56 gibt einen Überblick über die Themengebiete und zeigt einen Screenshot des WebQuests.

NANO

START AUFGABEN GRUPPE 1 GRUPPE 2 GRUPPE 3 GRUPPE 4


WebQuest

**Ausgewählte Kontexte**




**GRUPPE 4 - SILICA-NANOPARTIKEL**


Siliciumdioxid-Nanopartikel finden sich bereits seit Jahren als Füll- oder Füllhilfe in Nahrungsmitteln, wie etwa Salz, Gewürzen oder Ketchup. Die Verbesserungen werden dabei aufgrund ihrer großen Oberfläche und der hygroskopischen ("wasserziehenden") Eigenschaften erzielt. Indem Feuchtigkeit von den Silica adsorbiert wird, können die Körner nicht verklumpen; Ketchup hingegen wird durch Siliciumdioxid verdickt, zudem werden die Fließigenschaften verbessert.



Salz



Silica



und Ketchup

Allerdings sind die Risikopotenziale nicht endgültig geklärt: Nanopartikel unter einer gewissen Größe können die Zellmembran passieren und somit in menschliche Zellen eindringen - mit teilweise ungeklärten Folgen. Zudem gibt es viele ungefährliche


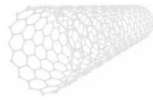


TiO <sub>2</sub> Nanopartikel	Carbon Nanotubes	Silber Nanopartikel	Silica Nanopartikel
TiO <sub>2</sub> vs. organische Filtersysteme	Energieeinsparungen vs. Potenziell lungenentzündliche Reaktionen	Hygienische Bedürfnisse vs. Wasserverschmutzung	Günstige Materialeigenschaften vs. Potenzielle Gesundheitsrisiken
			

Abbildung 56 – Screenshot des WebQuests (links) und Überblick über die behandelten Kontroversen (rechts).

Anhand eines Beispiels soll eine solche Kontroverse an dieser Stelle illustriert werden: Silber-Nanopartikel weisen starke antimikrobielle Effekte auf, weswegen sie für Anwendungen mit besonderen hygienischen Anforderungen eingesetzt werden („hygienischen Wandfarben“ in Krankenhäusern, ebendort auch zur Beschichtung von Türklinken und chirurgischen Instrumenten). Andererseits finden sie auch Verwendung in einer Vielzahl an Alltagsprodukten, wie bspw. Deodorants, Socken, Funktionsunterwäsche, Waschmaschinen, Kühlschränken etc. Nach dem Lebenszyklus des Produktes gelangen diese Partikel zu großen Teilen in die Umwelt, wo sie ein Risiko für Mikroorganismen bzw. entsprechende Biotope darstellen können [134, 214, 269].

Wo wird nun die Grenze für einen verantwortungsvollen Einsatz gezogen? Dieser Frage gehen die SuS in vier Gruppen nach, indem sie (1) die Eigenschaften „ihres“ Nanomaterials erarbeiten, (2) die zugrundeliegende Kontroverse von verschiedenen Blickwinkeln aus untersuchen, (3) ein Raster für Bewertungskriterien aufstellen und (4) den Einsatz des Nanomaterials in verschiedenen Szenarien und Kontexten bewerten. Ihre Ergebnisse und Bewertungen präsentierten und diskutierten die SuS nach Beendigung der Gruppenarbeit im Plenum. Eine moderierte Expertendiskussion mit der Lehrkraft bildet schließlich den Abschluss der Unterrichtseinheit.

Das WebQuest ist online kostenlos verfügbar [268] und ebenfalls im Anhang (A3.3) zu finden.

#### 7.1.1.4 Evaluation

Die oben beschriebene Unterrichtseinheit wurde im Sommer 2013 an dem Otto-Hahn-Gymnasium in Göttingen im Wahlpflicht-Unterricht (WPU) einer 11. Klasse durchgeführt. Der Kurs besteht aus 17 SuS. Es besteht eine grundsätzliche Bereitschaft zur Mitarbeit, das Leistungs-niveau wird von der Lehrkraft als äußerst inhomogen beschrieben.

Die abschließende Evaluation der Unterrichtseinheit verfolgt zwei Ziele; zum einen kann ein erster Eindruck erhalten werden, inwiefern die Lernziele tendenziell erreicht werden konnten. Zum anderen sollen Inhalte und Unterrichtsgang aufbauend auf das Feedback der SuS sowie der Lehrkraft qualitativ weiterentwickelt werden. Um diese beiden Ziele so gut wie möglich zu er-

füllen, sollen hierbei entsprechend zwei methodische Ansätze verwendet werden, sodass insgesamt eine Triangulation der Perspektiven von SuS, Lehrkräften und Forschern ermöglicht wird [270].

1. Zur Untersuchung, inwieweit die Lernziele tendenziell erreicht werden konnten und zur Sammlung von Feedback seitens der SuS wird eine kurze qualitative Untersuchung (Paper-Pencil-Fragebogen) durchgeführt. Die entsprechenden Fragestellungen innerhalb der Erhebung leiten sich einerseits aus denjenigen der Vorstudie (siehe Kap. 6.1) als auch aus den behandelten Inhalten innerhalb des Unterrichtsprojektes ab.
2. Für die weitere Entwicklung und Optimierung erfolgen die Konzeption sowie die anschließende Reflexion gemeinsam mit der Fachlehrkraft im Rahmen einer *Partizipativen Fachdidaktische Aktionsforschung* [270–272]. Die partizipative fachdidaktische Aktionsforschung nach EILKS und RALLE beschreibt ein Modell für eine praxisnahe curriculare Entwicklungsforschung in der Chemiesdidaktik; durch die Einbeziehung von Lehrkräften in einen zyklischen Prozess (Entwicklung, Erprobung, Evaluation, Reflexion) kann hierbei auf das große Potenzial der Intuition und Erfahrung von Unterrichtspraktikern zurückgegriffen werden [270].

Ungeachtet der Kombination aus zwei Methodiken sind bei der Bewertung der Ergebnisse die qualitative Ausrichtung der Erhebung, die geringe Stichprobe und die geringe verfügbare Unterrichtszeit zu berücksichtigen. Die Aussagekraft der Evaluation ist somit nicht mit einer quantitativen Erhebungen bzw. Lernstandsentwicklungen zu vergleichen; dies ist allerdings auch nicht die Zielsetzung dieser Arbeit.

### **Paper-Pencil-Fragebogen**

Das Fragebogendesign weist erneut einen explorativen Charakter auf und beinhaltet vier offene Fragestellungen zu den fachlichen Inhalten, den gesellschaftlichen Bezügen sowie der Bewertung des Einsatzes von „Nano“. Zusätzlich wurde noch Feedback hinsichtlich der Struktur der Unterrichtseinheit eingeholt, mit einem besonderen Schwerpunkt auf den Experimenten.

1. Beschreibe bitte in Stichpunkten, was du fachlich gelernt hast. Erläutere, inwiefern dir die Experimente dabei geholfen haben.
2. Erläutere bitte, welche gesellschaftlichen Bezüge hinsichtlich des Einsatzes von Nanomaterialien du kennengelernt hast. Erkläre, ob sie für dich wichtig sind.
3. Beschreibe bitte, inwiefern die Unterrichtseinheit dein Interesse an dem Thema „Nano“ beeinflusst hat.
4. Bitte gib an, was dir an der Einheit am besten gefallen hat (und warum) und was an der Einheit noch verbesserungswürdig ist.

Eine Kopie des gesamten Fragebogens befindet sich im Anhang (A3.4). Tabelle 13 gibt einen Überblick über die wichtigsten Antworten und zugehörige Schülerzitate.

Tabelle 13 – Ausgewählte Schlussfolgerungen der Evaluation und Zitate.

Ergebnis / Auswertung	SchülerInnenzitate
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS besitzen eine genauere Repräsentation nanoskaliger Größendimensionen und geben präzisere Beschreibungen wieder, oftmals unter Angabe konkreter Zahlen (<math>10^{-9}</math> m) oder mit Verweis auf die Dicke des menschlichen Haares aus dem Einführungsseminar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Nanotechnologie ist die Betrachtung bekannter Stoffe auf einer besonders kleinen Ebene (<math>10^{-9}</math> m)“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Den SuS wird klarer, dass Nano aktuell bereits oftmals eingesetzt wird.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Ich habe darüber vorher nicht viel gehört und war erstaunt, in wie vielen Alltagsprodukten Nanopartikel vorhanden sind.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>SuS können mehr Anwendungen (durchschnittlich 4,8) nennen, aus einem breiteren Spektrum an Anwendungsbereichen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Nanotechnologie wird bereits flächendeckend eingesetzt: Riesel- und Fließhilfe, Füllstoff, Lacksysteme, Hygiene, UV-Schutz.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vermehrt sind kritische Reflexionen erkennbar; viele SuS beschreiben, dass ihnen das Gefahrenpotenzial junger Technologien klar geworden ist.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Die Unterrichtseinheit hat das Thema „Nano“ für mich überhaupt erst greifbar gemacht, weil ich vorher davon keine konkrete Vorstellung hatte. Dadurch kann ich mich auch bei alltäglichen Dingen darüber informieren.“</li> <li>„Sehr hilfreich, oft aber auch kritisch zu betrachten“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Fragestellungen zu „Nano“ werden deutlich öfter in größere Zusammenhänge eingebettet (Gesellschaftsorientierung, Nachhaltigkeit, verantwortungsbewusster Einsatz).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Die Risiken sind recht unbekannt, die Gefahren für den Menschen und die Umwelt nicht erforscht“</li> </ul>

Über die inhaltliche Ebene hinaus wurden die „plastischen“ Experimente sowie die damit verbundene Eigenaktivität von den SuS positiv hervorgehoben.

*(Am besten gefallen hat mir ...) „die spezielle Behandlung des Themas „Nano“ im Alltag, da es uns direkt betrifft.“*

*„Außerdem waren die Experimente sehr gut und haben einem dabei geholfen, das relativ schwere Thema leichter zu verstehen.“*

*„Die Experimente haben mir am besten gefallen, da es abwechslungsreich ist und wir selber aktiv geworden sind und nicht nur Ergebnisse bekommen haben und zuhören mussten.“*

*„Experimente haben es besser verständlich gemacht.“*

## Reflexion der Unterrichtseinheit

Bei der gemeinsamen Reflexion der Unterrichtseinheit mit der Lehrkraft sind mehrere Tendenzen deutlich geworden, welche diese Ergebnisse stützen und erweitern. Grundsätzlich konnten die wesentlichen Inhalte des Themengebietes „Nano“ (etwa Größendimension, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, ...) von vielen SuS fachlich und fachsprachlich richtig wiedergegeben werden. Insbesondere hilfreich erschien die Erschließung über die Modellexperimente im Einführungsseminar, da die Materie von einigen SuS als anspruchsvoll empfunden wurde.

Positiv im Unterrichtsgespräch und in der Abschlussdiskussion wurden die Alltagsanschlüsse hervorgehoben; auch in der schriftlichen Evaluation (siehe oben) wurden diese oft genannt. Ebenfalls als erfolgreich wurden die Experimente wahrgenommen, welche eine hohe Schüleraktivität beförderten und eine praktische sowie vertiefte Auseinandersetzung mit dem Unterrichtsgegenstand auslöste; dies rechtfertigte den hohen Vorbereitungsaufwand. Darüber hinaus wurden sie von den SuS auch im Verlauf der Unterrichtseinheit als „eindrucksvoll“ und „alltagsnah“ beschrieben.

Allerdings blieben auch einige Fragen offen; bei der Untersuchung der photokatalytischen Wirkung von Titandioxid-Nanopartikeln können die SuS nicht erarbeiten oder nachweisen, dass in diesem Prozess Radikale gebildet werden. Zudem stellten viele Teilnehmende hierbei Rückbezüge zur lebensweltlichen Anwendung dieser Partikel in Sonnencreme und deren Gefahrenpotenzial her („Woher wissen wir, dass Radikale entstehen?“ / „Werden in Sonnencreme auf unserer Haut ebenfalls Radikale erzeugt?“). Diese Fragestellungen bieten – auch im Hinblick auf die Frage nach der Partikelgröße – viele Möglichkeiten zur Verknüpfung der Kompetenzbereiche Fachwissen und Bewertung und sollen in folgenden Unterrichtsmaterialien aufgegriffen werden.

Als besonders geeignet zur Förderung der Bewertungskompetenz erschien in der Reflexion das WebQuest. Die Qualität der Ergebnisse der Gruppenarbeit sowie der Abschlussdiskussion machten deutlich, dass ein Großteil der SuS den Einsatz von „Nano“ auf der Basis ihres gewonnenen Fachwissens reflektieren und kritisch bewerten konnten. Allerdings waren die Recherche und der damit verbundene Besuch des Computerraums mit einem Zeitaufwand bzw. –verlust verbunden. Um die „echte Lernzeit“ (*time on task*)<sup>[273]</sup> zu erhöhen (und damit ggf. Zeit einzusparen), könnte die Methodik zukünftig angepasst werden – etwa, indem die Quellen ausgedruckt werden.

Insgesamt liefern die Ergebnisse der Evaluation eine wertvolle Rückmeldung, welche im Rahmen des zyklischen Prozesses der didaktischen Rekonstruktion (siehe Kap. 4) in die folgenden Projekte einfließen wird.

### 7.1.1.5 Anbindung an das Curriculum

In Tabelle 14 werden die behandelten Nano-Inhalte dieses Projektes sowie ihre Anbindungen an das niedersächsische Kerncurriculum<sup>[44]</sup> im Überblick dargestellt.

Tabelle 14 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 1.

### Projekt 1: Nanomaterialien im Alltag - Isolierung von und Experimente mit Titandioxid-Nanopartikeln

Nano-Inhalte	Curriculare Anbindung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interdisziplinarität und Bedeutung von Nanotechnologie</li> <li>• Größendimension von Nanomaterialien</li> <li>• Charakteristische Eigenschaften: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis</li> <li>• Isolation und indirekter Nachweis von Titandioxid-Nanopartikeln</li> <li>• Photokatalytische Eigenschaften von Titandioxid-Nanopartikeln</li> <li>• Einsatz von Titandioxid-Nanopartikeln als Konservierungsmittel in Kosmetika</li> <li>• Erzeugung einer superhydrophilen, transparenten Titandioxid-Nanopartikel-Beschichtung</li> <li>• Schädigung von Mikroorganismen durch Radikale</li> <li>• Bewertung des Einsatzes von Nanopartikeln in diversen Anwendungsbereichen im WebQuest</li> </ul>	<p>Die SuS ...</p> <p><b>Fachwissen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben die Beeinflussbarkeit chemischer Reaktionen durch den Einsatz von Katalysatoren.</li> </ul> <p><b>Erkenntnisgewinnung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• führen Nachweisreaktionen durch</li> <li>• planen Experimente zur Ermittlung von Stoffeigenschaften und führen diese durch.</li> </ul> <p><b>Kommunikation:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• diskutieren die Grenzen und Möglichkeiten von Modellen.</li> <li>• diskutieren die Aussagekraft von Nachweisreaktionen.</li> <li>• erläutern schematische Darstellungen technischer Prozesse und stellen Flussdiagramme fachsprachlich dar.</li> <li>• recherchieren zu technischen Verfahren in unterschiedlichen Quellen, wählen aussagekräftige Informationen aus und präsentieren ihre Ergebnisse.</li> <li>• recherchieren zu Katalysatoren in technischen Prozessen.</li> </ul> <p><b>Bewerten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• reflektieren die Bedeutung technischer Verfahren unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit, Gesundheit und Umweltverträglichkeit.</li> <li>• erkennen und beschreiben die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung von Stoffen in ihrer Lebenswelt.</li> <li>• beurteilen den Einsatz von Katalysatoren in technischen Prozessen.</li> <li>• beurteilen die Energieeffizienz ausgewählter Prozesse ihrer Lebenswelt.</li> </ul>





ten an Membranen von Pflanzenzellen, welches wertvolle Möglichkeiten zur Förderung der Bewertungskompetenz bietet. Hierzu sollen im weiteren Verlauf diverse experimentelle Zugänge detaillierter vorgestellt werden.

Nach der positiven Erprobung im WPU wurde die vorliegende Unterrichtseinheit für den regulären Kursunterricht auf grundlegendem Anforderungsniveau (gA, Kursstufe in der 11. Klasse) konzipiert. Durch die Wahl der Kursstufe kann sichergestellt werden, dass benötigte fachliche Grundlagen zur vertieften Deutung der entsprechenden Phänomene behandelt wurden.

Die konkreten Lernziele für dieses Unterrichtsprojekt lauten:

1. Die SuS beschreiben Nanotechnologie als interdisziplinäres Forschungsfeld mit großer Bedeutung für Alltag, Wirt- und Wissenschaft (LL1, LL2).
2. Die SuS entwickeln ein genaueres Verständnis für die „Nanodimension“ und ordnen Nanomaterialien korrekt in eine Größenskala ein (LL3).
3. Die SuS beschreiben das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis als charakteristische Eigenschaft von Nanomaterialien (LL4).
4. Die SuS nennen mehrere Nanomaterialien und Anwendungen von Nanotechnologie in ihrer Lebenswelt (LL1, LL7).
5. Die SuS führen Experimente zu der Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln durch und deuten die Fluoreszenz als charakteristische Nano-Eigenschaft mit Hilfe von Modellen (LL5, LL6).
6. Die SuS erläutern mehrere Eigenschaften und Anwendungen von Zinkoxid-Nanopartikeln (LL8).
7. Die SuS erörtern und bewerten den Einsatz von Zinkoxid-Nanopartikeln und weiteren Nanomaterialien (LL9).

Die Unterrichtseinheit wurde in Kooperation mit zwei Partnerschulen der Universität Göttingen, dem OTTO-HAHN-GYMNASIUM und der GEORG-CHRISTOPH-LICHTENBERG-GESAMTSCHULE, durchgeführt und evaluiert.

#### **7.1.2.2 Inhalte und didaktisch-methodische Überlegungen**

Im vorliegenden Projekt sollen fachliche Grundlagen zum Thema „Nano“ vermittelt sowie diesbezügliche Fragestellungen in gesellschaftlich relevanten Zusammenhängen von den SuS analysiert und bewertet werden (LL1, LL2). Anhand dieses modernen Kontextes werden klassische Inhalte des Chemieunterrichts thematisiert, wie unter anderem Fällungsreaktionen, Katalyse, Hydrolyse oder ein einfaches Energiestufenmodell.

Für die Strukturierung der Unterrichtseinheit wurden zwei Alternativen fokussiert; eine Möglichkeit stellt dabei die im vorigen Projekt bereits beschriebene, dreigeteilte Grundstruktur dar, bestehend aus Einführungsseminar, Laborpraktikum und WebQuest. Aufgrund der vergleichbaren Struktur des Lerngegenstandes in diesem Projekt sowie der positiven Erfahrungen im vergangenen erscheint diese Gliederung naheliegend.

Über den „regulären“ Unterricht hinaus wurde eine alternative Methodik ausgewählt. Wie in Kap. 6.2.3 und 7.3 dargestellt, schätzen viele Lehrkräfte ihr themenspezifisches Wissen zu



„Nano“ als gering ein (unterhalb des „*threshold comfort levels*“<sup>[234]</sup>). Im Hinblick auf die Selbstwirksamkeitserwartung stellt dies eine große Barriere dar, welche ohne entsprechende Aus- (siehe Kap. 7.3.1) oder Fortbildungsangebote (Kap. 7.3.2) nur mit hoher Eigeninitiative überwunden werden kann. Um die Hürde für die Lehrkraft so gering wie möglich zu gestalten, wurde aus den nachfolgend vorgestellten Inhalten zudem ein Lernskript zur selbstständigen Erarbeitung des Themas „Nano“ für SuS entwickelt. Dadurch sollen Lehrkräfte fachlich entlastet werden und ihre Rolle als Lernbegleiter in den Fokus nehmen können; darüber hinaus bietet es nach LANDWEHR und MÜLLER<sup>[279]</sup> weitere interessante Vorteile:

1. **Effiziente Nutzung der Lehrer- und Schülerpräsenz:** Durch Auslagerung der Stoffpräsentation in den Selbstlernbereich kann die Anwesenheit der SuS für gemeinsames, interaktives Lernen genutzt werden.
2. **Förderung von Selbstlernkompetenzen:** Der selbstständige Wissenserwerb ist eine Voraussetzung für das spätere Hochschulstudium oder Berufsleben.
3. **Aufbau von Teamfähigkeit:** Interaktive und kommunikative Kompetenzen werden gefördert, bspw. gegenseitige Unterstützung sowie Klärungs- und Problemlöseprozesse.

SCHÖNANGERER beschreibt das skriptbasierte Selbststudium ebenfalls als besonders geeignet „für theoretische Inhalte, z. B. zur Erarbeitung neuer Begrifflichkeiten und zur Vermittlung von Grundlagen und Orientierungswissen“<sup>[280]</sup>. Konkret bezogen auf das Thema „Nano“ bietet sich – auch im Hinblick auf konstruktivistische Lerntheorien – vor allem die eigenständige Erarbeitung des Grundlagenwissens mit dieser Methode an. Auf diese Weise kann zudem die Eigenaktivität der SuS in dieser Phase weiter gesteigert werden.

Potenzielle Stolpersteine dieser Methodik sind Wissenslücken, die bei SuS mit fehlender Selbstlernkompetenz in dem Fachgebiet zurückbleiben<sup>[280]</sup>. Dieser Gefahr soll durch mehrere individuelle sowie gemeinsame Ergebnissicherungen begegnet werden, insbesondere in dem abschließenden WebQuest. Aus den vom Autor entwickelten Materialien wurde im Rahmen der Masterarbeit von TER HORST<sup>[281]</sup> ein entsprechendes Unterrichtsskript mit gestuften Lernhilfen und Möglichkeiten für die Binnendifferenzierung entwickelt. Dieses findet sich im Anhang (A3.5). Begleitet wird es durch weiterführende Informationstexte für die Lehrkräfte.

### 7.1.2.3 *Ablauf des Unterrichtsprojektes und Materialien*

Im Folgenden wird das entwickelte Unterrichtsprojekt mit Zinkoxid-Nanopartikeln beschrieben. Die Inhalte der „klassischen“ Unterrichtseinheit und des Schülerskriptes sind dabei trotz unterschiedlicher Methodik weitgehend deckungsgleich, sodass zur Vermeidung von Redundanzen die Unterrichtselemente im folgenden Abschnitt unabhängig von ihrer Methodik beschrieben werden sollen. Abbildung 58 stellt die Abschnitte und Inhalte der Unterrichtseinheit dar.

1   Einführungsseminar	2   Experimenteller Abschnitt	3   WebQuest
"Nano" in Wissenschaft und Alltag Einstieg über das Herstellen von Alltagsbe- zügen, interdisziplinärer Charakter, heutige & zukünftige Bedeutung in Alltag, Wissen- schaft und Industrie.	2.1 Synthese von ZnO-NP und Auswertung der Fluoreszenz.	Diskussion Erschließen des Gefahrenpotenzials von ZnO-Nanopartikeln für pflanzliche Zellen und Mikroorganismen. Übertragung auf potenzielles Risiko für Mensch, Tier und Umwelt.
"Nano"-Grundlagen Größendimension, Definition, Morpholo- gien von Nanomaterialien, besondere Ei- genschaften	2.2 Verschiedenfarbige Fluoreszenz Auswertung des Partikel- wachstums (Ostwald-Reifung) ★	WebQuest zur Bewertung des Einsatzes verschiedener Nanomaterialien in diversen Kontexten (Nahrung, Industrie, Kosmetik, ...)
Größendimension Vergleich der "Nano"-Ebene und makros- kopischer Ebene über eine REM-Aufnahme	2.3 ZnO-NP als UV-Lichtdetektor Entfärbung von Farbstoffen	Ergebnissicherung Erstellen und Präsentieren des Handouts
Charakteristische Eigenschaften "Nanocubes"-Experiment, Oberfläche-zu- Volumen-Verhältnis	2.4 Photokatalytische Aktivität Radikalnachweis mit Cumarin ★	Abschluss Expertendiskussion zu Nanotechnologie
	2.5 Photokatalyse mit ZnO-NP Entfärbung von Rote-Beete-Saft	
	2.6 Verhalten an Pflanzenzellen Verfolgung über die Fluoreszenz	

Abbildung 58 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.

Vor der Durchführung der Unterrichtseinheit wurde anhand eines kurzen Fragebogens bestätigt, dass bei den beiden Lerngruppen sehr ähnliche Prädispositionen hinsichtlich Vorwissen, Präkonzepte und Bewertung von „Nano“ vorliegen wie in der in Kap. 7.1.1 beschriebenen Lerngruppe. Insofern befassen sich die SuS in dem ersten Abschnitt, dem Einführungsseminar, mit den notwendigen allgemeinen nanowissenschaftlichen Grundlagen (LL1-4), die im vorherigen Kapitel beschrieben wurden.

### Experimenteller Abschnitt

Im Anschluss an das Einführungsseminar fokussiert der experimentelle Abschnitt praktische Zugänge zu den behandelten Grundlagen am Beispiel der Herstellung und Eigenschaften von Nanomaterialien. Aber welches Nanomaterial kommt hierfür infrage? Ein geeignetes Material bietet neben einer einfachen Synthesemöglichkeit mit schulischen Mitteln besondere Stoffeigenschaften, die sich von ihren makroskopisch größeren Analoga unterscheiden (LL5, LL6). Auch wenn hierfür prinzipiell viele Eigenschaftsänderungen untersucht werden können (Schmelzpunkt, magnetisches Verhalten, elektrische Leitfähigkeit, etc.), sind optische Eigenschaften wie die Farbe potenziell besonders geeignet. So sind beispielsweise Gold-Nanopartikel rot<sup>[162]</sup> oder Silber-Nanopartikel verschiedenfarbig (bspw. gelb, rot, violett oder blau)<sup>[282]</sup>. Entsprechende Synthesen werden unter anderem von HEINZERLING beschrieben<sup>[129, 282]</sup>, allerdings sind diese aufgrund der hohen Materialkosten tendenziell eher für Schülerlabore und Hochschulen geeignet (siehe Kap. 7.2.2). Ein weiteres Phänomen, das sich auf die nanoskalige Teilchengröße zurückführen lässt, ist die Fluoreszenz von Nanopartikeln unter UV-Licht, was besonders eindrucksvoll am Beispiel von Cadmiumselenid beobachtet werden kann (siehe Abbildung 16). Hier ändert sich die Farbe des emittierten Lichts mit der Größe der Teilchen, wobei kleine Teilchen von 2,5 nm blau und größere von 6,3 nm rotbraun fluoreszieren<sup>[283, 284]</sup>. Eine solche Teilchengrößenabhängigkeit von Eigenschaften wird in der Fachwissenschaft allgemein als Quantengrößeneffekt (quantum size effect) bezeichnet<sup>[285]</sup>. Nanomaterialien, bei denen aufgrund ihrer Größe diese Effekte auftreten, sind meist Halbleiter und werden Quantenpunkte

(quantum dots) genannt <sup>[284, 286–288]</sup> (siehe Kap. 5.4.3) und finden aufgrund der einstellbaren elektronischen und optischen Eigenschaften heutzutage Anwendung in Farbdisplays, farbtreuen und „warmen“ Leuchtmitteln <sup>[177]</sup>, Biomarkern <sup>[289]</sup> sowie in Solarzellen <sup>[290]</sup>. Allerdings sind viele dieser Nanomaterialien, wie die bereits erwähnten Cadmiumselenid-Partikel, für den experimentellen Schulunterricht aufgrund ihrer Gefährlichkeit (Kanzerogenität) und meist aufwendigen sowie teuren Herstellung nicht geeignet.

Eine gut geeignete Alternative für den Chemieunterricht stellen hier Zinkoxid-Nanopartikel dar, die in einem Partikelgrößenbereich von etwa 2 – 8 nm eine intensive Fluoreszenz aufweisen (LL5). Diese Nanopartikeln besitzen interessante Eigenschaften (photokatalytische Aktivität, UV-Filter, Fluoreszenz), woraus sich entsprechende Produkte und Alltagsanschlüsse ableiten lassen (Sonnencreme, Kosmetika, Displays, Katalysatoren, Wandfarben, LL8). Darüber hinaus bietet die Möglichkeit, Stoffeigenschaften durch Veränderung der Teilchengröße einzustellen, gute Chancen Anwendungen aus dem Bereich der Nanotechnologie im Chemieunterricht zu erschließen und die Eigenschaften dieser Materialien mithilfe chemischer Basiskonzepte zu deuten. Im Folgenden wird daher eine einfache Synthese mit gängigen Geräten und Chemikalien für den Chemieunterricht vorgestellt, die von den SuS als Einstiegsexperiment durchgeführt wird (LL6).

### **Experiment 2.1: Herstellung und Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln**

Die großtechnische Herstellung von Zinkoxid-Nanopartikeln erfolgt im Allgemeinen durch Fällungsreaktionen von Zinksalzen im alkalischen Medium, was in diesem Projekt allerdings mit Zinkacetat unter mildereren Bedingungen in Ethanol erfolgt. Es handelt sich dabei somit um einen Bottom-Up-Prozess – die entstehenden Partikel mit einer Größe von 5 - 7 nm weisen die SuS durch eine, bei Zinkoxid nur in diesem Größenbereich auftretende, gelbe Fluoreszenz nach <sup>[291]</sup>.

*Geräte und Chemikalien:* Ethanol (99 %, vergällt), Natriumhydroxid-Plätzchen (NaOH), Zinkacetat-Dihydrat, Magnetrührer, 2 Bechergläser, Thermometer, UV-Handlampe (bspw. Herolab UV-16 L oder UV-Geldscheinprüfer).

*Versuchsdurchführung:* Zunächst wird eine ethanolische NaOH-Lösung (0,2 M) hergestellt, indem 0,28 g NaOH-Plätzchen in 35 mL Ethanol bei 40 °C unter stetigem Rühren in einem Becherglas gelöst werden. Parallel dazu werden in einem 250 mL-Becherglas 2,2 g Zinkacetat-Dihydrat in 100 mL Ethanol bis zum vollständigen Lösen des Feststoffes auf 70 °C erwärmt. Sobald beide Feststoffe gelöst sind, werden die noch warmen Lösungen unter UV-Licht betrachtet und anschließend – ebenfalls unter UV-Licht – miteinander vermengt. Die Lösung wird anschließend für einige Tage verschlossen aufbewahrt.

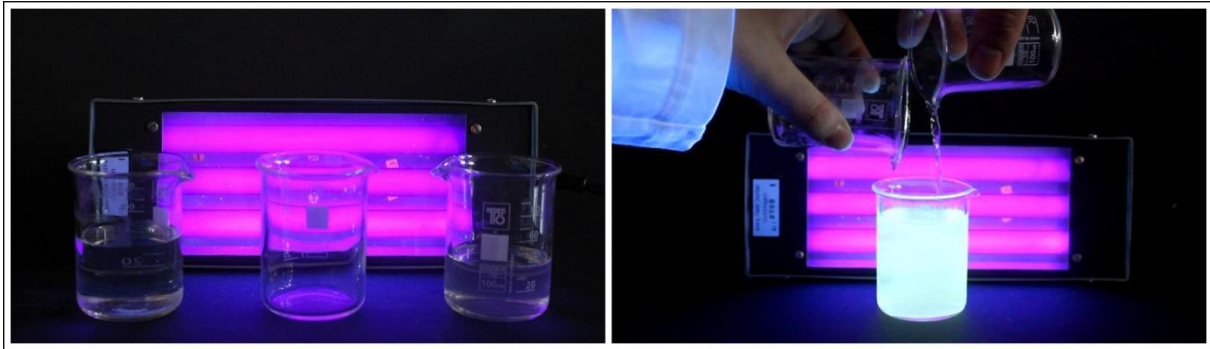
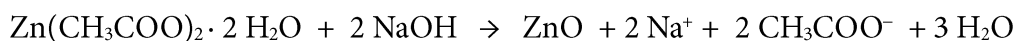


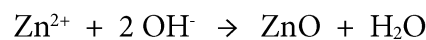
Abbildung 59 – Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln. Die Ausgangslösungen zeigen keine Fluoreszenz (links); sichtbare Fluoreszenz nach dem Vermengen der Lösungen (rechts).

*Beobachtung:* Unter UV-Licht zeigen die Ausgangslösungen unter UV-Licht keine Veränderung, die entstehende klare Lösung jedoch eine intensive gelbe Fluoreszenz (siehe Abbildung 59).

*Auswertung:* Bei der Reaktion von Zinkacetat-Dihydrat mit Natriumhydroxid in Ethanol werden Zinkoxid-Nanopartikel durch eine Fällungsreaktion gewonnen:



... was je nach Lerngruppe auch vereinfacht unter Vernachlässigung der unbeteiligten Ionen dargestellt werden kann:



### Fachliche Hintergründe: Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln

Die unmittelbar nach dem Vermengen der Lösungen auftretende gelbe Fluoreszenz deutet auf das Vorhandensein von Zinkoxid-Nanopartikeln in einem Größenbereich von 5 – 7 nm hin. Im Gegensatz zu großen (idealen) Kristallen nimmt bei nanoskaligen Partikeln die Anzahl an Defekten (z.B. Sauerstoff-Fehlstellen) zu, die zusätzliche Energieniveaus zwischen Valenz- und Leitungsband erzeugen. Diese Energieniveaus, welche auch als Aktivatorzentren oder Lochtraps bezeichnet werden <sup>[292]</sup>, ermöglichen zusätzliche strahlungsemitterende Übergangsmöglichkeiten. Durch Anregung eines Elektrons in das Leitungsband mit UV-Licht wird ein Elektron-Loch-Paar (ein sog. Exziton) erzeugt. Die anschließende Rekombination erfolgt über strahlungslose (Gitterschwingungen) und strahlungsemitterende Übergänge (Fluoreszenz), wobei letztere eine im Vergleich zum eingestrahlten Licht höhere Wellenlänge und damit geringere Energie (Rotverschiebung) aufweisen. Abbildung 60 (links) zeigt eine vereinfachte Darstellung der ablaufenden Prozesse an einem didaktisch reduzierten Energiestufenmodell.

Die detaillierten fachlichen Hintergründe zum Zusammenhang zwischen Partikelgröße und Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln sind sehr komplex und fachwissenschaftlich noch nicht vollständig geklärt, sodass sie auf dem oben beschriebenen Niveau im Rahmen des Chemieunterrichts nur schwer vermittelt werden können. In den beiden Lerngruppen wird die Fluoreszenz daher als spezifische Materialeigenschaft behandelt und mit Hilfe eines einfachen Bändermodells gedeutet (siehe Abbildung 60).

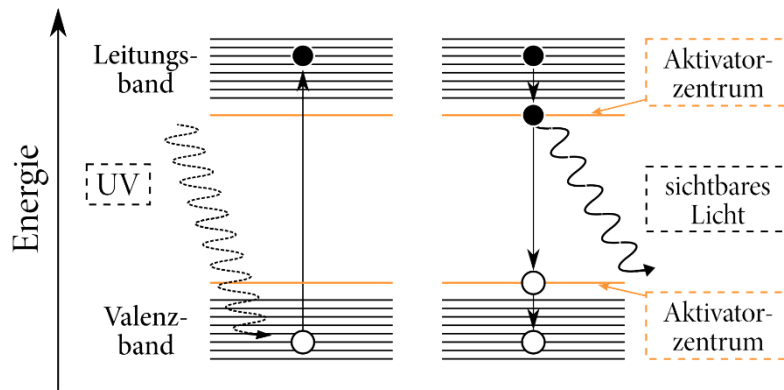


Abbildung 60 - Modell zur Deutung der Fluoreszenz von halbleitenden Zinkoxid-Nanopartikeln. 1. Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband in das Leitungsband mit UV-Licht. 2. Rekombination unter Emission von Fluoreszenz-Strahlung, verändert nach <sup>[168]</sup>.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Die Herleitung der Reaktionsgleichung stellt erfahrungsgemäß für einige SuS eine große Herausforderung dar; anstatt die Lösung vorzugeben, kann sie mit Hilfe von gestuften Lernhilfen auch selbst erarbeitet werden. Nachfolgend wird ein Ausschnitt der entsprechenden Informationskarte zur Erarbeitung der Reaktionsgleichung dargestellt. Die vollständige Lernhilfe findet sich im Anhang (A3.5).

### **Hinweise zur Aufstellung der Reaktionsgleichung**

1. Bestimmen Sie zunächst alle Stoffe bzw. Chemikalien die an der Reaktion beteiligt sein könnten!
2. Überlegen Sie nun, welche(r) Stoff(e) nur als Lösungsmittel dienen und vermutlich nicht mitreagieren!
3. Schreiben Sie die Edukte mit ihrer chemischen Formel auf die linke Seite und überlegen Sie, was das Produkt sein könnte.
4. Bedenken Sie, dass es sich bei den Stoffen um Salze handelt, die in Wasser Ionen bilden!
5. Gleichen Sie nun beide Seiten stöchiometrisch aus!

### **Erweiterte Hinweise**

1. Zinkacetat-Dihydrat, Natriumhydroxid und Ethanol sind die verwendeten Chemikalien.
2. Ethanol dient dabei nur als Lösungsmittel
3.  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} + \text{NaOH} \rightarrow$
4. Der Versuch dient der Herstellung von Zinkoxid-Nanopartikeln, also:
5.  $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{ZnO}$

Die vorliegenden Ionen sind  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{OH}^-$

Anknüpfend an die Synthese bieten sich für den weiteren Gang der Unterrichtseinheit mehrere Möglichkeiten, die von der Lehrkraft je nach festgelegten Lernzielen, verfügbarer Zeit und Leistungsstärke der Lerngruppe frei gewählt werden können. Die erste Möglichkeit ist der direkte Fortgang nach der erfolgreichen Synthese zur Untersuchung der Eigenschaften in weiteren Experimenten; die zweite Möglichkeit schließt an die Beobachtungen der SuS an, dass die Fluoreszenzfarbe der unterschiedlichen Gruppen einerseits variiert und dass sich darüber hinaus (nach einigen Tagen) Kristalle an dem Reaktionsgefäß bilden. Beide Beobachtungen bieten die Möglichkeit, eine direkte Abhängigkeit der Eigenschaften von der Partikelgröße zu verfolgen, was in dem nachfolgenden Experiment beschrieben werden soll. In den beiden Lerngruppen wurde aufgrund der vielfältigen Lerngelegenheiten und des illustrativen Experiments die erste Möglichkeit gewählt.

### **Versuch 2.2: Herstellung verschiedenfarbig fluoreszierender ZnO-Nanopartikel (optional)**

*„Eine Besonderheit des Faches Chemie ist der Wechsel zwischen Stoff- und Teilchen-ebene. Das daraus resultierende Modelldenken nimmt eine zentrale Rolle ein und leistet damit einen Beitrag zum Verständnis der grundsätzlichen Bedeutung von Modellen im Erkenntnisprozess der Naturwissenschaften.“<sup>[44]</sup>*

Wie das obige Zitat aus dem niedersächsischen Kerncurriculum verdeutlicht, ist das Stoff-Teilchen-Konzept von großer Bedeutung für naturwissenschaftliche Erkenntnisse im Allgemeinen und den Chemieunterricht im Besonderen. In diesem Versuch wird verdeutlicht, dass Stoffe im Übergang zu ihren submikroskopischen Teilchen ihre Eigenschaften ändern (LL5, LL6). Hierbei kann das klassische Stoff-Teilchenkonzept derart erweitert werden, als dass dieser Übergang, in dem Stoffeigenschaften stark von der Teilchengröße abhängen, als Mesoebene bezeichnet wird. Die Thematisierung dieser Mesoebene kann einen Beitrag leisten, SuS für die Andersartigkeit des submikroskopischen Bereichs zu sensibilisieren und damit den Übergang zum Diskontinuumsdenken zu erleichtern. Des Weiteren kann der Versuch eingesetzt werden, um die Übertragbarkeit der chemischen Basiskonzepte Donator-Akzeptor und Struktur-Eigenschaft an einem Beispiel zu explizieren und damit deren Relevanz als strukturgebende Prinzipien in der Chemie zu verdeutlichen. Diese sind vor allem aus der Säure-Base- und Redoxchemie bekannt und können nun für die Deutung dieses Nanophänomens als weiteres Beispiel entsprechend der oben genannten Beschreibungen angewendet werden.

*Geräte und Chemikalien:* Ethanol (99 %, vergällt), Natriumhydroxid-Plätzchen (NaOH), Zinkacetat-Dihydrat, Bechergläser (50 mL und 200 mL), Erlenmeyerkolben, Magnetrührer mit Heizplatte, Eisbad, UV-Lampe (bspw. Herolab UV-16 L oder Geldscheinprüfer), Thermometer.

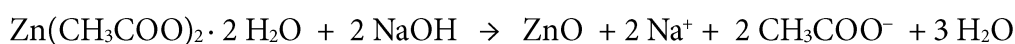
*Versuchsdurchführung:* Zunächst werden 0,3 g Natriumhydroxid-Plätzchen in 30 mL Ethanol und 2,2 g Zinkacetat-Dihydrat in 110 mL Ethanol unter Rühren bei etwa 60 °C in einem 50 mL bzw. 200 mL Becherglas gelöst. Die klaren Lösungen werden in ein Eisbad gestellt und auf etwa 0 °C heruntergekühlt. Anschließend werden die kalten Lösungen in einem Erlenmeyerkolben zusammengegeben und auf einen Magnetrührer mit vorgeheizter Heizplatte (150 °C) gestellt, langsam gerührt und mit einer UV-Lampe von oben bestrahlt. In einer Fotoserie mit ca. einem Bild pro Minute wird der Reaktionsverlauf über ca. 20 Minuten festgehalten.

*Beobachtung:* Die zunächst nicht fluoreszierende Flüssigkeit zeigt nach etwa einer Minute eine blaue Fluoreszenz unter Bestrahlung mit UV-Licht; mit zunehmender Erwärmung der Reaktionsmischung ändert sich die Farbe der Fluoreszenzstrahlung innerhalb von ca. 15 Minuten kontinuierlich von blau über türkis nach grün und schließlich gelb. Abbildung 61 zeigt Momentaufnahmen des Experiments.

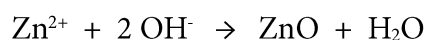


Abbildung 61 – Momentaufnahmen des Experiments zur Herstellung farbig fluoreszierender Zinkoxid-Nanopartikel.

*Auswertung:* In ethanolischer Lösung reagiert Zinkacetat-Dihydrat mit Natriumhydroxid unter Bildung von Zinkoxid, was mit oben angegebener Reaktionsgleichung beschrieben



... und je nach Lerngruppe auch vereinfacht unter Vernachlässigung der unbeteiligten Ionen dargestellt werden kann:



Hierbei bilden sich zu Beginn der Reaktion zunächst kleine Partikel die im weiteren Reaktionsverlauf, mit steigender Temperatur, wachsen. Das Wachstum der Partikel ist auf den Prozess der OSTWALD-Reifung zurückzuführen, bei dem sich kleinere Partikel zugunsten des Wachstums größerer Partikel auflösen (siehe Kap. 5.5.2, Abbildung 19). Die unterschiedlichen Fluoreszenzfarben sind auf die Bildung der verschiedenen großen Zinkoxid-Nanopartikel zurückzuführen. Dabei gilt die bereits beschriebene Struktur-Eigenschafts-Beziehung: Je größer die Zinkoxid-Nanopartikel sind, desto kleiner ist deren Abstand zwischen den Energieniveaus und desto energieärmer die resultierende Fluoreszenzstrahlung (Rotverschiebung).

*Hinweis:* Das Partikelwachstum wird durch die Wärmezufuhr stark beschleunigt. Wird die Reaktion bei Raumtemperatur durchgeführt (ohne Heizplatte), erfolgt das Partikelwachstum deutlich langsamer, sodass sich erst nach mehreren Tagen stabile gelb fluoreszierende Partikel bilden.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Für die Beschreibung dieser (Partikel-)größenabhängigen Fluoreszenz im Chemieunterricht wurde vor allem die für Nanomaterialien charakteristische Besonderheit aufgegriffen, dass Stoffeigenschaften von der Größe ihrer Teilchen abhängen können. Wird beispielsweise ein makroskopisch großer Zinkoxidkristall auf der Zentimeterskala geteilt, so ändern sich die Stoffeigenschaften der resultierenden, kleineren Zinkoxidkristalle nicht. Betrachtet man hingegen nanoskopisch große Zinkoxidkristalle, so unterscheiden sich deren Eigenschaften von denen makroskopisch großer Kristalle deutlich; so fluoresziert ein makroskopisch großer Zinkoxid-Kristall nicht. Noch deutlicher wird es im Bereich der



Nanometerskala, in dem relativ geringe Änderungen der Teilchengröße zu unterschiedlichen Fluoreszenzerscheinungen führen.

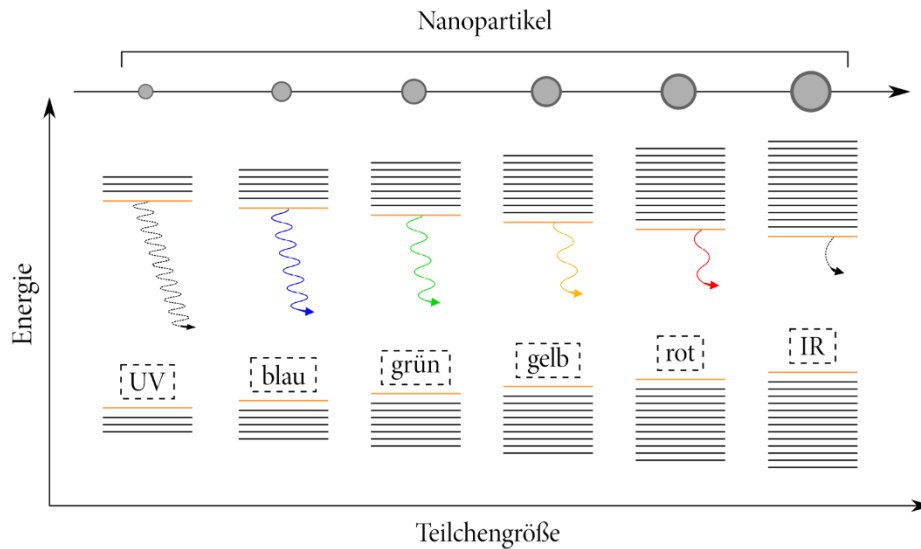


Abbildung 62 – Schematische Darstellung zum Zusammenhang zwischen Teilchengröße, Abstand zwischen den Energieniveaus und Energie bzw. Farbe der resultierenden Fluoreszenzstrahlung.

Für die Deutung dieses teilchengrößenabhängigen Phänomens wurde das in Abbildung 62 dargestellte Modell unterstützend eingesetzt. In diesem werden analog zu Abbildung 60 vereinfacht Energiestufen dargestellt, hier jedoch in Abhängigkeit ihrer Teilchengröße. Hierbei lassen sich gemeinsam mit den SuS folgende einfache Struktur-Eigenschafts-Beziehungen ableiten: Mit zunehmender Teilchengröße der Nanopartikel wird der Abstand zwischen den niedrigen und den hohen Energieniveaus kleiner; je geringer dieser Abstand ist, umso energieärmer ist die zu beobachtende Fluoreszenzstrahlung. So fluoreszieren zum Beispiel kleinere Nanopartikel blau (größere Energiedifferenz bedeutet kürzere Wellenlänge), während größere gelb fluoreszieren (kleinere Energiedifferenz bedeutet längere Wellenlänge). Ab einer gewissen Teilchengröße jedoch ist die Energiedifferenz so klein, dass die Wellenlänge der emittierten Energie nicht mehr im sichtbaren Bereich liegt und somit keine Fluoreszenz mehr wahrnehmbar ist.

Im Anschluss an die Synthese untersuchen die SuS die Eigenschaften der hergestellten Nanopartikel in weiteren Experimenten. Dabei lässt sich die Fluoreszenz besonders einfach nutzen, um allgemein die Präsenz von Zinkoxid-Nanopartikeln durch Bestrahlung mit UV-Licht zu demonstrieren, d.h. als Nachweis dieser Nanopartikel. Entsprechend können aber auch umgekehrt die Zinkoxid-Nanopartikel genutzt werden, um mittels ihrer Fluoreszenz UV-Licht zu detektieren (Experiment 2.3).

Das Phänomen der Fluoreszenz kann weiterhin genutzt werden, um die Funktion von Zinkoxid-Nanopartikeln als Photokatalysator über den Nachweis von entstehenden Radikalen zu demonstrieren (Experiment 2.4). Zur Deutung der photokatalytischen Aktivität kann hierbei ebenfalls auf das Energie- und Donator-Akzeptor-Prinzip rekurriert werden, sodass kein weiteres Modell eingeführt werden muss; eine entsprechende Beschreibung auf schulischem Niveau mit Titandioxid-Nanopartikeln als Photokatalysator findet sich im vorherigen Kapitel und kann



analog für die Auswertung eingesetzt werden. Typischerweise kann dies am Beispiel der Zersetzung von Methylenblau oder natürlichen Farbstoffen (bspw. Betanin aus Rote-Beete-Saft) erarbeitet werden (Experiment 2.5).

Zuletzt bietet die Fluoreszenz die Möglichkeit, die Interaktion der Nanopartikel an pflanzlichen Zellen und Zellmembranen unter der Fragestellung zu überprüfen, ob nanoskalige Partikeln mit sehr geringen Abmessungen Zellmembranen passieren können (Experiment 2.6). Die Resultate dieses Experiments können fachübergreifend unter biologischen Aspekten untersucht und ausgewertet werden und bieten vielfältige Bewertungs- und Diskussionsgrundlagen (LL9) sowie einen direkten Übergang zu dem WebQuest als dritten Abschnitt der Unterrichtseinheit.

### **Experiment 2.3: Verwendung einer Zinkoxid-Nanopartikellösung als UV-Lichtdetektor**

In diesem Experiment wird die Fluoreszenz der Zinkoxid-Nanopartikel genutzt, um UV-Licht zu detektieren. Hierzu werden die SuS im Vorfeld aufgefordert, eigene Sonnenbrillen, Sonnenschutzmittel, weitere Kosmetika mit UV-Schutz mitzubringen, um diese im Hinblick auf ihre UV-Absorption bzw. Durchlässigkeit hin zu untersuchen; eine Fluoreszenz der Zinkoxid-Nanopartikel zeigt, dass die UV-Strahlung nicht vollständig durch das jeweils betrachtete Objekt absorbiert wird. Die Experimente werden von den SuS selbst in Gruppen durchgeführt und die Ergebnisse anschließend den anderen Gruppen vorgestellt.

*Geräte und Chemikalien:* Zinkoxid-Nanopartikellösung (aus Experiment 2.1), UV-Handlampe (bspw. Herolab UV-16 L oder Geldscheinprüfer), Pappe, Stativmaterial, Petrischale, diverse Gläser, Sonnenbrillen(gläser), transparente Kunststoffproben und Sonnenspray

*Versuchsdurchführung:* Zunächst wird eine UV-Lampe mit Pappe so abgedeckt, dass das UV-Licht nur durch eine Öffnung von etwa 2 cm Durchmesser durchstrahlen kann (siehe Abbildung 63). Die Lampe wird mit Hilfe des Stativmaterials in ca. 20 cm Höhe befestigt und direkt unter der Öffnung eine Petrischale mit Zinkoxid-Nanopartikellösung platziert. Bei direkter Bestrahlung soll die Lösung intensiv fluoreszieren (siehe Abbildung 63.1). Anschließend werden verschiedene Proben und Materialien vor die Öffnung gehalten und deren Durchlässigkeit für UV-Strahlung anhand der Abschwächung der Intensität der fluoreszierenden Nanopartikellösung untersucht.

*Beobachtung:* Die Intensität der Fluoreszenz der Zinkoxid-Nanopartikellösung in der Petrischale wird stark abgeschwächt oder erlischt, wenn vor die Öffnung der UV-Lampe z.B. ein Sonnenbrillenglas gehalten wird (Abbildung 63.2). Gleiches ist zu beobachten, wenn ein Glas, das selbst die UV-Strahlung durchlässt (Abbildung 63.3) mit Sonnenschutzmittel besprüht wird (Abbildung 63.4).

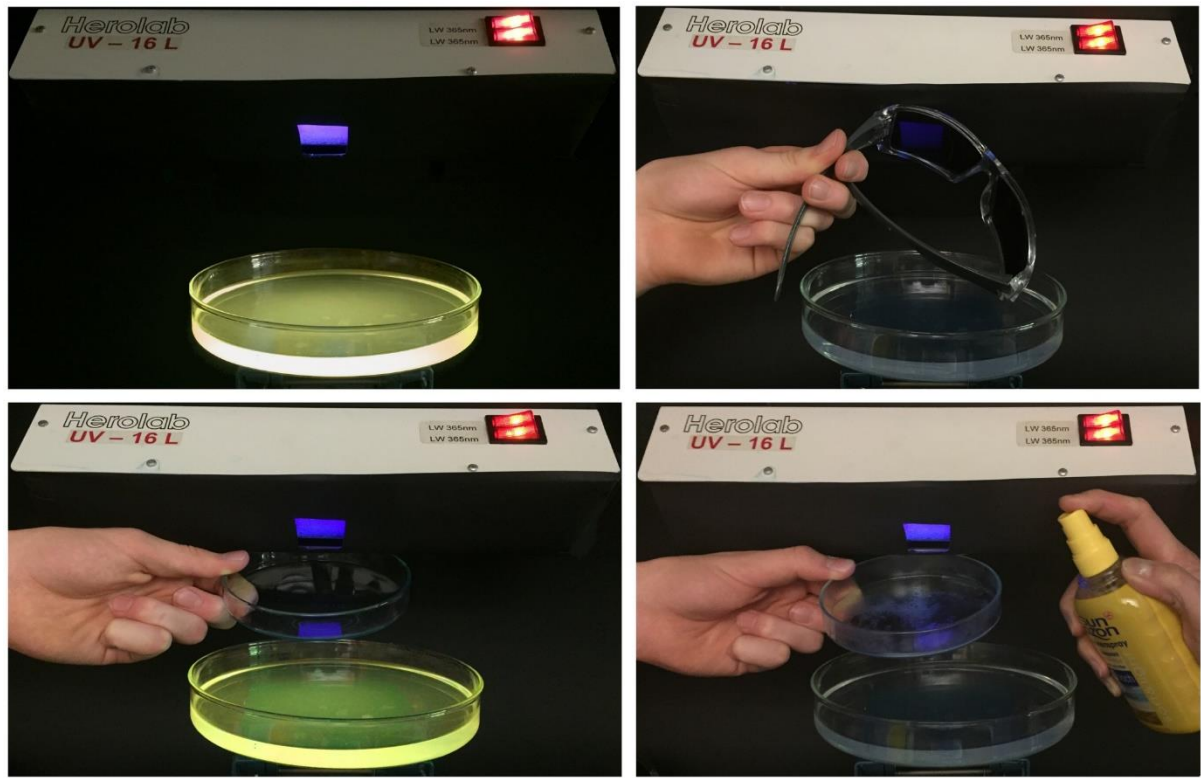


Abbildung 63 – Experimente zur Verwendung von Zinkoxid Nanopartikellösung als UV-Filter.

*Auswertung:* In diesem Versuch wird die Verwendung von Zinkoxid-Nanopartikel als UV-Licht-Detektor anhand der Fluoreszenz demonstriert; gleichzeitig kann auch die Absorption des eingestrahlt UV-Lichtes von unterschiedlichen Filtersystemen überprüft werden. In diesem Beispiel wurden dafür eine Sonnenbrille und ein organisches UV-Filtersystem aus Sonnencreme überprüft.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Dieser Versuch bietet Anchlüsse an mehrere Kontexte, allen voran die Verwendung von Sonnencreme zum Schutz vor UV-Licht. Als Alternativversuch kann ebenfalls die Wirkung von Titandioxid-Nanopartikeln oder von Zinkoxid-Nanopartikeln selbst als mineralischer UV-Filter (aktive Komponente in vielen Sonnencremes) demonstriert werden. Eine entsprechende Versuchsbeschreibung zur Erzeugung einer nanoskaligen und transparenten Titandioxid-Schicht findet sich in Kap. 7.1.1.3 (Experiment 1.4).

#### **Experiment 2.4: Photokatalytische Aktivität – Nachweis von Hydroxylradikalen**

Mit diesem Experiment wird die photokatalytische Aktivität von Zinkoxid-Nanopartikeln unter UV-Licht Bestrahlung durch Nachweis der an der Oberfläche generierten Hydroxylradikale durch Reaktion mit Cumarin anschaulich demonstriert. Dieser Versuch wird als Einführung in die Photokatalyse durchgeführt.

*Geräte und Chemikalien:* Zinkoxid-Nanopartikel aus Experiment 2.1, Cumarin, demin. Wasser, 5 Bechergläser, 2 Spatel, UV-Handlampe (bspw. Herolab UV-16 L oder Ultra Vitalux)

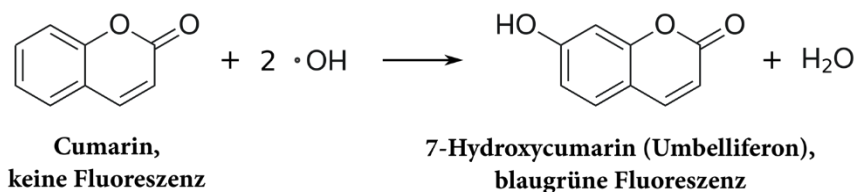
**Versuchsdurchführung:** Zunächst wird ein Pulver der Zinkoxid-Nanopartikel durch Eindampfen von etwa 100 mL der ethanolischen Zinkoxid-Nanopartikeldispersion gewonnen. Anschließend werden 0,5 g Cumarin in 100 mL warmen Wasser gelöst. Die Lösung wird auf zwei Bechergläser aufgeteilt und in eines drei Spatelspitzen des Pulvers gegeben, das andere dient als Referenz. Anschließend werden beide Bechergläser für ca. 30 Minuten mit der UV-Lampe von oben bestrahlt. Das Pulver wird anschließend abfiltriert (ggf. mehrmals) und das klare Filtrat im Vergleich mit der Cumarinlösung aus dem anderen Becherglas unter UV-Licht betrachtet.

**Beobachtung:** Das Filtrat fluoresziert bei Bestrahlung mit UV-Licht intensiv blau, wohingegen die wässrige Cumarinlösung keine Fluoreszenz zeigt (siehe Abbildung 64).



Abbildung 64 – Links: Eingedampfte Zinkoxid-Nanopartikel. Mitte: Cumarinlösung mit Zinkoxid-Nanopartikeln (linkes BG) und ohne (rechtes BG). Rechts: Filtrierte Lösungen unter UV-Licht.

**Auswertung:** Zinkoxid-Nanopartikel erzeugen als Photokatalysator bei Einwirkung von UV-Licht diverse Radikalspezies durch Redoxreaktionen der angeregten Elektronen bzw. der Elektronenfehlstellen mit umgebenden Molekülen. Dabei werden in wässriger Lösung unter anderem Hydroxylradikale gebildet, die mit Cumarin zu dem intensiv blaugrün fluoreszierenden 7-Hydroxycumarin (Umbelliferon) reagieren<sup>[293, 294]</sup>, vereinfacht dargestellt gemäß:



Anhand der Intensität der Fluoreszenz kann dabei der Reaktionsverlauf verfolgt werden.

**Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:** Für die Erarbeitung der Reaktionsgleichung mit den SuS bietet es sich an, die Fluoreszenz von 7-Hydroxycumarin als positive Blindprobe im Vorfeld als Schüler- oder Lehrerdemonstrationsexperiment durchzuführen. Die hierfür benötigten Hydroxylradikale können dabei entweder durch die katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit Braunstein oder über das Einleiten von Ozon in die Cumarin-Lösung erhalten werden (Ozongenerator, wie z.B. Ozonisator, Modell A300) sind im Aquarienbedarf erhältlich). Über den Vergleich mit Experiment 2.4 können die SuS somit selbstständig die Generierung von (Hydroxyl-)Radikalen und somit das grundlegende Prinzip der Photokatalyse herleiten.

Hieran anschließend bieten sich für eine vertiefende unterrichtliche Betrachtung der Anwendungsmöglichkeiten nun mehrere mögliche Kontexte an, wie etwa die photokatalytische Luft- oder Abwasserreinigung<sup>[295]</sup> (LL8). Nachstehend wird hierzu ein entsprechendes Modellexperiment präsentiert.

### **Experiment 2.5: Photokatalytische Zersetzung von Rote-Beete-Saft durch Zinkoxid-Nanopartikel**

Durch Bestrahlung mit UV-Licht können nanoskalige Zinkoxidpartikel organische Farbstoffe photokatalytisch über die Generierung verschiedener Radikalspezies zersetzen. In diesem Versuch wird diese Eigenschaft am Beispiel von Rote-Beete-Saft demonstriert. Alternativ kann dieser Versuch auch mit anderen organischen Farbstoffen, bspw. Methyleneblau, durchgeführt werden.

*Geräte und Chemikalien:* Zinkoxid-Nanopartikel aus Experiment 2.1, Rote-Beete-Saft, UV-Lampe (Herolab UV-16 L oder Ultra-Vitalux-Lampe, 300 W), Stativmaterial, Pipetten, Schnappdeckelgläser, Bechergläser.

*Versuchsdurchführung:* Ca. 1 mL des Saftes werden mit 35 mL Wasser verdünnt; je 6 mL der Lösung werden in vier Schnappdeckelgläser gegeben und beschriftet. Darüber hinaus werden Proben gemäß Tabelle 15 vorbereitet.

Tabelle 15 – Zusammensetzung der Proben für das Photokatalyse-Experiment

Probe	#1	#2	#3	#4
Zugabe von 4 mL Zinkoxid-Lösung	x	x		
Bestrahlung durch UV-Licht (5 Minuten)	x		x	

Die Bestrahlung der Proben erfolgt mit Hilfe der UV-Lampe. Es ist darauf zu achten, dass die SuS diese so positionieren, dass die Oberfläche der Flüssigkeit direkt bestrahlt wird; eine Bestrahlung von der Seite durch das Glas verzögert aufgrund dessen Absorption von UV-Licht die Reaktion und sollte vermieden werden.

*Beobachtung:* Durch die Zugabe der Zinkoxid-Nanopartikel-Lösung findet bei den Proben 1 und 2 zunächst ein Farbwechsel von rot nach orange statt. Durch die Bestrahlung mit UV-Licht entfärben sich die Lösungen unterschiedlich stark; Probe 1 entfärbt sich nahezu vollständig, wohingegen bei Probe 3 kaum eine Farbänderung stattfindet, wie der Vergleich mit der Referenz (Probe 4) zeigt (siehe Abbildung 65).

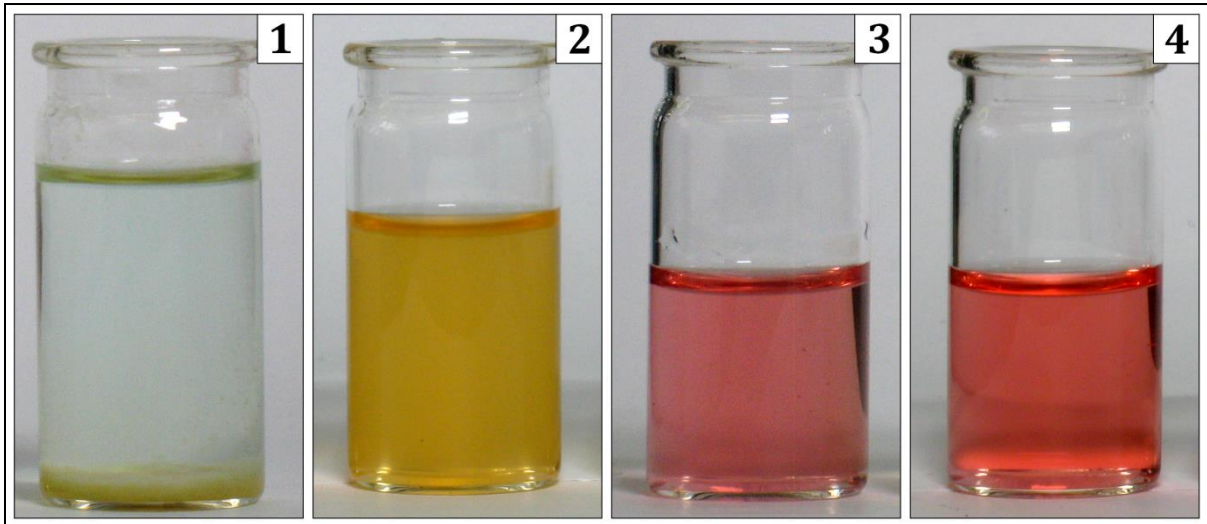


Abbildung 65 – Photokatalytische Entfärbung von Rote-Beete-Saft: fotografische Aufnahmen der Proben 1 – 4.

*Auswertung:* In Rote-Beete-Saft ist der Farbstoff Betanin enthalten, welcher in Abhängigkeit des pH-Wertes seine Farbe ändert. Im sauren und neutralen Bereich ist der Rote-Beete-Saft rot gefärbt; im Basischen färbt sich letzterer durch Hydrolyse des Betanins zu Betanidin orange, was den Farbwechsel von Probe 1 und 2 direkt nach der Zugabe der basischen Zinkoxid-Nanopartikeldispersion erklärt (siehe Abbildung 66). Es hat sich in der Unterrichtspraxis bewährt, diese Reaktion vor der Photokatalyse anhand einer entsprechenden Blindprobe zu thematisieren, um anschließend die eigentliche Reaktion zu fokussieren.

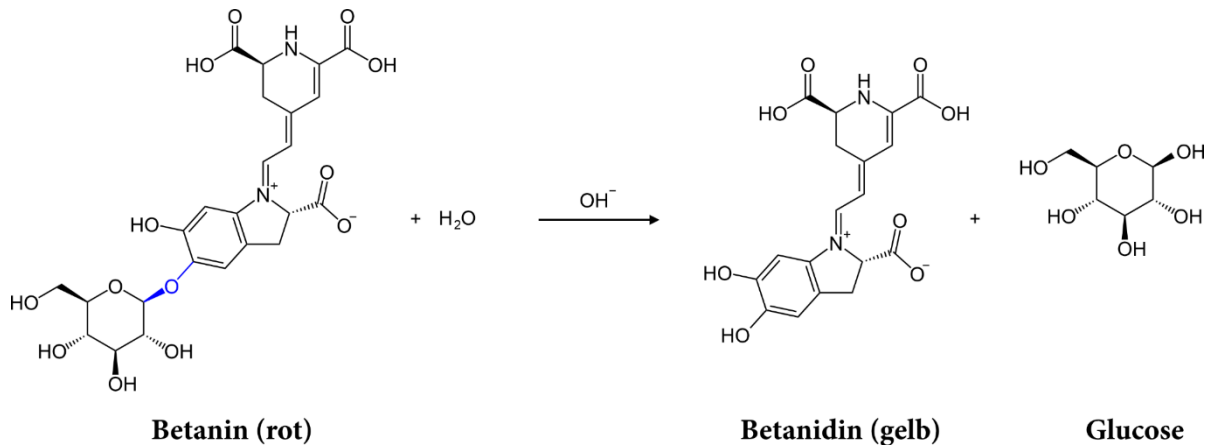


Abbildung 66 – Hydrolyse von Betanin zu Betanidin und Glucose.

Der Abbau des Betanidins in Probe 1 erfolgt photokatalytisch durch verschiedene Radikalspezies, die sich in Gegenwart der Zinkoxid-Nanopartikel bilden. Durch Vergleich der Proben 1-3 lässt sich schließen, dass sowohl Zinkoxid-Nanopartikel als auch UV-Licht für den photokatalytischen Abbau benötigt werden. Analog zu der in Experiment 1.3 beschriebenen Deutung werden bei Zinkoxid-Nanopartikeln ebenfalls Elektronen durch Bestrahlung mit energiereichem UV-Licht aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt. Die entstehenden Elektron-Loch-Paare reagieren nun mit an der Zinkoxid-Partikeloberfläche adsorbierten Molekülen in Redoxreaktionen zu verschiedenen Radikalspezies, unter anderem zu Hydroxylradikalen. Die

entstehenden Radikale reagieren auf vielfache Weise mit dem Farbstoff Betanidin, wodurch dieser unter fortwährender Bestrahlung und idealen Bedingungen vollständig zu Kohlenstoffdioxid und Wasser zersetzt werden kann. Eine umfassendere Darstellung möglicher Abbauewege organischer Substanzen mittels Photokatalyse findet sich in verschiedenen Lehrwerken <sup>[250]</sup>.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Dieser Sachverhalt lässt sich nach einer geringfügigen Modifikation desselben vereinfachten Modells zur Deutung der Fluoreszenz anschaulich darstellen (siehe Abbildung 67); auf diese Weise kann an erlernte Grundlagen angeknüpft und auf die Einführung eines weiteren Modells verzichtet werden. Um entsprechenden Missverständnissen vorzubeugen, sollte hierbei betont werden, dass beide Prozesse simultan ablaufen.

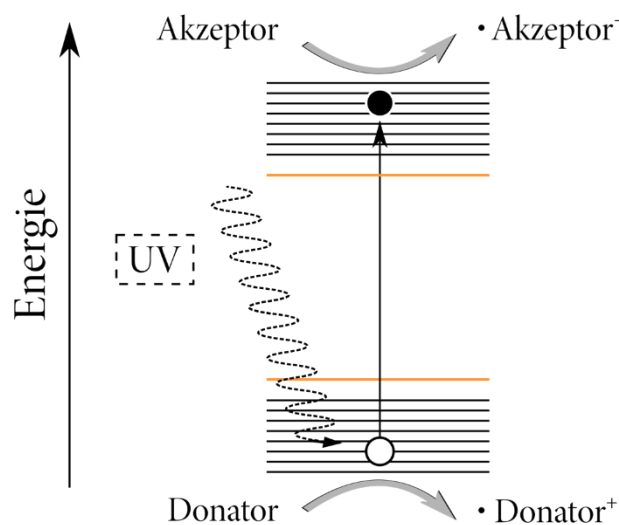


Abbildung 67 – Vereinfachtes Bändermodell zur Deutung der heterogenen Photokatalyse (rechts).

Hinsichtlich des Unterrichtsganges schließt an die Auswertung des Versuches eine Betrachtung des Gefahrenpotenzials an (LL9). Dabei wird im Unterrichtsgespräch die Fragestellung eröffnet: Wenn Zinkoxid-Nanopartikel unter UV-Licht Radikale bilden, was bedeutet das für den Einsatz in Kosmetika und insbesondere Sonnencreme? In diesem Zusammenhang wird (je nach verfügbarer Zeit) von den SuS recherchiert oder von der Lehrkraft bereitgestellt, dass Nanopartikel mit Partikelgrößen  $< 10$  nm potenziell in der Lage sind, die gesunde Haut zu durchdringen <sup>[210]</sup> und folglich als kritisch angesehen werden. Für den Einsatz schreibt das SCIENTIFIC COMMITTEE der EUROPÄISCHEN KOMMISSION daher aus Sicherheitsgründen eine Mindestgröße von (im Mittel) 30 nm vor <sup>[210]</sup>.

Anders als bei Titandioxid-Nanopartikeln kann bei Zinkoxid auf einfache Weise anhand der Fluoreszenz beobachtet werden, wie sich die Nanopartikel (mit einem Größenbereich zwischen 2 und 8 nm, siehe Experiment 2.1) auf zellulärer Ebene verteilen. Im folgenden Experiment soll damit die eben genannte Gefährdungsbeurteilung hinsichtlich der Mindest-Partikelgröße überprüft werden.



## Experiment 2.6: Wirkung von Zinkoxid-Nanopartikeln auf pflanzliche Zellen

In diesem Versuch wird die Fluoreszenz als Eigenschaft von Zinkoxid-Nanopartikeln genutzt um zu untersuchen, inwiefern sich diese durch einfaches Abspülen von einem pflanzlichen (Modell-)System entfernen lassen. Darüber hinaus wird mit Hilfe eines Lichtmikroskops<sup>22</sup> die Verteilung auf zellulärer Ebene analysiert. Über die Versuche können nicht nur Fächerübergriffe zu klassischen Unterrichtsthemen aus dem Bereich der Zytologie erfolgen, sondern auch Bezüge zu modernen Forschungsthemen der biophysikalischen Chemie hergestellt werden, wie etwa die Verwendung von Nanopartikeln als Biomarker<sup>[289]</sup> (LL8). Die Ergebnisse der Versuche eröffnen zudem Perspektiven für eine reflektierte Auseinandersetzung zum Einsatz von Nanopartikeln in Alltagsprodukten, wie etwa die Verwendung von Zinkoxid-Nanopartikeln in Kosmetika (LL9).

*Geräte und Chemikalien:* Zinkoxid-Nanopartikellösung (aus Experiment 2.1), Ethanol (99 %), Zwiebel oder Radieschen, Pinzette, 2 Schnappdeckelgläser, Messer, UV-Lampe (bspw. Herolab UV-16 L). *Optional:* Lichtmikroskop, Objektträger.

*Versuchsdurchführung:* Eine Zwiebel oder ein Radieschen wird mit einem Messer in kleine Stücke geschnitten und jeweils ein paar Stücke davon in zwei Schnappdeckelgläser gegeben. In Schnappdeckelglas 1 (Vergleichsprobe) wird Ethanol hinzugefügt, sodass alle Stücke mit der Flüssigkeit bedeckt sind, in Schnappdeckelglas 2 wird die gleiche Menge an Zinkoxid-Nanopartikel-Dispersion gefüllt (siehe Abbildung 68 links). Die beiden Gläser werden verschlossen und ca. 5 Minuten geschüttelt. Danach werden die Flüssigkeiten abgegossen, die Zwiebelstücke unter UV-Licht betrachtet anschließend unter fließendem Wasser abgespült (Abbildung 68 mitte) und erneut unter UV-Licht betrachtet.

*Bei Verfügbarkeit eines Lichtmikroskops:* Zur genaueren Analyse der Zwiebelstücke werden auf je einem Objektträger Zwiebelhäutchen der beiden Proben unter einem Lichtmikroskop bei ausgeschalteter Lichtquelle mit UV-Licht entsprechend Abbildung 69 (links) bestrahlt. Dabei wird eine Vergrößerung gewählt, mit der die Zwiebelzellen dargestellt werden können.

*Hinweis:* Beim Mikroskopieren mit UV-Licht muss sich ein UV-Sperrfilter im Strahlengang oder vor den Okularen befinden, damit dieses nicht auf die Augen trifft! Alternativ können die Präparate mit einem Kameraaufsatz untersucht werden.

*Beobachtung:* Die in der Zinkoxid-Nanopartikel-Lösung eingelegten Zwiebelstücke zeigen vor und nach dem Abspülen unter UV-Licht eine deutliche gelbe Fluoreszenz die bei der Referenzprobe nicht zu beobachten ist (siehe Abbildung 68).

---

<sup>22</sup> Sollte kein Lichtmikroskop zur Verfügung stehen, kann der Versuch auch mit den hier bereitgestellten Aufnahmen (siehe unten) ausgewertet werden.



Abbildung 68 – Eingelegte Zwiebelproben in Ethanol und in eine Zinkoxid-Nanopartikel-Dispersion(links); Abspülen der Zwiebelstücke unter fließendem Wasser (mitte); Zwiebelproben nach dem Abspülen unter UV-Licht (rechts).

Bei Betrachtung des Häutchens aus der in Ethanol eingelegten Zwiebelprobe durch das Lichtmikroskop sind keine fluoreszierenden Bereiche unter UV-Licht zu erkennen. Dagegen zeigt die in Zinkoxid-Nanopartikel-Lösung eingelegte Probe eine intensive Fluoreszenz, die jedoch nicht über die gesamte Probe gleichmäßig verteilt, sondern nur in einigen Bereichen lokalisiert ist (siehe Abbildung 69).

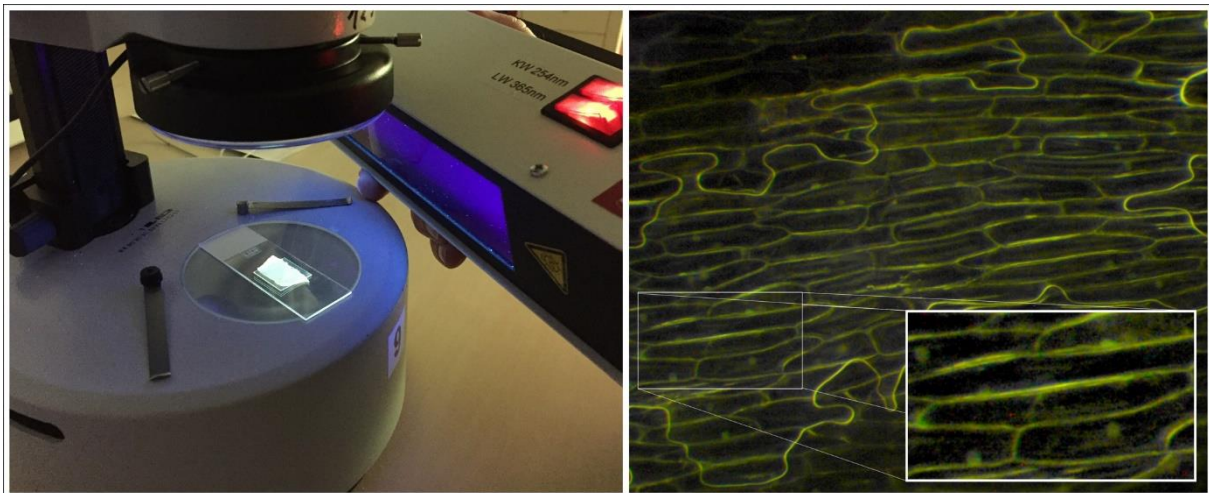


Abbildung 69 – Lichtmikroskop mit UV-Lampe und Zwiebelhäutchen (links). Lichtmikroskopische Betrachtung des in Zinkoxid-Nanopartikel-Dispersion eingelegten Zwiebelhäutchens (rechts). Das Inset zeigt einen vergrößerten Ausschnitt mit stärkerem Kontrast.

*Auswertung:* Durch einfaches Abspülen lassen sich Zinkoxid-Nanopartikel nicht rückstandslos von den Zwiebelstücken entfernen, wie die weiterhin bestehende Fluoreszenz zeigt (siehe Abbildung 68). Werden die Zwiebelstücke zerteilt, zeigt sich bei genauer Betrachtung, dass nicht nur die Oberfläche der Probenstücke fluoresziert, sondern auch das Innere der Probe was darauf schließen lässt, dass die Zinkoxid-Nanopartikel auch in diesen Bereich gelangt sind. Dabei kann allerdings noch keine Aussage getroffen werden, wie genau die Partikel in der Probe verteilt sind bzw. ob sie in Zellen eingedrungen sind, sich an der Zellmembran anlagern oder sich zwischen den Zwiebelschichten befinden.

Bei der mikroskopischen Analyse wird deutlich, dass sich die Zinkoxid-Nanopartikel vor allem an den Zellwänden anlagern, das Zellplasma selbst fluoresziert hingegen kaum. Darüber hinaus kann bei einigen Zellen beobachtet werden, dass auch der deren Zellkerne fluoreszieren. Ein möglicher Grund hierfür könnte sein, dass bei der Präparation einige Zellwände beschädigt



wurden und somit Zinkoxid-Nanopartikel in deren Zellinneres gelangen konnte. Andererseits kann auf dieser Grundlage nicht ausgeschlossen werden, dass Zinkoxid-Nanopartikel aufgrund der geringen Größe in den Zellinnenraum (und ggf. auch den Zellkern) gelangen können. Ein endgültiger Nachweis für letztere Vermutung mittels Fluoreszenzmikroskopie steht aber noch aus.

In jedem Fall können über die Auswertung dieses Versuches vielfältige Inhalte aus den Fachbereichen Chemie und Biologie über den Kontext Nanotechnologie synergistisch miteinander vernetzt werden; gleichzeitig werden vielfältige Anknüpfungspunkte bzw. Diskussionsgrundlagen sowie eine inhaltliche Überleitung zum letzten Abschnitt hergestellt (LL9).

Der dritte Abschnitt der Unterrichtseinheit fokussiert nach Kennenlernen der Anwendungen erneut die Bewertung des Einsatzes von Nanotechnologie in diversen Kontexten. Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit dieser Unterrichtseinheit und der positiven Erfahrungen im vorher beschriebenen Projekt wurde zu diesem Zweck das in Kap. 7.1.1.3 beschriebene WebQuest überarbeitet und durchgeführt (siehe oben).

#### **7.1.2.4 Evaluation**

Das Unterrichtsprojekt wurde im Sommer 2015 an einem niedersächsischen Gymnasium und einer niedersächsischen Integrierten Gesamtschule in der 11. Klassenstufe in Kooperation mit den jeweiligen Lehrkräften durchgeführt. Beide Kurse wurden von dem Autor und NICOLAI TER HORST durchgeführt, um eine inhaltliche Vergleichbarkeit gewährleisten zu können. Aus diesem Grunde und im Hinblick auf das Ziel des Fragebogens, Tendenzen statt quantitative Ergebnisse zu erhalten, sollen beide Evaluationen gemeinsam betrachtet werden.

Wie bereits in Projekt 1 verfolgt die Evaluation zwei Ziele; einerseits soll sie untersuchen, inwiefern die Lernziele tendenziell erreicht werden konnten und andererseits Hinweise für die Weiterentwicklung der Inhalte und Unterrichtsmaterialien liefern. Sie besitzt demzufolge einen explorativen Charakter und wird erneut basierend auf einer qualitativen (Paper-Pencil-) Erhebung und im Rahmen der partizipativen fachdidaktischen Aktionsforschung (siehe oben) durchgeführt (siehe Kap. 7.1.1.4).

#### **Paper-Pencil-Fragebogen**

Der Fragebogen des vorherigen Kapitels wurde dabei weiter ausdifferenziert und besitzt nun in Anbindung an die gestellten Ziele (siehe Abschnitt „Ziele und Beschreibung“) sieben offene Fragestellungen und eine kurze Aufgabe zu den fachlichen Inhalten, den gesellschaftlichen Bezügen sowie der Bewertung des Einsatzes von „Nano“. Zusätzlich wurde in zwei Fragen noch allgemeines Feedback hinsichtlich der Struktur der Unterrichtseinheit eingeholt. Den Abschluss bildet eine Multiple-Choice-Frage zur Einschätzung der eigenen Kenntnisse zu diesem Themengebiet.

---

#### **Fachliche Inhalte, gesellschaftliche Bezüge, Bewertung**

---

1. Beschreibe möglichst genau, welche Größenbereich die Nanodimension umfasst.

2. Formuliere bitte, was du dir unter „Nano“ vorstellst. Fertige gegebenenfalls zusätzlich eine Zeichnung an.
3. Ordne die folgenden Objekte der Größe nach, beginnend beim Kleinsten: Elektron, Nanopartikel, Haar, Atom, Haselnuss.
4. Nenne und erläutere Möglichkeiten, wie Nanomaterialien hergestellt werden können. Führe – wenn möglich – auch konkrete Beispiele an.
5. Nenne verschiedene Nanomaterialien und/oder verschiedene Bereiche, in denen diese Nanomaterialien eingesetzt werden. Beschreibe nach Möglichkeit ihre Funktion.
6. Beurteile den zunehmenden Einsatz von Nanotechnologie und Nanomaterialien.
7. Das Wichtigste, was ich zum Thema „Nano“ gelernt habe, ist ...

### Allgemeines Feedback zur Unterrichtseinheit

8. Worüber hättest du gerne mehr erfahren?
9. Was hat dir an der Unterrichtseinheit gut gefallen? / nicht so gut gefallen?

### Einschätzung der eigenen Kenntnisse

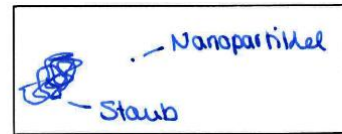
10. Wie schätzt du deine Kenntnisse zu „Nano“ ein? (Antwortmöglichkeiten: sehr viele, viele, wenige, keine).

Der Fragebogen wurde vor Beginn der Unterrichtseinheit sowie (in veränderter Reihenfolge der Items) im Anschluss an die Unterrichtseinheit durchgeführt (Pre-/Post-Test-Design). Eine Kopie des gesamten Fragebogens befindet sich im Anhang (A3.6, A3.7). Tabelle 16 gibt einen Überblick über die wichtigsten Antworten und zugehörige Schülerzitate.

Tabelle 16 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.

Ergebnis / Auswertung	SchülerInnenzitate
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unverändert geben alle SuS an, dass es sich um etwas „Kleines“ bzw. „sehr Kleines“ handelt. Im Vergleich zum Pre-Test sind die Antworten aber differenzierter und präziser; Nennungen umfassen öfter die korrekte Größendimension, Definition. Etwa 30 % nennen charakteristische Eigenschaften von „Nano“, wie etwa das hohe Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis und Reaktivität. Insgesamt sind die Vorstellungen tendenziell als fachlich richtiger einzustufen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>„Sehr kleine Teilchen, die aufgrund ihrer Oberfläche besonders reaktiv sind und so veränderte Eigenschaften gegenüber größeren Atomen haben.“</i>  <i>Sehr reaktive Teilchen (1-100 nm), die aufgrund ihrer vielen Oberflächenatome und ihres energetisch erhöhten Zustands (viele ungesättigte koordinative Bindungen) sehr reaktiv sind und andere Eigenschaften aufweisen, als größere Vertreter ihres Stoffes.“</i></li> </ul>

- In 50 % der Zeichnungen wurde ein Vergleich zwischen Nanopartikeln und einem Objekt auf der makroskopischen Ebene dargestellt, analog zu der REM-Aufnahme. Einige wenige Zeichnungen zeigen allerdings Fehlvorstellungen in Bezug auf die Größendimension („Nano“ kleiner als Atome dargestellt).
- 57 % der SuS konnten die Aufgabe lösen. Dies stellt zwar eine knappe Verbesserung zum Pre-Test dar (+7 %), bleibt aber hinter den Ansprüchen zurück.
- Hinsichtlich der Herstellungsmethoden konnten 74 % der SuS die Top-Down- sowie Bottom-Up-Synthesestrategien anführen und beschreiben. Auch zu den Eigenschaften von Nanomaterialien konnte eine große Bandbreite genannt werden, vom Lotos-Effekt über die photokatalytische Aktivität bis hin zur antibakteriellen Wirkung. Entsprechend zahlreich waren auch die genannten Anwendungsmöglichkeiten sowie die zugehörigen Bereiche. Die häufigsten Nennungen fanden sich im Bereich den Bereichen Kosmetika, Medizin und Textilien.
- Die Bewertung des Einsatzes von Nanomaterialien im Post-Test zeigt eine deutlich reflektiertere Betrachtung der Fragestellung. Viele Teilnehmenden heben zwar einerseits das große Potenzial und die Effizienz der Technologie hervor (52 %), viele betonen allerdings auch umweltgefährdende Aspekte (17 %) sowie den Bedarf nach weiterer Forschung auf diesem Gebiet (26 %). 13 % beurteilen Nanotechnologie als riskant, insbesondere im Zusammenhang mit sensiblen Einsatzgebieten wie Nahrung, Kosmetika und Medizin. Bei nahezu allen SuS ist eine differenzierte Betrachtung im Vergleich zum Pre-Test zu erkennen.
- Als wichtigste Erkenntnis wurden von 40 % der SuS die vielen Einsatzgebiete und die Vielseitigkeit von „Nano“ aufgeführt. Mehrere Nennungen beziehen sich darüber hinaus auf spezielle Phänomene, wie die Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln (26 %), oder wesentliche Charakteristika von Nanotechnologie, wie etwa die vergrößerte Reaktivität und Oberfläche (17 %).



- *Bottom-Up: Aus Kleinstteilchen (Atomen) werden die Nanopartikel gebildet. Meist chemisch-physikalisch, bspw. durch Fällungsreaktionen / Synthese. Top-Down: Ein großer Stoff wird zu Nanostoffen verkleinert, meist mechanisch-physikalisch, bspw. Zermahlen von Stoffen.“*

*„Fensterscheiben, sodass Wassertropfen und Dreck abperlen -> selbstreinigende Oberflächen. Farben, Sonnencreme, Funktionskleidung“*

- *„Grundsätzlich finde ich den Einsatz von Nanotechnologie und Nanomaterialien gut, da man so effektive Wege findet bzw. gefunden hat, Wasser abzuweisen oder sich vor UV-Strahlung zu schützen. Jedoch denke ich, dass man bei manchen Verwendungszwecken etwas verbessern muss, da Nanopartikel auch schädlich für die Gesundheit sein können.“*

*„Nanopartikel bieten viele neue Möglichkeiten, allerdings sind ihre Auswirkungen auf Umwelt und Menschen meist noch nicht ganz geklärt. Dadurch ist ihr Einsatz eher riskant.“*

- *„... dass Nanomaterialien für unglaublich viele Zwecke benutzt werden können, also sehr vielseitig sind und durch ihren großen Oberflächenanteil sehr reaktiv sind.“*

*„Dass Nanotechnologie in mehr Bereichen verwendet wird, als ich vor der Unterrichtseinheit wusste.“*

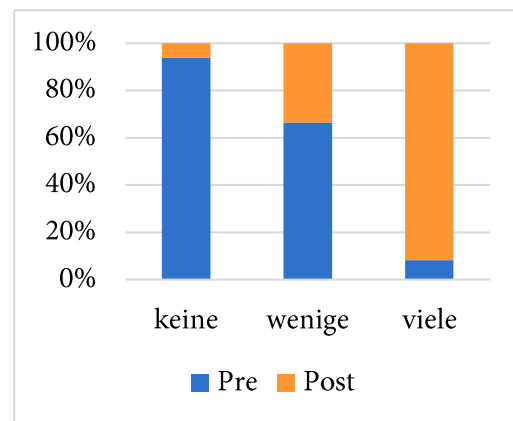
35 % nennen hier auch die Gefahren, die der Einsatz von „Nano“ birgt.

- Hinsichtlich weiterer Interessen über die Unterrichtseinheit hinaus wurde ein breites Spektrum an Wünschen genannt. Die Einzelnennungen umfassen etwa Einzelnennungen zu Kontexten wie Ernährung, Naturschutz, Leichtbau mit Nanomaterialien, Alternativen zur Nanotechnologie.
- Ein großer Teil der SuS schätzen ihre Kenntnisse höher ein, als vor der Unterrichtseinheit. Nachdem im Pre-Test 72 % der SuS angaben, „keine Kenntnisse“ zu „Nano“ zu besitzen, gaben nun 82 % an, „viele Kenntnisse“ zu besitzen.

*„Dass schon in sehr vielen Produkten, ohne, dass wir es wissen, nanopartikel verwendet werden und diese ungewisse Reaktionen im Körper auslösen können.“*

*„Das ist ein cooles und interessantes Thema. Es hätte Spaß gemacht, damit zu arbeiten, also darüber mehr herauszufinden. Nicht nur über die Vorteile, sondern auch über die Risiken.“*

*„Über Nanopartikel in einzelnen Produkten und was sie anrichten ,können““.*



## Reflexion der Unterrichtseinheit

Die gemeinsame Reflexion fokussierte insbesondere den Einsatz des eingangs vorgestellten Schülerskriptes, welcher sowohl von SuS als auch Lehrkräften als positiv wahrgenommen wurde. Positiv aufgefallen ist die hohe Aktivität der SuS, auch im Zusammenhang mit der sozialen Interaktion in der jeweiligen gemeinsamen Lerngruppe. Die Lehrkräfte hoben hierbei den Wert der gestuften Lernhilfen (Informationskarten) hervor, die vielen SuS die eigenständige Erarbeitung vieler Inhalte ermöglicht hat. Zudem war die Binnendifferenzierung der Texte und Aufgaben wichtig, um leistungsschwache und –starke SuS gleichermaßen zu fördern und fordern.

Kritisch angemerkt wurden die teilweise langen Texte im Schülerskript, die der Motivation abträglich waren – insbesondere in Kombination mit dem anschließenden WebQuest, welches ebenfalls relativ ausführliche Informationstexte enthält. Diesem Feedback soll dahingehend begegnet werden, als dass einerseits bei der Überarbeitung des WebQuests kompaktere Quellen ausgewählt wurden. Andererseits wurden im Skript weniger zentrale Inhalte gekürzt, bzw. als optional gekennzeichnet. Dies betrifft etwa detailliertere Informationen zu Synthesestrategien sowie Abschnitte zur Stabilisierung von Nanomaterialien. Somit stehen sie interessierten SuS weiterhin zur Verfügung, belasten aber die restliche Gruppe nicht weiter. Zudem können an

ausgewählten Stellen andere Unterrichtsmethoden (nicht zuletzt das „klassische“ Unterrichtsgespräch) in Betracht gezogen werden, um die Arbeit für die SuS abwechslungsreicher zu gestalten.

Von der Perspektive der Lehrkräfte wurde die Arbeit mit dem Schülerskript als positiv bewertet, insbesondere im Hinblick auf die Vermittlung des Themengebietes „Nano“ im eigenen Unterricht. Die bereitgestellten Materialien und die Vorstrukturierung bieten eine Orientierung und senken somit die Hürden, Inhalte im eigenen Unterricht aufzugreifen. Nach dem „Einstieg“ waren beide Lehrkräfte bereit, auf Grundlage des Skripts zukünftige Unterrichtsstunden und –einheiten eigenständig zu gestalten und durchzuführen.

#### **7.1.2.5 Anbindung an das Curriculum**

In Tabelle 17 werden die behandelten Nano-Inhalte dieses Projektes sowie ihre Anbindungen an das niedersächsische Kerncurriculum<sup>[44]</sup> im Überblick dargestellt.

Tabelle 17 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 2.

## Projekt 2: Zinkoxid-Nanopartikel: Fluoreszierend, Faszinierend, Innovierend

Nano-Inhalte	Curriculare Anbindung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interdisziplinarität und Bedeutung von Nanotechnologie</li> <li>• Größendimension von Nanomaterialien</li> <li>• Charakteristische Eigenschaften: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis</li> <li>• Bottom-Up-Synthese und Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln</li> <li>• Optional: Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln mit verschiedenfarbiger Fluoreszenz</li> <li>• Zinkoxid-Nanopartikel als UV-Lichtdetektor</li> <li>• Photokatalytische Aktivität: Nachweis von Hydroxylradikalen</li> <li>• Photokatalytische Zersetzung eines organischen Farbstoffes</li> <li>• Wirkung von Zinkoxid-Nanopartikeln auf pflanzliche Zellen</li> <li>• Bewertung des Einsatzes von Nanopartikeln in diversen Anwendungsbereichen im WebQuest</li> </ul>	<p>Die SuS ...</p> <p><b>Fachwissen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben die Beeinflussbarkeit chemischer Reaktionen durch den Einsatz von Katalysatoren.</li> </ul> <p><b>Erkenntnisgewinnung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• planen Experimente zur Ermittlung von Stoffeigenschaften und führen diese durch.</li> <li>• nutzen geeignete Modelle zur Veranschaulichung von Reaktionsmechanismen.</li> </ul> <p><b>Kommunikation:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• diskutieren die Grenzen und Möglichkeiten von Modellen.</li> <li>• nutzen und beurteilen Informationsquellen.</li> <li>• gestalten und beurteilen Präsentationen.</li> <li>• recherchieren zu technischen Verfahren in unterschiedlichen Quellen, wählen aussagekräftige Informationen aus und präsentieren ihre Ergebnisse.</li> </ul> <p><b>Bewerten:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• reflektieren die Bedeutung technischer Verfahren unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit, Gesundheit und Umweltverträglichkeit.</li> <li>• erkennen und beschreiben die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung von Stoffen in ihrer Lebenswelt.</li> <li>• beurteilen den Einsatz von Katalysatoren in technischen Prozessen.</li> </ul>

### 7.1.3 Projekt 3: Von der Sonnencreme zur Solarzelle – Ein Schule-Hochschule-Projekt<sup>23</sup>

#### 7.1.3.1 Ziele und Beschreibung des Projektes

Wie bereits in Kap. 7.1.1 vorgestellt, gehören Titandioxid-Nanopartikel zu den prominentesten und meistverwendeten Nanomaterialien in unserer Lebenswelt. Darüber hinaus (oder gerade deswegen) gehören sie aber sicherlich auch zu den umstrittensten Nanomaterialien, was am Beispiel des Einsatzes von Titandioxid-Nanopartikeln als mineralischer UV-Schutz in Sonnencremes in zahlreichen Beiträgen in Online- und Printmedien widergespiegelt wird<sup>[296]</sup>.

Die grundlegende Idee des vorliegenden Projektes ist es daher, dieses Interesse aufzugreifen und zu vertiefen, indem SuS zunächst Nanomaterialien aus Alltagsgegenständen isolieren, nachweisen sowie ihre Eigenschaften experimentell erschließen (LL2). Darüber hinaus sollen die vielfältigen Forschungsaktivitäten im Bereich der Nanowissenschaften stärker als in Kap. 6.1.1 fokussiert werden, was beispielsweise durch den Besuch einer Hochschuleinrichtung oder eines (Schüler-)Labors umgesetzt werden kann. Hierdurch ergeben sich gleich mehrere Synergie-Effekte; SuS können nicht nur Einblick in wissenschaftliche Arbeitsweisen und Berufsperspektiven erhalten, sondern darüber hinaus auch geeignete Charakterisierungsmethoden zur Untersuchung von Nanomaterialien in authentischen Umgebungen kennenlernen (LL3, LL6). Hierdurch kann nicht nur das allgemeine Verständnis von Wissenschaft gestärkt werden<sup>[297]</sup>, sondern – insbesondere bei Verfahren mit bildgebenden Methoden, wie bspw. einem Rasterelektronenmikroskop – vor allem auch das Verständnis der behandelten Größendimension sowie Morphologien von Nanomaterialien (LL3, LL4). Abschließend bieten Experimente die Möglichkeit, die Eigenschaften der isolierten Nanomaterialien zu erschließen.

Die speziellen Lernziele des vorliegenden Projektes lauten:

1. Die SuS beschreiben Nanotechnologie als interdisziplinäres Forschungsfeld mit großer Bedeutung für Alltag, Wirt- und Wissenschaft (LL1, LL2).
2. Die SuS entwickeln ein genaueres Verständnis für die „Nanodimension“ und ordnen Nanomaterialien korrekt in eine Größenskala ein (LL3).
3. Die SuS beschreiben das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis als charakteristische Eigenschaft von Nanomaterialien (LL4).
4. Die SuS nennen mehrere Nanomaterialien in ihrer Lebenswelt (LL2, LL8).
5. Die SuS erläutern den Einsatz von Nanomaterialien als UV-Filter (LL2, LL7).
6. Die SuS planen und führen Experimente zu Isolation und Nachweis von Titandioxid-Nanopartikel durch (LL5, LL6), und ...
7. analysieren diese Nanopartikel im Rahmen eines Hochschulbesuchs mit wissenschaftlichen Charakterisierungsmethoden (LL6) und ...
8. ermitteln weitere Anwendungsbereiche für den Einsatz dieses Materials, was am Beispiel des Baus einer Solarzelle umgesetzt werden kann (LL7, LL8).

---

<sup>23</sup> Die Inhalte von Projekt 3 (Kap. 7.1.3) wurden vom Autor zusätzlich in der Fachzeitschrift PRAXIS DER NATURWISSENSCHAFTEN – CHEMIE IN DER SCHULE<sup>[239]</sup> veröffentlicht. Mit freundlicher Genehmigung des Verlags (siehe Anhang A4.3) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

### 7.1.3.2 *Didaktisch-Methodische Überlegungen und Ablauf des Unterrichtsprojektes*

Der Einstieg in die Thematik erfolgt im Chemieunterricht über Möglichkeiten zum Schutz vor Sonnenbrand. Hierbei können die SuS zunächst über ihre Erfahrungen berichten, wobei das Thema Sonnencreme erfahrungsgemäß schnell in den Fokus der Diskussion rückt. In diesem Zusammenhang wird der Frage nach dessen Funktionsweise im Rahmen einer Online-Recherche nachgegangen, wobei auch Gründe für den Einsatz von Titandioxid in nanoskaliger Größe aufgegriffen werden; hierzu finden sich zahlreiche Quellen<sup>[298]</sup>. Als wesentliche Argumente werden von den SuS herausgearbeitet, dass die früher genutzten Titandioxid- und Zinkoxid-Partikel mit Korngrößen im Mikrometerbereich meist relativ zähe Pasten bilden, die auf der Haut einen weißen Film hinterlassen. Im Vergleich dazu erzeugen die heute verwendeten nanoskaligen Partikel einen transparenten Schutzfilm und bieten insbesondere durch die bessere, gleichmäßigere Verteilung auf der Haut eine zusätzlich gesteigerte UV-Schutzwirkung. Bei dieser Suche werden die SuS unweigerlich mit Fragen nach Risiken zur Verwendung von Sonnencreme konfrontiert. Diese umfassen Kontroversen über verschiedene UV-Filter, so beispielsweise zur endokrinen und allergenen Wirkung organischer Systeme oder zum zellschädigenden Potenzial dieser mineralischen Nanopartikel<sup>[299]</sup>. Auch diesen Kontroversen wird nachgegangen (LL9), wobei die SuS Kriterien zur Beurteilung des Gefahrenpotenzials zusammenstellen. Diese Aspekte werden von den SuS präsentiert und im Unterrichtsgespräch thematisiert. Hierbei wird abschließend festgehalten, dass Partikelgrößen unter 10 nm als besonders kritisch beurteilt werden (Diffusion durch Zellmembran, Überwindung der Blut-Hirn-Schranke etc.)<sup>[300]</sup>.

Im nächsten Unterrichtsabschnitt untersuchen die SuS vorzugsweise selbst mitgebrachte Sonnencremes auf die Art des verwendeten UV-Filters. Hierzu sollen sie zunächst anhand der ihnen bekannten Eigenschaften von organischen und anorganischen Materialien eine geeignete Methode entwickeln bzw. kennenlernen, mit der sie im Chemieunterricht beide Filtersysteme (organisch / mineralisch) voneinander unterscheiden können. Je nach Leistungsstärke der Klasse und zeitlichem Rahmen kann dies entweder eigenständig erarbeitet oder anderenfalls die Kalzinierung von der Lehrkraft, wie in Experiment 1.1 beschrieben, vorgegeben werden. Im Falle eines organischen UV-Filters kann hierbei kein oder nur ein sehr geringer Rückstand festgestellt werden, der etwa auf Magnesium- bzw. Natriumsalze zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu werden im Falle eines mineralischen Filters abhängig vom Lichtschutzfaktor größere Mengen eines Pulvers erhalten, welches entweder Zinkoxid- oder Titandioxid-Nanopartikel beinhaltet. Die vorhandenen Partikel werden von den SuS indirekt auf nasschemischem Wege über die entsprechenden Kationen nachgewiesen (Experimente 1.2 und 3.1).

Da die Größe der erhaltenen Partikel mit schulischer Ausstattung nicht weiter ermittelbar ist, kann zu diesem Zeitpunkt noch keine Aussage zum Gefahrenpotenzial getroffen werden. Um diese Frage beantworten zu können – insbesondere im Hinblick auf das in der Recherche ermittelte Gefahrenpotenzial –, wird eine Exkursion zu einer Forschungsreinrichtung (Universität Göttingen) durchgeführt, die über ein Rasterelektronenmikroskop (REM) und/oder ein Röntgenpulverdiffraktometer (P-XRD) verfügt. Mithilfe beider Methoden können die von den SuS isolierten Partikel einfach auf ihre Größe hin untersucht werden (LL3, LL6). Dabei bietet die Arbeit mit den Daten der selbst gewonnenen Proben erfahrungsgemäß gute Chancen, die



SuS für den Besuch besonders zu motivieren und die entsprechenden Methoden kennenzulernen. Neben der Bestimmung der Partikelgrößen (Experimente 3.2, 3.3) werden weiterhin Daten hinsichtlich der Zusammensetzung bzw. Reinheit der Probe mit weiteren Methoden (energie-dispersive Röntgenstrahlung – EDX) erhoben (Experiment 3.4). An dieser Stelle ist allerdings mit den Mitarbeitern abzusprechen, inwiefern diese Methoden im Unterricht vorbereitet werden müssen. Gerade die Grundlagen der P-XRD sind zum Teil sehr anspruchsvoll, sodass das Analyseverfahren nur als Fingerprint-Methode behandelt wurde. Zur Beantwortung der eingangs gestellten Frage nach der Partikelgröße reicht es folglich aus, wenn die SuS hierbei erfahren, wie sich letztere aus dem erhaltenen Diffraktogramm ableiten lässt. Sowohl aus dem Diffraktogramm des P-XRD als auch aus der REM-Aufnahme können die SuS folgern, dass die verwendeten Titandioxid-Nanopartikel im Mittel deutlich größer als 10 nm und damit als ungefährlich einzustufen sind. Sollte ein Besuch der Forschungseinrichtung nicht möglich sein, können Beispiel-Daten (siehe Anhang A3.8) als Alternative genutzt werden. Abschließend lernen die SuS über den Bau einer Solarzelle (Experimente 3.5) weitere Anwendungen des Materials kennen (LL7, LL8) und führen ein WebQuest zum verantwortungsvollen Einsatz von Nanomaterialien durch (LL9).

Abbildung 70 zeigt die Struktur sowie ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.

1   Einführungsseminar	2   Experimenteller Abschnitt	3   WebQuest
"Nano" in Wissenschaft und Alltag Einstieg über das Herstellen von Alltagsbe- zügen, interdisziplinärer Charakter, heutige & zukünftige Bedeutung in Alltag, Wissen- schaft und Industrie.	1.1 Isolierung des mineralischen Filters aus Sonnencreme und anderen Alltagsgegenständen	MindMap / Flussdiagramm ✱ Strukturierung und Sicherung der Erken- ntnisse wahlweise in einer MindMap bzw. ConceptMap oder in einem Flussdiagramm.
"Nano"-Grundlagen Größendimension, Definition, Morpholo- gien von Nanomaterialien, besondere Ei- gschaften	1.2 Indirekter Nachweis von Titan-Ionen als Titan-peroxo-Komplex	WebQuest zur Bewertung des Einsatzes verschiedener Nanomaterialien in diversen Kontexten (Nahrung, Industrie, Kosmetik, ...)
Größendimension Vergleich der "Nano"-Ebene und makros- kopischer Ebene über eine REM-Aufnahme	3.1 Indirekter Nachweis von Zink-Ionen als Zinkhexacyanidoferrat(III)	Ergebnissicherung Erstellen und Präsentieren des Handouts
Charakteristische Eigenschaften "Nanocubes"-Experiment, Oberfläche-zu- Volumen-Verhältnis	3.2 Partikelgrößenbestimmung: P-XRD	Abschluss Expertendiskussion zu Nanotechnologie
	3.3 Partikelgrößenbestimmung: REM	
	3.4 Reinheitsbestimmung: EDX	
	3.5 Bau einer Farbstoffsolarzelle mit Titandioxid-Nanopartikeln	

Abbildung 70 - Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.

### 7.1.3.3 Experimente an der Schule zu Isolation und Nachweis des mineralischen UV-Filterns in Sonnencreme

Die experimentelle Phase dieses Projektes beginnt mit der Untersuchung von Sonnencremes auf ihren UV-Filter; die Isolation von mineralischen Filtern und der indirekte Nachweis von Titan-Ionen wurden bereits im ersten Unterrichtsprojekt beschrieben (Experimente 1.1 und 1.2) und können an dieser Stelle analog durchgeführt werden. Da einige Sonnencremes Zinkoxid-Nanopartikel anstelle von Titandioxid verwenden, wird in Experiment 3.1 ebenfalls ein entsprechender Nachweis für den unterrichtlichen Einsatz vorgestellt.

### Experiment 3.1: Indirekter Nachweis von Zinkoxid aus Sonnencreme

*Geräte und Chemikalien:* Filtrat aus der Isolation von Experiment 1.1 („Isolierung von Nanopartikeln aus Sonnencreme“), rotes Blutlaugensalz (Kaliumhexacyanidoferrat(III)), Natriumacetat, 2 Reagenzgläser, demineralisiertes Wasser.

*Versuchsdurchführung:* In einem Reagenzglas werden je eine kleine Spatelspitze Natriumacetat und rotes Blutlaugensalz in 2 mL demineralisiertem Wasser gelöst und daraufhin dem Filtrat aus Experiment 1.1 hinzugegeben.

*Beobachtung:* Nach Zugabe der Natriumacetat-/Kaliumhexacyanidoferrat(III)-Lösung bildet sich ein gelb-brauner Niederschlag (siehe Abbildung 71).

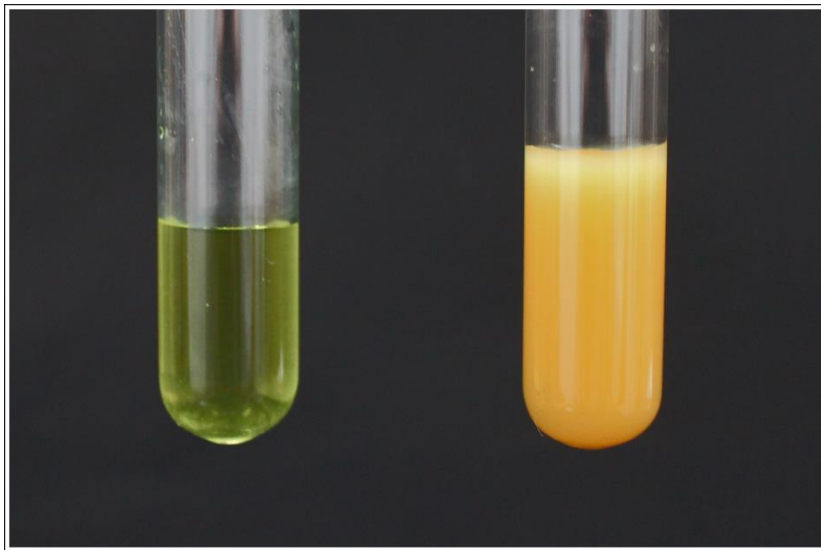
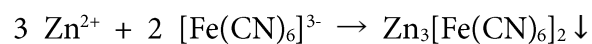


Abbildung 71 – Nachweis von Zink-Ionen: Kaliumhexacyanidoferrat(III)-Lösung (links) und gelb-brauner Zinkhexacyanidoferrat(III)-Komplex (rechts).

*Auswertung:* Beim Waschen des kalzinierten Produktes in Versuch 1.1 löst sich Zinkoxid in verdünnter Salzsäure unter Bildung von Zink-Ionen. Diese bilden mit Kaliumhexacyanidoferrat(III) den wasserunlöslichen, gelbbraunen Zinkhexacyanidoferrat(III)-Komplex, was mit folgender Reaktionsgleichung beschrieben werden kann:



*Hinweis:* Da in Deutschland heute nahezu keine Zinkoxid-Nanopartikel als UV-Schutz in Sonnencreme verwendet werden, fällt dieser Nachweis in den allermeisten Fällen negativ aus. Entsprechend wird zum Vergleich eine positive Blindprobe von den SuS durchgeführt. Zusätzlich kann bei Bedarf natürlich ebenfalls eine positive und negative Blindprobe für den Nachweis von Titan-Ionen durchgeführt werden.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* Durch den nasschemischen Nachweis können die SuS auf einfache Weise feststellen, welchen mineralischen UV-Filter sie in ihrer eigenen Sonnencreme verwenden – in den allermeisten Fällen handelt es sich dabei in Europa um Titandioxid. In der eingangs durchgeführten Internet-Recherche erfahren SuS hierzu, dass dessen Einsatz in

nanopartikulärer Form kontrovers diskutiert wird; in offiziellen Stellungnahmen der EU weisen Partikel mit einem Durchmesser kleiner als 10 nm weisen ein bisher ungeklärtes Gefahrenpotenzial auf. Unter diesem Eindruck entwickeln SuS die Fragestellung nach der Partikelgröße des Filtermaterials, welches in ihrer Sonnencreme eingesetzt wird. Auf Nachfrage bei dem Hersteller nach der Partikelgröße (in diesem Fall den DM-DROGERIE MARKT GMBH & CO. KG) wurde folgendes Statement erhalten:

*„Die Definition der Nanopartikel leitet sich aus der internationalen Norm ISO TS 27687 ab. Gemäß dieser Definition handelt es sich dann um Nanopartikel, wenn die Kristallgröße der Primärpartikel in allen drei räumlichen Dimensionen im Größenbereich zwischen 1 - 100 Nanometer liegt.*

*Somit ist im Markt zum derzeitigen Zeitpunkt kein Titandioxid verfügbar, welches nicht unter diese Definition fällt.*

*Unabhängig davon liegen in den kosmetischen Fertigerzeugnissen die Teilchen auch nicht mehr komplett als Primärpartikel vor, sondern bilden so genannte Agglomerate. Dabei handelt es sich um Zusammenballungen von Teilchen, die in der Regel größer als die für Nanopartikel geltenden 100 Nanometer sind. Trotz dieser größeren Agglomerate in Fertigerzeugnis handelt es sich nach Definition des Gesetzgebers trotzdem um Nanopartikel.*

*Mit den herkömmlichen Partikelgrößenmessungen werden die drei räumlichen Dimensionen der Primärpartikel nicht hinreichend erfasst. Außerdem ist das Ergebnis der Partikelgrößenmessung abhängig von der verwendeten Methodik. Da es hierzu keine einheitliche und allgemein anerkannte Testmethode gibt.*

*Zu Titandioxid liegen umfangreiche Daten vor, die deren sichere Anwendung in kosmetischen Mitteln belegen. Insbesondere die Sicherheit von Titandioxid als Lichtschutzfilter wurde bereits im Jahre 2000 in einer detaillierten Stellungnahme des wissenschaftlichen Beratergremiums der Europäischen Kommission bestätigt. Im Rahmen dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die Teilchen nicht in die Haut eindringen. Dies konnte für Titandioxid durch aktuelle Studien aus den Jahren 2006 und 2007 nochmals untermauert werden. Die neusten Studien von Prof. Tilmann Butz von der Universität Leipzig haben im Rahmen des staatlich geförderten Nanoderm-Projektes ebenfalls nochmals bewiesen, dass Titandioxid nicht in die intakte Haut eindringt.*

*Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass auf Basis der vielen vorliegenden wissenschaftlichen Studien der Gebrauch von Titandioxid in Sonnenschutzmitteln sicher ist. Hinzu kommt der unbestrittene Nutzen dieses mineralischen Lichtschutzfilters zur Vermeidung vielfältiger lichtbedingter Hautschäden bis hin zum Hautkrebs. Die Sicherheit und die hervorragende Verträglichkeit des Lichtschutzfilters Titandioxid wird nicht zuletzt durch seine Unauffälligkeit in der langjährigen Marktbeobachtung dokumentiert.“*

Diese sehr ausführliche Antwort bringt erstens keine Klarheit, welche Partikelgröße verwendet wird und lässt zweitens die Vermutung zu, dass DM sehr bemüht ist, Verbraucherängste oder eine öffentliche Diskussion (mit potenziell negativen wirtschaftlichen Folgen, siehe JACK WOLF-SKIN oben) zu vermeiden. Die Diskussion dieser Antwort und der dahinterliegenden Intention bietet Lerngelegenheiten, um die im Kerncurriculum betonte Bedeutung einer naturwissenschaftlichen Grundbildung für eine aktive Teilhabe an gesellschaftlicher Kommunikation und Meinungsbildung hervorzuheben <sup>[44]</sup>.

*Aufgabe 1: Die Antwort der Firma dm auf die Frage, in welcher Größe die Partikel in der Sonnencreme verarbeitet sind, ist ziemlich lang geworden. Diskutieren Sie, welche Intention der Hersteller mit dieser Antwort verfolgen könnte.*

#### 7.1.3.4 Untersuchung der Titandioxid-Nanopartikel an einer Forschungseinrichtung

Im Anschluss an die Isolierung und den Nachweis des mineralischen Filters verbleibt bei den SuS nach wie vor die Frage ungeklärt, welche Partikelgröße die entsprechenden Materialien nun besitzen. Die in der eingangs durchgeführten Online-Recherche ermittelten Gefahrenpotenziale sind den SuS hierbei noch vor Augen und stehen nun dem diskutierten Statement von DM sowie anderen Quellen gegenüber, die eine Unbedenklichkeit bescheinigen. Welche Größe besitzen die eingesetzten Partikel nun? Diese Frage soll anhand der Untersuchung der eigenen Partikel geklärt werden.

Die folgenden Experimente erfolgen in Kooperation mit Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Mithilfe der wissenschaftlichen Charakterisierungsmethoden P-XRD und REM können die SuS dort die Partikelgröße bestimmen und darüber hinaus – je nach Lerngruppe – mit EDX auch die Zusammensetzung bzw. Reinheit ihrer Probe überprüfen (LL6).

#### Experiment 3.2: Bestimmung der Partikelgrößen mittels P-XRD

Zur Bestimmung der Partikelgröße werden die in Experiment 1.1 isolierten Titandioxid-Nanopartikel mithilfe eines Röntgendiffraktometers untersucht. Bei der Pulverröntgendiffraktometrie wird eine Probe mit monochromatischer Röntgenstrahlung aus unterschiedlichen Winkeln beschossen. An den auf atomarer Ebene geordneten Strukturen der Partikel (Kristallite) wird die Röntgenstrahlung dabei durch Beugung und Interferenz verstärkt bzw. ausgelöscht. Mithilfe eines Detektors werden Beugungsbilder, sogenannte Diffraktogramme, aufgezeichnet. Diese Diffraktogramme sind spezifisch für jedes kristalline Material, sodass zunächst über den Vergleich mit einer bekannten Titandioxid-Referenzprobe das Produkt nochmals eindeutig identifiziert werden kann (Fingerprint-Methode, siehe Abbildung 72 mitte). Mithilfe der sog. Scherrer-Gleichung lässt sich über die Lage sowie die Halbwertsbreite eines intensiven Reflexes (siehe Abbildung 72, rechts) die Kristallitgröße  $L$  leicht ermitteln.

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{\Delta(2\theta) \cdot \cos(\theta_0)}$$

mit  $L$  = Kristallitgröße,  $K$  = Scherrer-Formfaktor ( $\text{TiO}_2$ :  $\sim 1$ ),  $\lambda$  = Wellenlänge der Röntgenstrahlung,  $\Delta(2\theta)$  = Halbwertsbreite,  $\theta_0$  = Beugungswinkel.

In dem durchgeführten Unterrichtsprojekt wurden folgende Messwerte aufgenommen und die in Tabelle 18 aufgeführten Werte berechnet. Eine einfache und ausführliche Beschreibung (Arbeitsblatt) der Vorgehensweise zur Bestimmung der Halbwertsbreite findet sich im Anhang dieser Arbeit (A3.9).

Tabelle 18 – Röntgendaten von Titandioxid-Nanopartikeln aus Sonnencreme und einer Referenzprobe.

Probe	$\theta_0$ /Grad	$\Delta(2\theta)$ /Grad	$\Delta(2\theta)$ /Bogenmaß	L / nm
Rutil (Referenz)	13,80	0,18	0,0031	<b>50</b>
Sonnencreme	13,80	0,30	0,0052	<b>30</b>

Im Falle von Titandioxid entspricht die Kristallitgröße in guter Näherung auch der Partikelgröße, da es sich bei diesem Material normalerweise um einkristalline Nanopartikel handelt. Bei der Interpretation des Wertes können die SuS feststellen, dass die in Sonnencreme verwendeten Titandioxid-Nanopartikel größer als 10 nm und damit als ungefährlich einzustufen sind (LL9).

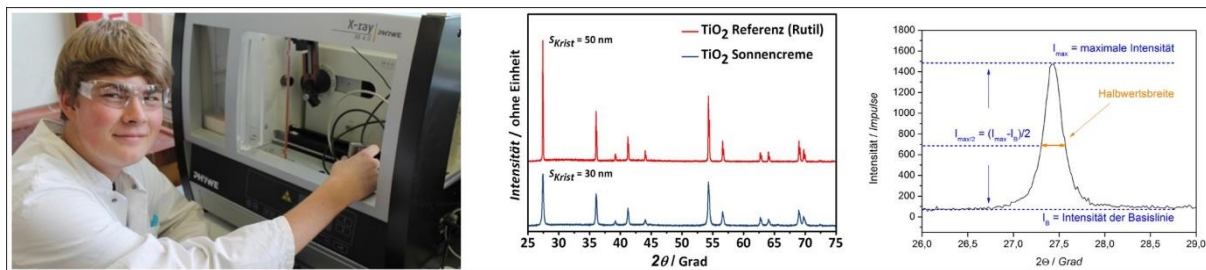


Abbildung 72 – Schüler während der Bedienung des Pulverdiffraktometers (links); Identifizierung des verwendeten mineralischen Filters über den Vergleich der untersuchten Probe mit einem Referenzdiffraktogramm (mitte); beispielhafte Bestimmung der Halbwertsbreite aus dem Arbeitsblatt (rechts).

### Experiment 3.3: Bestimmung der Partikelgröße mittels REM

Zur Bestimmung der Partikelgröße werden die in Experiment 1.1 isolierten Titandioxid-Nanopartikel darüber hinaus mithilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht. Die Rasterelektronenmikroskopie wird heutzutage als Standardverfahren zur Oberflächenanalyse von Festkörpern in vielen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Materialprüfungsanstalten routinemäßig eingesetzt. Hierbei wird ein durch magnetische Linsen fein gebündelter Elektronenstrahl in einem definierten Muster über eine Probe geführt (gerastert), wobei Wechselwirkungsprozesse mit der Probenoberfläche stattfinden. So können etwa aus der oberflächennahen Region des Materials sogenannte Sekundärelektronen emittiert werden, deren Energie vom Neigungswinkel des Elektronenstrahls zur Oberfläche abhängig ist. Diese Sekundärelektronen besitzen unterschiedliche Energien und können mithilfe eines entsprechenden Detektors registriert werden, sodass Informationen über die Topographie (Oberflächenprofil) der Probe erhalten und mit Hilfe eines Computers bildlich dargestellt werden<sup>[301]</sup>. In Absprache mit der Universität Göttingen wurden diese Grundlagen vor Ort mit der Lerngruppe besprochen.

Durch Ausmessen der Partikeldurchmesser auf rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und Vergleich mit dem Größenmaßstab kann die Partikelgröße bestimmt werden (siehe Abbildung 73). Der mittlere Partikeldurchmesser beträgt hierbei 30 nm, was durch die Vermessung von etwa 130 Partikeln ermittelt wurde. Dieser Wert stimmt somit gut mit der Partikelgröße überein, die mittels P-XRD-Messungen erhalten werden konnte.

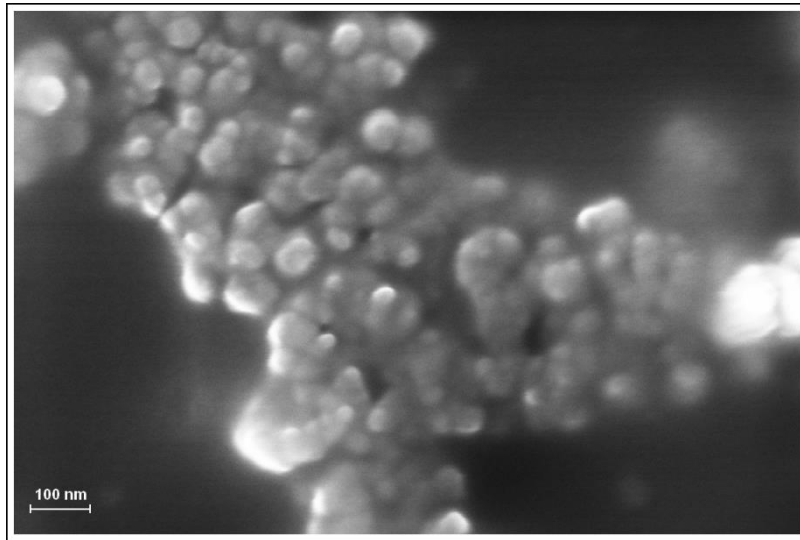


Abbildung 73 – REM-Aufnahmen der Titandioxid-Nanopartikel aus Sonnencreme. Mithilfe des Größenmaßstabs kann die Partikelgröße bestimmt werden.

#### Experiment 3.4: Untersuchung der Reinheit der Probe mittels EDX

Neben der topographischen Charakterisierung können die ausgelösten Wechselwirkungsprozesse bei der Rasterelektronenmikroskopie auch zur qualitativen und quantitativen Elementaranalyse einer Probe genutzt werden. Durch Beschuss mit einem hochenergetischen Elektronenstrahl werden Elektronen aus den inneren Schalen der Elemente herausgeschlagen und die so entstandenen Lücken anschließend von energiereicheren Elektronen aus höheren Orbitalen aufgefüllt, wobei die dabei freigesetzte Energie in Form von Röntgenquanten emittiert werden. Für jedes Element sind bestimmte Übergänge erlaubt, sodass jedes Element ein spezifisches Röntgenspektrum aufweist, das so genannte energiedispersive Röntgenspektrum (EDX) <sup>[301]</sup>. Neben der Partikelgröße können die SuS in diesem Experiment folglich auf einfache Weise die Zusammensetzung des in Versuch 1.1 erhaltenen mineralischen Filters ermitteln. Darüber hinaus überprüfen sie anhand der Messwerte die eingangs gestellte Hypothese, dass es sich bei dem durch Kalzinierung der Sonnencreme erhaltenen Rückstand zum allergrößten Teil um Titandioxid bzw. Zinkoxid handelt.

Nach Auswertung des erhaltenen Diagramms ergeben sich für die Zusammensetzung folgende Werte (siehe Tabelle 19):

Tabelle 19 – Exemplarische Messwerte der Zusammensetzung einer Beispielprobe aus Sonnencreme.

Element	Atom-%	Fehler der Atom-%
O	73,72	± 1,88
Ti	22,55	± 0,11
Al	2,25	± 0,05
Na	0,52	± 0,07
Mg	0,60	± 0,06
S	0,36	± 0,03

Es ist deutlich zu erkennen, dass in der Probe im Wesentlichen Titan und Sauerstoff enthalten sind, zusätzlich wurden Spuren von Natrium, Magnesium, Aluminium und Schwefel entdeckt. Dieser Befund kann bei der Auswertung dadurch gedeutet werden, dass weitere anorganische Inhaltsstoffe, wie etwa Natriumhydroxid, Magnesium- und Aluminiumsulfat, in geringen Mengen in Sonnencreme enthalten sind und bei der Verbrennung keine flüchtigen Produkte bilden. Somit können die SuS ihre eingangs aufgestellte Hypothese bestätigen. Zusätzlich zu den qualitativen, nasschemischen Nachweisen von Titan- und Zink-Ionen bietet diese Charakterisierungsmethode den SuS somit eine quantitative und aussagekräftige Ergänzung der Messwerte.

### Experiment 3.5: Bau einer Solarzelle mit Titandioxid-Nanopartikeln aus Sonnencreme

Nachdem die Fragen bezüglich der Partikelgröße der Probe beantwortet und dadurch das Gefährdungspotenzial beurteilt werden kann, bietet es sich an dieser Stelle an, weitere Eigenschaften und Anwendungsbereiche von Titandioxid-Nanopartikeln kennenzulernen (LL7, LL8). Hierzu existieren wie eingangs erwähnt zahlreiche Schulexperimente <sup>[243]</sup>, mit denen Bezüge, beispielsweise zu Umweltfragen hergestellt werden können, wie etwa die photokatalytische Zersetzung von Farbstoffen als Modellsubstanzen für umweltgefährdende Stoffe. Ein besonders geeigneter Versuch, welcher im schulischen Rahmen aufgrund des materiellen und apparativen Aufwandes selten durchgeführt werden kann, ist der Bau einer GRÄTZEL-Solarzelle. Dieser Versuch eröffnet den SuS einen experimentellen Zugang zu einer bedeutende Anwendungsmöglichkeit von Titandioxid-Nanopartikeln und wurde ob seines fachdidaktischen Potenzials bereits mehrfach in der Literatur beschrieben <sup>[190, 302-304]</sup>. In diesem Experiment wird er nun mit den isolierten Partikeln an der Universität Göttingen durchgeführt. Die Auswertung erfolgt dabei direkt im Anschluss mit Hilfe des folgenden vereinfachten Modells (siehe Abbildung 74).

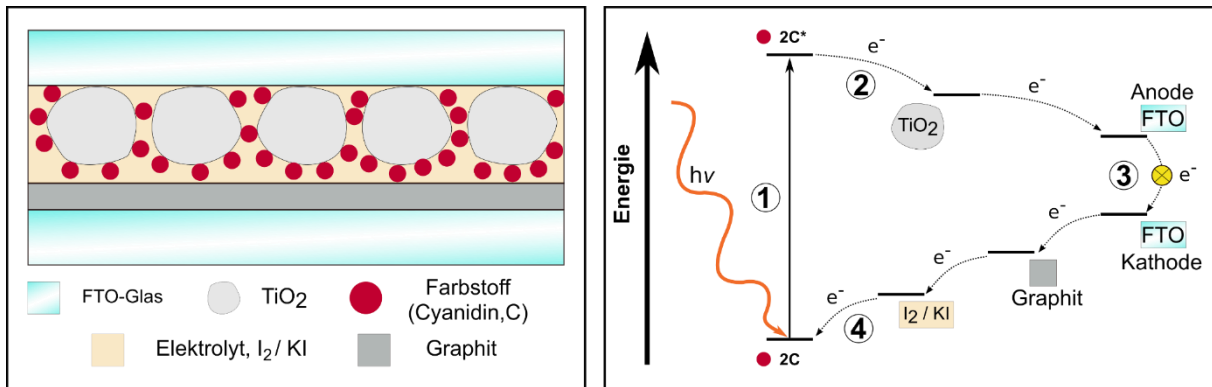


Abbildung 74 – Schematische Darstellung der ablaufenden Prozesse während der Energieumwandlung (modifiziertes Modell nach O'REGAN und GRÄTZEL<sup>[190]</sup>).

Das Experiment eröffnet vielfältige Kontexte und Lerngelegenheiten für SuS und knüpft an fachliche Vorkenntnisse aus dem Chemieunterricht, wie etwa Redoxreaktionen, an. Im Anschluss an den Bau und die Erarbeitung der Funktionsweise wurden mit den vor Ort tätigen Forschenden weitere thematische Anwendungen von Titandioxid-Nanopartikeln diskutiert, unter anderem die Rolle von Titandioxid-Nanopartikeln in der anwendungsorientierten Forschung am Beispiel der Beschichtungen zur Luftreinigung (siehe Kap. 7.1.1.3).

### Bewertung und Ergebnissicherung

An die Auswertung der Exkursion und der Experimente schließt sich die Reflexion des Projektes, die Bewertung des Einsatzes von Nanomaterialien und die Ergebnissicherung an – im vorliegenden Projekt erfolgt dies durch die Erstellung einer MindMap zum Unterrichtsverlauf „Von der Sonnencreme zur Solarzelle“, wodurch die SuS die behandelten Konzepte und Inhalte strukturiert und verknüpfen können.

Aufgrund der positiven Erfahrung der bereits beschriebenen Unterrichtsprojekte mit WebQuests wird diese Methode auch in dieser Lerngruppe erneut durchgeführt; als unterrichtlicher Anschluss dient hierbei die eingangs aufgeworfene Fragestellung nach dem Gefahrenpotenzial von Nanomaterialien in Alltagsmaterialien; für Titandioxid in Sonnencreme konnte diese Frage anhand der Messergebnisse beantwortet werden. Aber kann hieraus geschlossen werden, dass alle Nanomaterialien nun sicher sind? Unter diesem Aspekt soll die Fragestellung auf weitere Materialien und Anwendungsgebiete erweitert werden.

Um dem Problem des Zeitverlusts durch die Verwendung des Computerraums zu begegnen, wurden hierbei die entsprechenden Arbeitsanweisungen und Internetquellen den SuS ausgedruckt zur Verfügung gestellt. Die Authentizität der Quellen (als wichtiges Element des WebQuests) wird dabei gewahrt, indem das Material nicht verändert wird.

In Gruppen erarbeiten die SuS erneut zu ihrer Fragestellung und dem betreffenden Nanomaterial ein Handout und präsentieren dies im Plenum. Abschließend erfolgt eine moderierte Expertendiskussion mit dem Autor und der Lehrkraft.



### 7.1.3.5 Evaluation

Die oben beschriebene Unterrichtseinheit wurde im Herbst 2015 an einem niedersächsischen Gymnasium in einem gA-Kurs Chemie durchgeführt. Kooperationspartner für den Hochschulbesuch waren das Institut für Materialphysik und die Abteilung für Fachdidaktik Chemie an der Universität Göttingen.

Für die vorliegende Evaluation wurde ein Fragebogen analog zu dem vorherigen Projekt eingesetzt, der auf die (Lern-)Ziele und Inhalte des aktuellen Unterrichtsprojektes angepasst wurde; an der grundsätzlichen Ausrichtung des Fragebogens und der damit zusammenhängenden Methoden wurde jedoch aus den in Kap. 7.1.1.4 genannten Gründen festgehalten.

### Paper-Pencil-Fragebogen

---



---

#### Fachliche Inhalte, gesellschaftliche Bezüge, Bewertung

---

1. Beschreibe möglichst genau, welchen Größenbereich die Nanodimension umfasst.

---

2. Formuliere bitte, was du dir unter „Nano“ vorstellst. Fertige gegebenenfalls zusätzlich eine Zeichnung an

---

3. Ordne die folgenden Objekte der Größe nach, beginnend beim Kleinsten: Elektron, Nanopartikel, Haar, Atom, Haselnuss.

---

4. Nenne verschiedene Nanomaterialien und/oder verschiedene Bereiche, in denen diese Nanomaterialien eingesetzt werden. Beschreibe nach Möglichkeit ihre Funktion.

---

5. Beurteile den zunehmenden Einsatz von Nanotechnologie und Nanomaterialien.

---

6. Das Wichtigste, was ich zum Thema „Nano“ gelernt habe, ist ...

---

#### Allgemeines Feedback zur Unterrichtseinheit

---

7. Worüber hättest du gerne mehr erfahren?

---

8. Was hat dir an der Unterrichtseinheit gut gefallen? / nicht so gut gefallen?

---

#### Einschätzung der eigenen Kenntnisse

---

9. Wie schätzt du deine Kenntnisse zu „Nano“ ein? (Antwortmöglichkeiten: sehr viele, viele, wenige, keine).

---



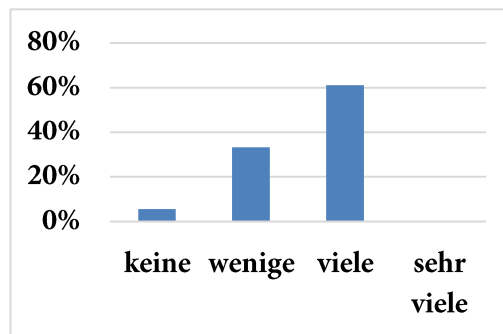
---

Eine Kopie des gesamten Fragebogens befindet sich im Anhang (A3.10). Tabelle 20 gibt einen Überblick über die wichtigsten Antworten und zugehörige Schülerzitate.

Tabelle 20 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.

Ergebnis / Auswertung	SchülerInnenzitate
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Der Großteil der SuS können die Definition der „Nanoebene“ (1 – 100 nm) nennen. In einigen Fällen wird auch 0 – 100 nm genannt; die Abgrenzung nach unten scheint demnach teilweise unklar zu sein.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „1 – 100 nm.“ / „1 Nanometer ist ein milliardsten Meter (10<sup>9</sup>).“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorstellungen der Nanoebene verbleiben dennoch diffus und werden weiterhin oberflächlich beschrieben.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Unter Nano stelle ich mir immer was kleines vor“ / „Nano = klein/mini“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 11 / 18 SuS (ca. 61 %) können die genannten Objekte richtig nach der Größe ordnen. Alle sieben anderen Teilnehmenden schätzen Nanopartikel kleiner als Atome oder Elektronen ein.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• SuS können viele Nanomaterialien und ihre Anwendungen (durchschnittlich 5,1) nennen, insbesondere aus dem Spektrum der behandelten Anwendungsbereiche. Meistgenannte Bereiche sind Kosmetika (Sonnencreme) und Medizin.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Einige Nanopartikel dienen zum Schutz vor schädlicher UV-Strahlung. Hierbei sind die Partikel in Sonnenmilch enthalten. Zum anderen werden diese Partikel in der Medizin zur Bekämpfung von Krebs eingesetzt.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fast alle SuS (16 / 18) beurteilen differenziert und reflektiert, die in der Unterrichtseinheit kennengelernten Vorteile werden kritisch gegen das Gefahrenpotenzial abgewogen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Ich denke, in vielen Bereichen ist der zunehmende Einsatz von Nanotechnik sehr hilfreich, jedoch müssen die Folgen und Wirkungen auf den Menschen noch weiter erforscht werden.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Am wichtigsten schätzen SuS die starke Verbreitung von „Nano“ in ihrer Lebenswelt ein, die Bedeutung dieser Technologie und – damit zusammenhängend – auch die Risikobeurteilung.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• [Das Wichtigste, was ich zum Thema Nano gelernt habe, ist] „...dass das Thema „Nano“ bislang kaum erforscht ist. Trotzdem treffen wir häufig auf Nanopartikel (Lebensmittel, Kosmetika) im Alltag.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die SuS hätten gerne mehr über die Folgen für Mensch und Umwelt erfahren, insb. in sensiblen Domänen (Lebensmittel, Kosmetika). Auch medizinische Aspekte werden besonders häufig genannt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Mehr über die genauen Schäden für Mensch und Umwelt“ / „Inwiefern Nanopartikel zukünftig eine besondere Rolle spielen (bei der Bekämpfung von Krankheiten).“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Besonders positiv wurden von den SuS die Experimente und insb. der Besuch der Universität bewertet; darüber hinaus auch der hohe Anteil an Eigenaktivität, etwa in den Gruppenarbeiten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Versuche und Alltagsbezogenheit“ / „Die Exkursion an die Uni“ / „Wir durften uns viel erarbeiten“ / „Kein langweiliger Frontalunterricht“</li> </ul>

- Die Mehrheit der SuS besitzt nach eigener Schätzung „viele Kenntnisse“ zum Thema „Nano“.



### Reflexion der Unterrichtseinheit

Die Reflexion der Lehrkraft unterstützt die Aussagen der SuS aus der schriftlichen Evaluation in weiten Teilen. Als besonders positiv wurde die Exkursion wahrgenommen; auch wenn Novitätseffekte<sup>24</sup> und die Abwechslung von dem regulären Unterricht hier natürlich eine Rolle spielen, war der Besuch der Universität trotz des organisatorischen Aufwandes lohnenswert. Sowohl die vorgestellten Charakterisierungsmethoden als auch die Experimente zu den Eigenschaften wurden dabei oftmals im weiteren Verlauf der Unterrichtsverlauf erwähnt und bei der Diskussion für die Argumentation herangezogen. Weiterhin wurden die hohe Lerneraktivität, die Alltagsnähe der Unterrichtseinheit und die Experimente positiv hervorgehoben. Die überarbeitete Methodik des WebQuests konnte die *time on task* erhöhen, ohne dabei die Authentizität der Materialien oder die Diskussionsqualität erkennbar zu schwächen.

Es verbleibt kritisch anzumerken, dass die Repräsentationen der Nanodimension als zentrales Unterrichtselement bei einigen SuS offensichtlich nur wenig präzisiert werden konnte; 7 von 18 Teilnehmenden konnten die Aufgabe in der Evaluation nicht lösen, auch die Vorstellungen von „Nano“ verbleibt trotz der Exkursion diffus. Ein Lösungsvorschlag könnte es sein, das in Kap. 7.1.1.3 beschriebene Nanocubes-Modellexperiment bei einer zukünftigen Durchführung zur vertieften Auswertung der Exkursion einzugliedern. Ein weiterer wäre, der Vor- und Nachbereitung des Hochschulbesuchs und hier insbesondere der Rasterelektronenmikroskopie mehr Zeit einzuräumen, um das Lernen inner- und außerhalb des Klassenraumes stärker zu verknüpfen<sup>[307]</sup>.

Abschließend ist anzumerken, dass es sich laut Einschätzung der Lehrkraft um eine eher leistungsschwache Klasse handelt, keiner der 18 Schülerinnen oder Schüler hat sich zudem für das Abitur zur Prüfung im Fach Chemie angemeldet. Dies ist bei der Auswertung zu berücksichtigen und unterstreicht erneut, dass anhand dieser kleinen Stichprobe keine belastbaren, generalisierten Aussagen getroffen, sondern allenfalls Tendenzen ermittelt werden können.

<sup>24</sup> Der Novitätseffekt beschreibt vereinfacht in der Psychologie das Phänomen einer gesteigerten Begeisterungsfähigkeit des Teilnehmenden für Neuartiges oder Unbekanntes<sup>[305, 306]</sup>.

## Fazit

Die Untersuchung von Sonnencremes auf ihre UV-Filter eröffnet zahlreiche Möglichkeiten, chemischen Fragestellungen sowohl im Chemieunterricht als auch an Forschungseinrichtungen nachzugehen. Neben den beschriebenen nasschemischen Nachweisen bietet die Charakterisierung der Nanopartikel dabei gute Gelegenheiten, den SuS Einblicke in moderne Forschungsmethoden zu ermöglichen.

Zusätzlich zu dem Bau der Solarzelle können mit den isolierten Titandioxid-Nanopartikeln auch zahlreiche weitere Experimente im Chemieunterricht durchgeführt werden. Hierbei eignen sich insbesondere Versuche zur Photokatalyse. Ein Unterrichtsbeispiel, welches an dieses Projekt anschließen könnte, ist die photokatalytische Abwasserreinigung mit Zinkoxid- oder Titandioxid-Nanopartikeln. Hierzu wird im nachfolgenden Kapitel ein Unterrichtsvorschlag vorgestellt, bei dem der Einsatz dieser Partikel ausgehend von der Bisphenol-A-Problematik erarbeitet wird. Über diese und weitere Experimente lassen sich nicht nur fachliche Kompetenzen vertiefen, sondern auch gute Bezüge zu diversen Umweltfragen herstellen, um die Lerngruppe für derartige Fragen zu sensibilisieren.

### 7.1.3.6 *Anbindung an das Kerncurriculum*

In Tabelle 21 werden die behandelten Nano-Inhalte dieses Projektes sowie ihre Anbindungen an das niedersächsische Kerncurriculum<sup>[44]</sup> im Überblick dargestellt.

Tabelle 21 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 3.

### Projekt 3: Von der Sonnencreme zur Solarzelle – Ein Schule-Hochschule-Projekt

Nano-Inhalte	Curriculare Anbindung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interdisziplinarität und Bedeutung von Nanotechnologie</li> <li>• Größendimension von Nanomaterialien</li> <li>• Charakteristische Eigenschaften: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis</li> <li>• Anwendung von Titandioxid- und Zinkoxid-Nanopartikeln als mineralische UV-Filter</li> <li>• Isolation von Nanomaterialien aus Sonnencreme</li> <li>• Untersuchung von Nanomaterialien mit wissenschaftlichen Charakterisierungsmethoden (REM, P-XRD, EDX)</li> <li>• Anwendung von Titandioxid-Nanopartikeln in einer Farbstoffsolarzelle</li> <li>• Bewertung des Einsatzes von Nanopartikeln in diversen Anwendungsbereichen im WebQuest</li> </ul>	<p>Die SuS ...</p> <p><b>Fachwissen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• betrachten Reaktionsgleichungen auf Teilchen- und Stoffmengenebene.</li> <li>• deuten Redoxreaktionen als Elektronenübertragungsreaktionen nach dem Donator-Akzeptor-Prinzip.</li> </ul> <p><b>Erkenntnisgewinnung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• führen Nachweisreaktionen durch.</li> <li>• nutzen geeignete Modelle zur Deutung stofflicher und struktureller Aspekte.</li> <li>• planen Experimente zur Ermittlung von Stoffeigenschaften und führen diese durch.</li> </ul> <p><b>Kommunikation:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• diskutieren die Aussagekraft von Nachweisreaktionen.</li> <li>• diskutieren die Grenzen und Möglichkeiten von Modellen.</li> <li>• nutzen und beurteilen Informationsquellen.</li> <li>• gestalten und beurteilen Präsentationen.</li> <li>• recherchieren zu technischen Verfahren in unterschiedlichen Quellen, wählen aussagekräftige Informationen aus und präsentieren ihre Ergebnisse.</li> <li>• interpretieren Reaktionsgleichungen auf Stoff- und Teilchenebene.</li> <li>• Stellen den Energieumsatz einer chemischen Reaktion im Energiediagramm dar.</li> </ul> <p><b>Bewerten:</b></p>

- 
- reflektieren die Bedeutung technischer Verfahren unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit, Gesundheit und Umweltverträglichkeit.
  - erkennen und beschreiben die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung von Stoffen in ihrer Lebenswelt.
- 
-

### 7.1.4 Projekt 4: Nanochemie und Katalyse<sup>25</sup>

#### 7.1.4.1 Ziele und Beschreibung des Projektes

In diesem Projekt soll eine Möglichkeit vorgestellt werden, wie das Themengebiet „Nano“ im Rahmen eines Kurses auf erhöhtem Anforderungsniveau (eA-Kurs) vermittelt werden kann. Von besonderer Bedeutung im Hinblick auf die Abiturprüfung ist hierbei die Angliederung der Inhalte und geförderten Kompetenzen an die entsprechenden curricularen Vorgaben. Somit bietet ein solches Kurskonzept unter Umständen weniger „thematische Freiheiten“ – im Gegenzug können ausgewählte Aspekte im Vergleich zu einem WPU- oder gA-Kurs auf vertiefter Ebene behandelt werden.

Für die Themenwahl bieten sich im Hinblick auf die thematische Breite von „Nano“ eine Reihe an Anknüpfungspunkten an klassische Inhalte des Chemieunterrichts der organischen (Hydrolyse, Kondensation, ...) oder anorganischen Chemie (Redoxreaktionen, Elektrochemie, ...) an. Für das vorliegende Projekt wurde der Bereich „Katalyse“ fokussiert, da dieser einen besonders starken Bezug sowohl zum Kerncurriculum<sup>[44]</sup> als auch zur Nanotechnologie aufweist. Aus diesem Grund soll im Folgenden eine Unterrichtseinheit zu diesem Thema vorgestellt werden. Die konkreten Lernziele für das vorliegende Projekt lauten:

1. Die SuS beschreiben Nanotechnologie als interdisziplinäres Forschungsfeld mit großer Bedeutung für Alltag, Wirt- und Wissenschaft (LL1, LL2).
2. Die SuS entwickeln ein genaueres Verständnis für die „Nanodimension“ und ordnen Nanomaterialien korrekt in eine Größenskala ein (LL3).
3. Die SuS nennen mehrere Nanomaterialien in ihrer Lebenswelt (LL2, LL8).
4. Die SuS beschreiben das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis als charakteristische Eigenschaft von Nanomaterialien (LL4).
5. Die SuS ermitteln, dass die Größenordnung von Katalysatorpartikeln eine wesentliche Rolle für die Katalysatorwirkung spielt (LL5).
6. Die SuS untersuchen in Experimenten die Katalyseleistung nanostrukturierter Materialien und deuten diese anhand des gesteigerten Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses (LL4, LL5).
7. Die SuS vergleichen mit Hilfe von Experimenten, dass Nanomaterialien andere Eigenschaften aufweisen als makroskopisch große Partikel (LL5, LL6).
8. Die SuS beschreiben die Photokatalyse mit Hilfe von vereinfachten Modellen sowie ihre Anwendungen in umweltrelevanten Kontexten (LL5, LL8).
9. Die SuS erörtern und bewerten den Einsatz von Nanomaterialien in diversen Alltagsanwendungen (LL9).

Durchgeführt und evaluiert wurde die Unterrichtseinheit in dem eA-Kurs Chemie am OTTO-HAHN-GYMNASIUM GÖTTINGEN; die Lerngruppe besteht aus 19 SuS.

---

<sup>25</sup> Die Inhalte von Projekt 4 (Kap. 7.1.4) wurden vom Autor zusätzlich in der Fachzeitschrift PRAXIS DER NATURWISSENSCHAFTEN – CHEMIE IN DER SCHULE<sup>[295]</sup> veröffentlicht. Mit freundlicher Genehmigung des Verlags (siehe Anhang A4.3) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

#### 7.1.4.2 *Inhalte und didaktisch-methodische Überlegungen*

Die Themen „Katalyse“ und „Katalysatoren“ stellen einen essentiellen Inhalt der Chemie und des Chemieunterrichts gleichermaßen dar. Im Licht des weltweit zunehmenden Energiebedarfs und der steigenden Umweltbelastung erfahren Möglichkeiten zur Einsparung von Energie seit langem eine große Aufmerksamkeit. Entsprechend zahlreich sind die Anwendungsbereiche und Produkte von Katalysatoren, welche nicht nur in der (chemischen) Industrie, sondern längst in unserem Alltag oder auch unserem Körper zu finden sind. In den vergangenen Jahren wurde hierbei vermehrt auch Nanomaterialien in Betracht gezogen, da diese aufgrund ihres hohen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses eine gesteigerte Katalyseleistung bei geringem Materialverbrauch bieten. Darüber hinaus weisen nanoskalige Materialien oftmals andere Eigenschaften im Vergleich zu ihren makroskopischen Analoga auf, sodass sich hier zusätzliche Möglichkeiten für neuartige Katalysatoren ergeben.

In dem vorliegenden Projekt sollen die enge Verknüpfung der Themengebiete „Katalyse“ und „Nano“ in einer Unterrichtseinheit für den eA-Kurs abgebildet werden. Fokussiert wird hierbei die Nutzung photokatalytischer Reaktionen, welche seit einigen Jahren in der Umweltschutztechnik eine bedeutende Rolle spielt, vor allem zur Zersetzung umwelttoxischer Stoffe in Abwässern. Hierzu zählen insbesondere Arzneimittel, Farbstoffe oder auch Pflanzenschutzmittel, die durch Stofftrennverfahren wie Destillation oder Filtration nicht ausreichend oder nur unter hohem Energieaufwand entfernt werden können. Ein Stoff, der in den letzten Jahren Gegenstand vieler Medienberichte ist und mit solchen klassischen Methoden der Wasseraufbereitung schlecht entfernt werden kann, ist Bisphenol A (4,4'-Diphenoldimethylmethan). Bisphenol A wird als Additiv in Weichmachern für die Synthese von Kunststoffen und Epoxidharzen genutzt, welche wiederum zur Herstellung vieler Alltagsprodukte verwendet werden, wie zum Beispiel für Trinkwasserflaschen oder zur Innenbeschichtung von Konservendosen. Durch verschiedene chemische Prozesse, insbesondere durch Hydrolysereaktionen, kann gebundenes Bisphenol A allerdings wieder aus diesen Materialien freigesetzt werden und sich in der Nahrung anreichern<sup>[308]</sup>. Dass die Aufnahme von Bisphenol A starke Auswirkungen auf den Hormonhaushalt hat, ist bereits seit den 1930er Jahren bekannt; so führt Bisphenol A beispielsweise zu Verhaltensstörungen oder Unfruchtbarkeit bei Männern. Auch ein Zusammenhang mit Diabetes und Herz-Kreislaufproblemen wird aktuell untersucht<sup>[309]</sup>.

Dieser alltagsorientierte Kontext bietet großes Potenzial und viele Lerngelegenheiten für eine Behandlung im Chemieunterricht. Ausgehend von der Bisphenol-A-Problematik können SuS die Photokatalyse als Methode zur Zersetzung umwelttoxischer Stoffe kennenlernen. Die hohe inhaltliche Schnittmenge der Themengebiete „Nano“ und „Katalyse“ ermöglicht dabei zum einen die synergistische Vernetzung des modernen Forschungsgebietes der Nanowissenschaften mit klassischen und curricular relevanten Inhalten des Chemieunterrichts und bietet darüber hinaus eine breite Vielfalt an möglichen Anschlusskontexten, etwa im Bereich der Umwelttechnik. Abbildung 75 gibt einen Überblick über die Struktur der Unterrichtseinheit.



1	Einstieg und Grundlagen	2	Problematik: Bisphenol A	3	Ergebnissicherung & Diskussion
4.1	Gesteigerte Katalyseleistung von Braunstein@Silica		Kontroverse um Bisphenol A Recherche über Eigenschaften, Anwendungen, Gefahrenpotenzial und Abbau von BPA.		MindMap / Flussdiagramm ★ Strukturierung und Sicherung der Erkenntnisse wahlweise in einer MindMap bzw. ConceptMap oder in einem Flussdiagramm.
	"Nano"-Grundlagen Größendimension, Definition, Morphologien von Nanomaterialien, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (Nanocubes-Experiment, besondere Eigenschaften)	>	Modellexperiment Photokatalyse Erarbeitung der Grundlagen und Entwicklung eines Modellexperimentes	>	Bewertung des Einsatzes verschiedener Nanomaterialien in diversen Kontexten (Nahrung, Industrie, Kosmetik, ...)
2.1	Synthese von ZnO-NP und Auswertung der Fluoreszenz		4.2 Photokatalyse mit ZnO-NP Abbau von Methyleneblau		Ergebnissicherung Erstellen und Präsentieren des Handouts
2.2	Verschiedenfarbige Fluoreszenz Auswertung des Partikelwachstums (Ostwald-Reifung)		★ Photometrische Messung des Abbaus		Abschluss Expertendiskussion zu Nanotechnologie
			★ Diverse Anschlussexperimente		

Abbildung 75 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.

Der entwickelte Unterrichtsvorschlag umfasst etwa fünf Doppelstunden. Fachlich sollten die SuS möglichst über grundlegende Kenntnisse in der organischen Chemie verfügen. Insbesondere sollten Grundlagen in Bezug auf die Bildung und Eigenschaften von Radikalen vorhanden sein, idealerweise ist die radikalische Substitution ( $S_R$ ) bereits behandelt worden. Je nach gewünschter Tiefe der Auswertung sind Kenntnisse über die Farbigkeit organischer Verbindungen oder auch die Konzentrationsbestimmung mittels Photometrie von Vorteil.

#### 7.1.4.3 Ablauf des Unterrichtsprojektes und Materialien

Der Einstieg in die Thematik erfolgt zunächst über die Wiederholung eines klassischen Experiments des Chemieunterrichts, konkret über die katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid durch Braunstein. Hierüber werden zu Beginn die Grundlagen der Katalyse aus der Sekundarstufe I wiederholt (bspw. Beeinflussbarkeit chemischer Reaktionen durch den Einsatz von Katalysatoren, Wirkung auf die Aktivierungsenergie, ...). Gleichzeitig bietet der Versuch die Basis für das anschließende Problemexperiment, bei dem der Stoffumsatz mit Braunstein auf einem mesoporösen Silica-Träger verglichen wird. Bei diesem Trägermaterial handelt es sich um nanostrukturiertes Silica mit geordneten Poren, deren Durchmesser im Bereich von wenigen Nanometern liegt (eine detailliertere Beschreibung findet sich in Kap. 7.2.3.2). Da diese Materialien nur wenigen SuS bekannt sind, wird ein entsprechendes Schema präsentiert (siehe Abbildung 76, linke Hälfte), anhand dessen sie selbstständig Hypothesen über die Eigenschaften – oder genauer: die Oberfläche – generieren können. Zu diesem Zeitpunkt werden Letztere allerdings noch nicht ausgewertet, stattdessen wird Experiment 4.1 durchgeführt.

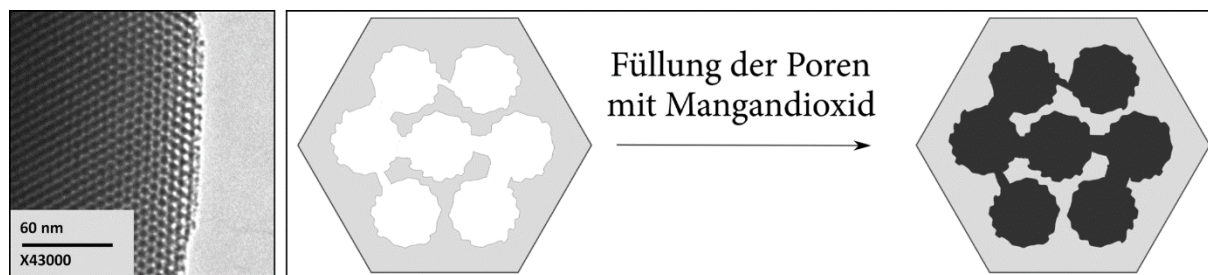


Abbildung 76 – Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mesoporösen Silicas. Rechts: Schema der Porenfüllung von mesoporösem Silica mit Mangan(II)nitrat-Lösung bzw. Braunstein.

#### Experiment 4.1: Katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid durch Braunstein@Silica

*Geräte und Chemikalien:* Mangan(II)nitrat-hexahydrat, Wasserstoffperoxid (Lösung, 5 %), mesoporöses SBA-15 Silica (siehe Kap. 7.2.3.3), Braunstein, demin. Wasser, 2 Rundkolben mit Ansatzstutzen (Olive), 2 Kolbenprober, 2 Spritzen mit Septum, Mörser mit Pistill, 2 Tiegel, Tiegelfzange, Gasbrenner, Dreifuß mit Tondreieck, 2 Magnetrührer mit Rührfisch, Stativmaterial, 2 Schlauchverbindungen mit je 2 Schlauchschellen.

*Versuchsdurchführung:* Die Herstellung des Katalysatormaterials Braunstein erfolgt durch thermische Zersetzung von Mangan(II)nitrat<sup>[310]</sup> und wird daher als Lehrerversuch im Abzug durchgeführt.

2 g des porösen Silica-Materials (siehe Kap. 7.2.3.3) werden mit 2 mL einer gesättigten Mangan(II)nitrat-Lösung versetzt und mit Hilfe von Mörser und Pistill homogenisiert. Das erhaltene Kompositmaterial, bestehend aus Silica und Mangan(II)nitrat in dessen Poren, wird anschließend in einen Tiegel überführt; dieser wird so lange mit dem Gasbrenner erhitzt, bis keine sichtbaren Gase mehr entstehen und sich das Material braun färbt (Abzug!). Als Referenzmaterial zur katalytischen Aktivität dient unporöses („Bulk“-)Braunstein. Zur Herstellung dieses Materials werden weitere 2 mL der gesättigten Mangan(II)nitrat-Lösung in einem weiteren Tiegel ebenfalls thermisch in das Oxid umgesetzt.

Anschließend werden die beiden Pulver jeweils in einem Rundkolben in 20 mL Wasser suspendiert. Es wird eine Apparatur gemäß Abbildung 77 aufgebaut. Zum Start der Messung werden die Wasserstoffperoxid-Lösungen gleichzeitig in die Rundkolben gegeben und anhand der Kolbenprober die gebildeten Gasvolumina gemessen.

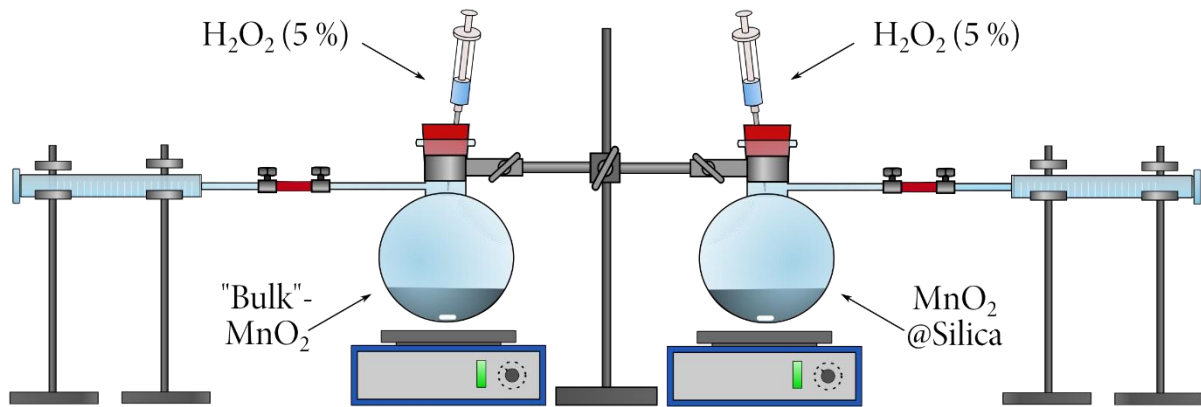
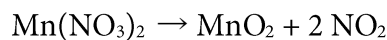


Abbildung 77 – Versuchsaufbau zum Vergleich der Katalyseleistung von Braunstein und Braunstein@Silica.

*Beobachtung:* Während des Erwärms mit dem Gasbrenner wird nach einiger Zeit ein braunes Gas sichtbar. In beiden Tieglern wird anschließend ein schwarzes Pulver erhalten.

Nach Zugabe der Wasserstoffperoxid-Lösung werden im Kolbenprober mit dem Silica-Braunstein-Kompositmaterial (Braunstein@Silica) innerhalb von 5 Sekunden 80 mL Gas freigesetzt. Bei dem Bulk-Material wird diese Menge Gas in 30 Sekunden freigesetzt.

*Auswertung:* Durch das Homogenisieren im Mörser verteilt sich die Mangan(II)nitrat-Lösung in den Poren. Durch dessen anschließende thermische Zersetzung entstehen Braunstein und Stickstoffdioxid, nach <sup>[311]</sup>:



Über die unterschiedlich schnellen Reaktionsverläufe wird deutlich, dass Braunstein in porösem Material die Zersetzung des Wasserstoffperoxids besser katalysiert als Braunstein in Bulk-Form. Zu beachten ist, dass die eingesetzte Menge an Katalysator in beiden Fällen gleich ist. Die höhere katalytische Aktivität kann mit dem Vorhandensein sehr kleiner und fein verteilter poröser Braunstein-Partikel in der porösen Matrix gedeutet werden (LL3, LL4). Diese haben im Vergleich zu den Bulk-Manganoxidpartikeln sehr große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisse (LL5). Da die Zersetzung des Wasserstoffperoxids an der Oberfläche dieser Partikel stattfindet, sind die (vielen) kleineren Partikel katalytisch besonders aktiv.

*Hinweis:* In Kap. 7.2.3.3 wird ein alternativer Aufbau beschrieben, welcher eine vertiefte Auswertung über ein *pt*-Diagramm ermöglicht.

*Anmerkungen zum Unterrichtseinsatz:* In der anschließenden Auswertung des Experiments kann unter den eingangs gebildeten Hypothesen schnell von den SuS die hohe Oberfläche des Braunsteins als Ursache für gesteigerte Katalyseleistung identifiziert werden, die durch das Trägermaterial stark vergrößert wird. Um das Vorwissen sinnvoll zu vernetzen, werden hierbei zusätzlich über Aktivkohle und Mentos<sup>®</sup> <sup>[312]</sup> Bezüge zu weiteren Materialien mit hoher Oberfläche hergestellt, welche den Lernende bekannt sind. Im Hinblick auf die Porengröße der Silica-Partikel wird hierbei hervorgehoben, dass es sich hierbei um ein „Nano“-Phänomen handelt – bei sinkender Größe der Partikel bzw. der Strukturen in den nanoskaligen Bereich steigt die gesamte

Oberfläche sehr stark an. Auf Grundlage dieses Struktur-Eigenschafts-Zusammenhangs, welcher im Experiment verdeutlicht wurde, wird nun im Unterrichtsgespräch auf die Erschließung des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses als Charakteristikum von Nanomaterialien hingearbeitet (LL4, LL5). Der sichtbar gesteigerte Stoffumsatz verdeutlicht auf anschauliche Weise das Potenzial dieser Technologie und bietet einen motivierenden Einstieg in das Themengebiet der Nanowissenschaften.

Hierauf aufbauend werden nun die in Kap. 7.1.1.3 beschriebenen grundlegenden Inhalte der Nanowissenschaften eingeführt (LL1, LL2). Hierbei wird allerdings das ebendort beschriebene „Nanocubes“-Modellexperiment nicht thematisiert, da sich hierbei starke Redundanzen zu dem durchgeführten Experiment ergeben.

Im Anschluss an das Einführungsseminar sollen im weiteren Verlauf über die Herstellung von Nanomaterialien die erlernten theoretischen Grundlagen praktisch angewendet werden. Hierzu besonders geeignet ist die Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln (siehe Experiment 2.1, Kap. 7.1.2.3), welche daher in einem Schülerexperiment durchgeführt wird. Über die Auswertung werden somit nicht nur die Bottom-Up-Strategie, sondern auch Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge bei Nanomaterialien sowie die OSTWALD-Reifung veranschaulicht. Als Alternative hierzu kann in anderen Lerngruppen auch die unten beschriebene Synthese im Leidenfrost-Reaktor durchgeführt werden (siehe Experiment 6.4, Kap. 7.2.2).

Nach der Herstellung wird nun eine Anwendung dieser Nanopartikel betrachtet, bei dem SuS die Photokatalyse als Methode zur Zersetzung umwelttoxischer Stoffe kennenlernen. Der Einstieg findet hierbei über die oben angesprochene Kontroverse um Bisphenol A statt <sup>[313-316]</sup>. Hierzu finden sich in Online- und Printmedien zahlreiche Beiträge, von denen die aussagekräftigsten als stummer Impuls auf einer OHP-Folie präsentiert werden (die entsprechende Folie findet sich im Anhang, A3.11). Im Unterrichtsgespräch äußern sich die SuS zu den abgebildeten Aussagen zu Bisphenol A. Die dabei formulierten Beiträge und Fragen werden dabei an der Tafel festgehalten.

Im Anschluss an diese Phase erfolgt eine Internetrecherche, bei der die Schülerfragen soweit geklärt werden <sup>26</sup>. Die Ergebnisse der Recherchen werden in Kleingruppen ausgewertet und anschließend gemeinsam mit der Lehrperson als Ergebnissicherung in einer Recherche-Map <sup>27</sup> strukturiert. Auf diese Weise können viele (teils komplexe) Informationen schnell gesammelt und dort, wo es sich anbietet, verknüpft werden. Abbildung 78 zeigt eine exemplarische Recherche-Map zum Thema Bisphenol A.

---

<sup>26</sup> Wenn kein Computerraum zur Verfügung steht können alternativ können von der Lehrkraft diverse Materialien im Vorfeld der Einheit gesammelt und an einer Informationstheke der Lerngruppe zur Beantwortung der Fragen zur Verfügung gestellt werden

<sup>27</sup> Bei einer Recherche-Map handelt es sich um eine Kombination aus Concept-Map und MindMap

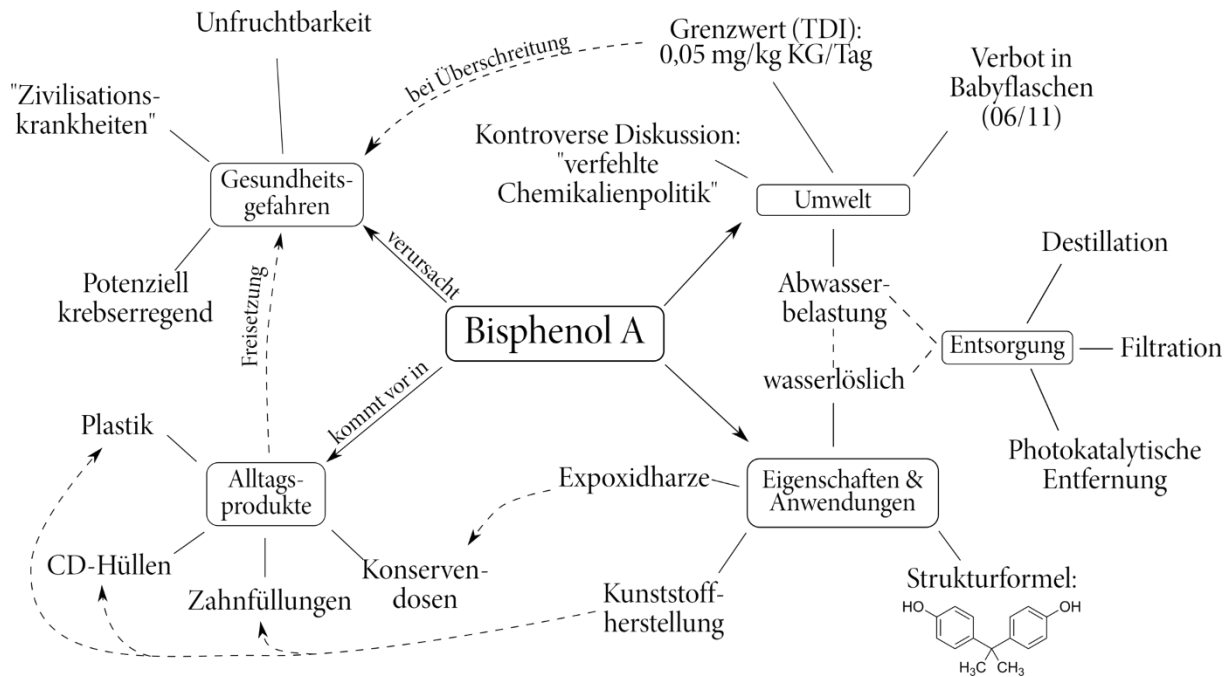


Abbildung 78 – Recherche-Map zum Thema Bisphenol A.

Lerngruppen mit entsprechenden Vorkenntnissen können bereits in der Recherche-Map das Thema der Entsorgung mittels Photokatalyse aufführen. In den bisherigen Unterrichtsversuchen war dies nicht der Fall und so wurde dieser Aspekt als Impuls eingebracht und in einem Lehrer-Schüler-Gespräch geklärt, in welchen Fällen die Photokatalyse eingesetzt wird. Hierbei wird insbesondere der Frage nachgegangen, unter welchen Bedingungen photokatalytische Zersetzungen von Stoffen erfolgen können; dieser Sachverhalt wird in einer folgenden Versuchsreihe untersucht.

In der Planungsphase zur Entwicklung der Experimente wird zunächst der augenscheinlichen Problematik nachgegangen, dass Bisphenol A als Substanz nicht in Schulversuchen verwendet werden darf und daher für die Betrachtung dessen Abbaus und der Photokatalyse auf ein anderes System ausgewichen werden muss. Als Alternative wird Methylenblau als klassische organische Testsubstanz für Photokatalyseexperimente im wissenschaftlichen Bereich vorgeschlagen – Methylenblau verfügt über verschiedene organische Gruppen (Alkyl- und Aminogruppen, Aromaten, Heterozyklen), die auch in den meisten organischen (Schad-)Stoffen vorkommen (siehe Abbildung 79). Darüber hinaus lässt sich dessen Abbau aufgrund der Farbigkeit auch optisch verfolgen oder mittels Photometrie quantitativ bestimmen. Da es sich bei der Lerngruppe um einen eA-Kurs handelt, wird ein anderer Unterrichtsgang gewählt. Hier werden den SuS Strukturformeln verschiedener organischer Verbindungen präsentiert, die in Schulexperimenten verwendet werden dürfen. Aus diesen wählen sie durch Vergleich der Strukturformeln mit der von Bisphenol A eine geeignete Chemikalie für ihre Versuchsreihe aus. Bei der Auswahl der Substanzen ist darauf zu achten, dass bei diesen keine großen strukturellen Übereinstimmungen mit Bisphenol A vorliegen und die SuS begründet Methylenblau auswählen können (z.B. Glucose, Toluol, langkettige Alkane, etc., siehe Abbildung 79).

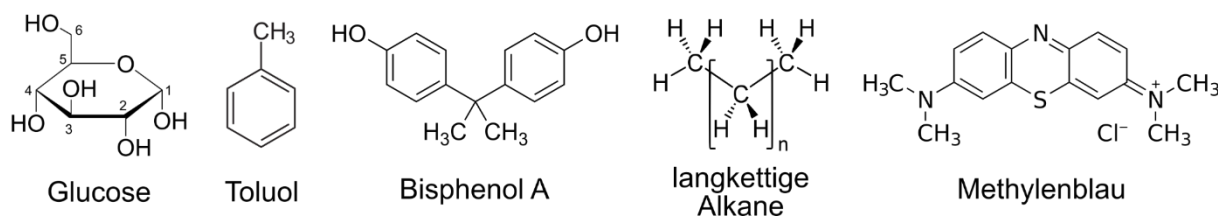


Abbildung 79 – Strukturformeln von Bisphenol A sowie weiterer organischer Verbindungen.

### Experiment 4.2: Entwicklung eines Modellexperiments zum photokatalytischen Abbau von Methylenblau durch Zinkoxid-Nanopartikel

Im anschließenden Schülerexperiment lernen die SuS die photokatalytische Zersetzung organischer Schadstoffe am Beispiel von Methylenblau kennen. Dazu erarbeiten sie zunächst mit Hilfe des Arbeitsblattes „Der photokatalytische Abbau organischer Substanzen“ (siehe Anhang, A3.12) in Kleingruppenarbeit eine Versuchsreihe, mit der sie anschließend überprüfen können, unter welchen Bedingungen eine photokatalytische Zersetzung des gewählten Farbstoffes stattfindet. Mögliche Kombinationen experimenteller Bindungen finden sich in Tabelle 22.

Tabelle 22 – Musterlösung der Tabelle zur Ermittlungen der notwendigen experimentellen Bedingungen für die Photokatalyse (MB = Methylenblau).

Teilversuch	Durchführung	Beobachtung	Ergebnis
1	MB + UV + Zinkoxid	Entfärbung nach einigen Minuten	MB wurde zersetzt
2	MB + UV	Geringe Entfärbung	UV-Licht allein reicht in der gegebenen Zeit nicht aus um MB zu zersetzen
3	MB + Zinkoxid	Keine Änderung	Ohne UV-Licht findet keine Zersetzung von MB statt
4	MB-Referenz	Keine Änderung	

Im Anschluss an die Erarbeitung der Versuchsreihe wird das Experiment, je nach Ausstattung, entweder als Schüler- oder Demonstrationsexperiment durchgeführt. Für den experimentellen Aufbau werden die Osram Ultra-Vitalux-Lampe (300 W) als Lichtquelle und die synthetisierten Zinkoxid-Nanopartikel als Photokatalysator vorgegeben, die Vorgehensweise sollte von den SuS geplant werden (siehe Anhang, A3.13). Alternativ kann der Aufbau je nach Leistungsstärke der Klasse auch gemeinsam entwickelt werden. Einen möglichen experimentellen Aufbau für den Versuch zeigt Abbildung 80.

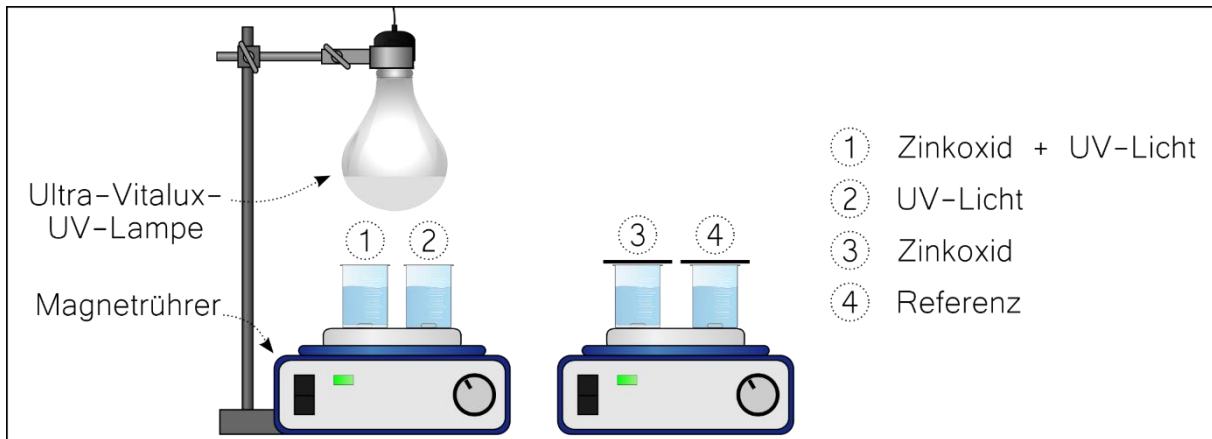


Abbildung 80 – Experimenteller Aufbau für die photokatalytische Zersetzung von Methylblau.

Nach Durchführung der Versuchsreihen werden die Beobachtungen im Plenum verglichen und als Ergebnis festgehalten, dass sich mithilfe von Zinkoxid als Photokatalysator und unter Einwirkung von UV-Licht Methylblau zersetzen lässt.

Da die chemisch-physikalischen Hintergründe des Abbaus nicht ohne Weiteres von SuS hergeleitet werden können, werden sie gemeinsam mit der Lehrkraft erarbeitet. Hierzu existieren bereits vielfältige didaktisch aufbereitete Unterrichtsmaterialien, mit denen die Bildung von Radikalen an einem Halbleiter wie Zinkoxid anschaulich vermittelt werden kann<sup>[317,318]</sup>. Je nach Leistungsstärke und Vorkenntnissen der Lerngruppe kann die Auswertung des Experiments anschließend in unterschiedlicher fachlicher Tiefe erfolgen.

So ist es zum einen möglich, auf phänomenologischer Ebene als Ergebnis des Experiments die photokatalytische Zersetzung von Methylblau durch die Entfärbung der Lösung festzuhalten. Zum anderen kann der Abbau auch detaillierter auf der Formel- und Teilchenebene erarbeitet werden, was in diesem eA-Kurs durchgeführt wird. Hierbei ist zu beachten, dass die vollständige Erläuterung sämtlicher Abbauprozesse von Methylblau oder Bisphenol A sehr anspruchsvoll ist und sich bislang auch noch nicht abschließend beschrieben in der fachwissenschaftlichen Literatur findet. Aufgrund der Komplexität der hierbei ablaufenden Prozesse wird die Auswertung daher didaktisch reduziert in zwei Schritte zusammengefasst: Die Bildung von Radikalen am Photokatalysator und deren Reaktionen mit einer organischen Verbindung. Um Letzteres zu veranschaulichen, eignet sich ein vereinfachtes Schema zur Beschreibung der photokatalytischen Zersetzung organischer Verbindungen, wie es in Abbildung 81 dargestellt ist.



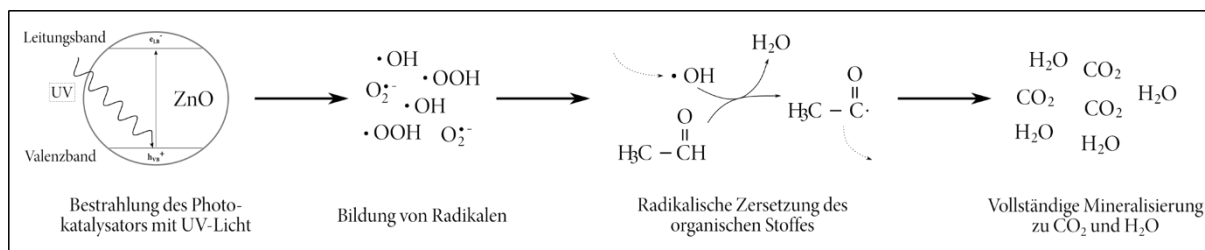


Abbildung 81 – Schema zur photokatalytischen Zersetzung eines organischen Stoffes.

Um den Lernenden zu verdeutlichen, dass es sich bei diesem Schema um ein vereinfachtes Modell zur Beschreibung des Abbaus organischer Verbindungen handelt, kann ergänzend der radikalische Abbau eines einfachen Moleküls besprochen werden. Hierzu eignet sich beispielsweise der Acetaldehyd, dessen photokatalytischer Abbau bereits genauer untersucht wurde (siehe Anhang, A3.12). SuS können anhand dieser beiden Darstellungen photokatalytische Reaktionen erkennen und zusätzlich über den Vergleich der beiden Modelle ihre Modellkompetenz trainieren. Letztlich können mit interessierten Lerngruppen zur Vertiefung der Kenntnisse auch ausgewählte Schritte des Abbaus von Metylenblau von der Lehrkraft erläutert werden, wie etwa die Ringöffnung und die damit verbundene Entfärbung der Lösung. Beispiele für entsprechende Fragmente, die in massenspektrometrischen Untersuchungen zur Zersetzung von Metylenblau in wässriger Lösung nachgewiesen werden können, finden sich im Anhang (A3.14). Im vorliegenden Fall wird aus Zeitgründen hierauf verzichtet.

Unabhängig von der fachlichen Tiefe der Auswertung des Experiments zur Zersetzung von Metylenblau erfolgt abschließend der Rücktransfer zur Bisphenol-A-Problematik. Im Mittelpunkt steht die Übertragung der Versuchsergebnisse zur Zersetzung von Metylenblau auf den Stoff Bisphenol A. Hierzu wurden Versuche zur photokatalytischen Zersetzung dieser Stoffe mit Hilfe von Zinkoxid als Katalysator durchgeführt, deren Ergebnisse als Grundlage für die weiteren Betrachtungen dienen sollen. Abbildung 82 zeigt entsprechende UV-VIS-Spektren der Zersetzung von Bisphenol A.

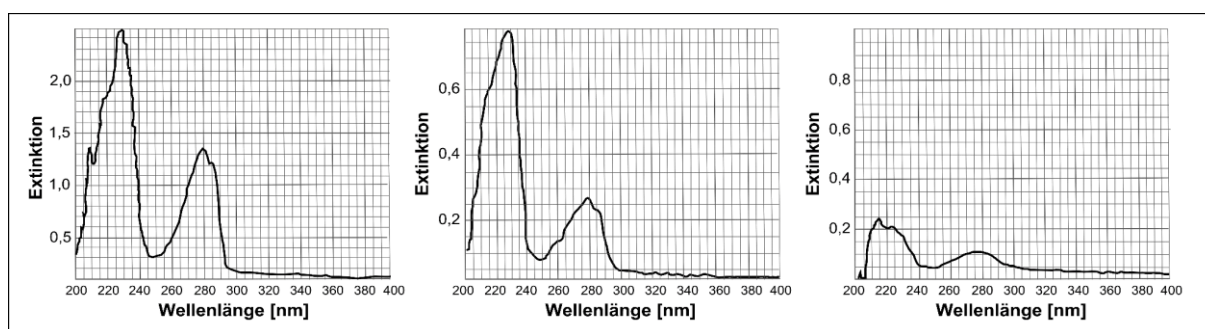


Abbildung 82 – UV-VIS-Spektren von Bisphenol A zu verschiedenen Zeiten: links:  $t = 0$ , Mitte:  $t = 125$  Minuten, rechts:  $t = 345$  Minuten.

Um SuS die Interpretation dieser Spektren zu ermöglichen, ohne dass vertiefte Kenntnisse über UV-VIS-Spektroskopie vermittelt werden, vergleichen sie zunächst die Intensität unterschiedlich konzentrierter Metylenblaulösungen mit den entsprechenden UV-VIS-Spektren. Aus diesem Vergleich können die Lernenden folgern, dass: je höher die Extinktion, desto höher die



Konzentrationen des jeweiligen Stoffes. Mit dieser Erkenntnis lässt sich abschließend ableiten, dass auch Bisphenol A mit Hilfe von Zinkoxid photokatalytisch zersetzt werden kann.

Neben der Zersetzung von Bisphenol A können im Rahmen der Unterrichtseinheit auch weitere Einsatzgebiete für die photokatalytische Zersetzung von Stoffen thematisiert werden. Hierzu bietet sich beispielsweise die Zersetzung von Farbstoffen in der Textilindustrie oder auch die Zersetzung von Medikamentenrückständen in Abwässern an. Hierbei können die SuS neben Zinkoxid auch weitere Photokatalysatoren kennenlernen, die im Kontext von Umweltfragen Anwendung finden, wie etwa Titandioxid.

Um den SuS einen breiteren Eindruck von dem Thema „Nano“ zu vermitteln, können an dieser Stelle je nach verfügbarer Zeit weitere Anschlussexperimente aus den anderen Projekten durchgeführt werden. Thematisch anschließen würde sich etwa der Nachweis von Hydroxyl-Radikalen (Experiment 2.4, Kap. 7.1.2.3) sowie die katalytische Zersetzung von n-Butan durch nanostrukturiertes Eisen(III)-oxid (Experiment 7.7, Kap. 7.2.3.3). Einen Übergang zu der nachfolgenden Bewertung und Ergebnissicherung stellt hingegen die Wirkung von Zinkoxid-Nanopartikeln auf pflanzliche Zellen dar (Experiment 2.6, Kap. 7.1.2.3).

### **Ergebnissicherung und Abschluss**

Zum Abschluss der Unterrichtseinheit und zur Ergebnissicherung soll der Einsatz von drei verschiedenen Nanomaterialien bzw. nanostrukturierter Materialien (Titandioxid, Silber, Silica) multiperspektivisch beleuchtet und deren Einsatz in verschiedenen Einsatzgebieten reflektiert auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse bewertet werden. In Gruppenarbeit erstellen die SuS anhand ausgewählter Quellen zunächst Steckbriefe der Nanomaterialien und führen wesentliche Anwendungsfelder bzw. Produkte auf. Hieran anschließend erarbeiten und diskutieren die Gruppen Kriterien für die Bewertung. Ihre Ergebnisse sichern die SuS in einem Handout, welches sie nach Beendigung der Gruppenarbeit im Plenum präsentierten und diskutierten. Als methodische Alternativen können je nach Lerngruppe und Zeit auch Podiumsdiskussionen, Gallerywalks oder das Verfassen eines Leserbriefs an eine Zeitung o.ä. gewählt werden. Den Abschluss der Unterrichtseinheit bildet eine moderierte Expertendiskussion mit dem Autor und der Lehrkraft zu der heutigen Bedeutung und perspektivischen Entwicklung von Nanomaterialien in gesellschaftlich relevanten Kontexten.

#### **7.1.4.4 Evaluation**

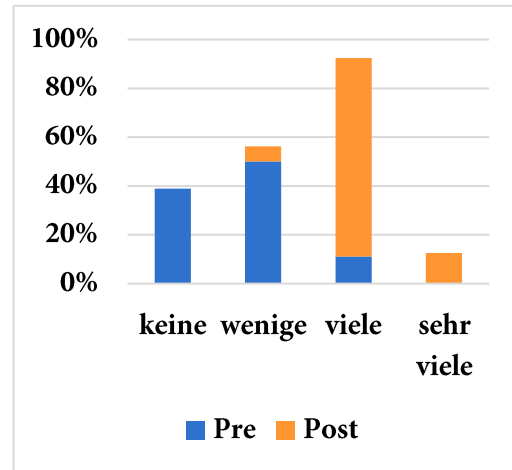
Die oben beschriebene Unterrichtseinheit wurde im Herbst 2015 am otto-Hahn-Gymnasium in einem eA-Kurs Chemie durchgeführt. Vor Beginn der Unterrichtseinheit wurde zur Ermittlung der Schülerperspektiven sowie der Vorkenntnisse des eA-Kurses der in Kap. 6.1 beschriebene Fragebogen von den SuS bearbeitet.

Für die vorliegende Evaluation wurde ein Fragebogen analog zu dem vorherigen Projekt eingesetzt; die grundsätzliche Ausrichtung des Fragebogens und die damit zusammenhängenden Methoden sind in Kap. 7.1.1.4 genannten Gründen festgehalten. In Tabelle 23 sind die wichtigsten Ergebnisse und Aussagen zusammengefasst.

Tabelle 23 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.

Ergebnis / Auswertung	SchülerInnenzitate
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vor der Unterrichtseinheit bezeichnen die SuS die Nanodimension undifferenziert als etwas „sehr kleines“; in der abschließenden Evaluation können alle Lernenden mindestens eine korrekte Definition der „Nanoebene“ (1 – 100 nm) nennen; Einige führen darüber hinaus noch weitere Größendefinitionen (1 – 500 nm) an.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Je nach Definition zwischen 1 – 100 oder 1 – 500 nm.“          „Nanopartikel sind von ca. 0,1 – 100 nm groß, sie können auch bis ca. 500 nm besondere Eigenschaften aufweisen.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• In den Umfragebögen vor der Unterrichtseinheit werden einige Anwendungen genannt, zum großen Teil (75 %) aus technischen Bereichen vermutet. In der abschließenden Evaluation werden mehr Nennungen erhalten (36 %), aus einem deutlich breiteren Feld an Anwendungsbereichen (Medizin, Kosmetika, Industrie, Textilien, etc.).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „SiO<sub>2</sub>, ZnO, TiO<sub>2</sub>, werden z.B. in der Industrie bei Autoreifen, bei Lebensmitteln, z.B. Ketchup zur besseren Fließeigenschaft oder in Sonnencreme zur besseren UV-Licht-Reflektion eingesetzt.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alle 18 SuS können die genannten Objekte richtig nach der Größe ordnen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Unter ausreichender Erforschung der eingesetzten Materialien ist die zunehmende Verwendung sinnvoll, da die guten Eigenschaften der Nanopartikel genutzt werden können. Jedoch birgt der Einsatz auch Gefahren. Bevor die Nanomaterialien in Lebensmitteln genutzt werden, sollen diese vorher weiter erforscht und optimiert werden.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fast alle SuS (17 / 18) beurteilen differenziert und reflektiert, die in der Unterrichtseinheit kennengelernten Vorteile werden kritisch gegen das Gefahrenpotenzial abgewogen. Besonders häufig wird unterschieden zwischen dem Einsatz in sensiblen (sehr kritische Einstellung bei Lebensmitteln) und technischen Bereichen (sehr positiv bei industriellen Prozessen).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• [Das Wichtigste, was ich zum Thema Nano gelernt habe, ist] „...dass es zwar sehr nützlich sein, aber auch durchaus Gefahren für Mensch und Umwelt beherbergen kann.“          „Ein Fortschritt, der viel bringt, aber auch unnötig genutzt wird obwohl die Nanowissenschaft noch so wenig erforscht ist.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Am wichtigsten schätzen SuS den gesamten Einblick in dieses Forschungsfeld ein; hierbei betonen sie auch die starke Verbreitung (vor allem in ihrem Alltag), die ihnen vorher nicht bewusst war. Sowohl die Möglichkeiten, etwa in der Medizin, als auch das Gefahrenpotenzial für Mensch und Umwelt werden gleichermaßen aufgeführt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Anwendungen im Bereich der Technik / Elektronik“          „Einsatz in Baustoffen, sowie Glas, Carbon.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die SuS hätten gerne mehr über die Anwendungen in technischen und industriellen Bereichen erfahren. Besonders häufig vertreten sind auch feinelektronische Anwendungen, wie bspw. Prozessoren, oder Carbonfaser-Materialien.</li> </ul>	

- Besonders positiv wurden von den SuS die Experimente, die eingesetzten Modelle bzw. Visualisierungen, der Alltagsbezug sowie die Struktur der Unterrichtseinheit bewertet. Die einzigen beiden kritischen Nennungen vermerken „zu viele Arbeitsblätter“.
- Nahezu alle SuS schätzen ihre Kenntnisse höher ein als vor der Unterrichtseinheit. Nachdem im Pre-Test 89 % der SuS angaben, „wenige“ oder „keine Kenntnisse“ zu „Nano“ zu besitzen, gaben nun 94 % an, „viele“ oder „sehr viele Kenntnisse“ zu besitzen.
- „Versuche und Alltagsbezogenheit“ / „Die Exkursion an die Uni“ / „Wir durften uns viel erarbeiten“ / „Kein langweiliger Frontalunterricht“



Zusätzlich zu den Resultaten der schriftlichen Schülerevaluation wurde im Rahmen der partizipativen Aktionsforschung ebenfalls Lehrerperspektiven erhoben, um dessen Intuition und Erfahrungen aus der Unterrichtspraxis in der Evaluation aufnehmen zu können <sup>[270]</sup>; hierbei wurde die Unterrichtseinheit gemeinsam mit der Lehrkraft unter der Zielsetzung einer qualitativen Weiterentwicklung von Inhalten, Methoden und Unterrichtsgang reflektiert.

Auch bei dieser Evaluation kann ein positives Fazit gezogen werden. Sowohl im Unterrichtsgespräch als auch in der experimentellen Phase zeigten die SuS ein hohes Interesse, sich mit dem Unterrichtsgegenstand auseinander zu setzen sowie eine ähnlich hohe Leistungsbereitschaft – nach Beurteilung der Lehrkraft über das Maß hinaus, welches von diesem eA-Kurs zu erwarten ist.

In den Unterrichtsgesprächen im Verlauf der Unterrichtseinheit zeichneten sich darüber hinaus bereits einige Tendenzen der schriftlichen Evaluation ab; die Alltagsnähe der Einführung sowie der Bisphenol-A-Problematik konnten laut der Lehrkraft dazu beitragen, Interesse und Aufmerksamkeit der SuS zu wecken und auch in anspruchsvolleren Phasen zu erhalten. Hierbei ist besonders die Diskussionsbereitschaft der SuS im Zusammenhang mit der Bewertung des Einsatzes von Nanotechnologie zu betonen, welche sich hinsichtlich der inhaltlichen Tiefe von den bisherigen Gruppen positiv abgehoben hat.

Als eine zu geringe Herausforderung wurde von dieser Lerngruppe hingegen die Entwicklung des Modellexperimentes empfunden, welche sich durch „einfaches Auskombinieren“ der Faktoren „Zugabe des Katalysators“ und „Bestrahlung mit UV-Licht“ ergeben hat. Diesem Punkt soll zukünftig dadurch begegnet werden, dass in der Aufgabenstellung weniger Informationen vorgegeben und mehr von den Gruppen erarbeitet werden. Während leistungsstärkere SuS bzw.

Gruppen durch eine entsprechend offenere Aufgabenstellung gefordert werden können, sollen leistungsschwächere entsprechend mit gestuften Lernhilfen (bspw. Informationskarten) individuell gefördert werden.

Insgesamt bestärken die abgeleiteten Tendenzen aus der schriftlichen Evaluation und der Reflexion innerhalb der partizipativen Aktionsforschung, dass die eingangs gestellten Lernziele erreicht werden konnten und sich über die Vernetzung der Themen „Nano“ und „Katalyse“ vielfältige Chancen für einen modernen und interessanten Chemieunterricht ergeben.

#### **7.1.4.5 Anbindung an das Curriculum**

In Tabelle 24 werden die behandelten Nano-Inhalte dieses Projektes sowie ihre Anbindungen an das niedersächsische Kerncurriculum <sup>[44]</sup> im Überblick dargestellt.

Tabelle 24 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 4.

### Projekt 4: Nanochemie und Katalyse

Nano-Inhalte	Curriculare Anbindung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesoporöse Silica als Beispiel für nanostrukturierte Materialien</li> <li>• Steigerung der Katalyseleistung durch Aufbringen auf eine nanostrukturierte Oberfläche</li> <li>• Interdisziplinarität und Bedeutung von Nanotechnologie</li> <li>• Größendimension von Nanomaterialien</li> <li>• Charakteristische Eigenschaften: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis</li> <li>• Bottom-Up-Synthese und Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln</li> <li>• Optional: Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln mit verschiedenfarbiger Fluoreszenz</li> <li>• Photokatalytische Zersetzung eines organischen Farbstoffes</li> <li>• Bewertung des Einsatzes von Nanopartikeln in diversen Anwendungsbereichen</li> </ul>	<p>Die SuS ...</p> <p><b>Fachwissen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• beschreiben die Beeinflussbarkeit chemischer Reaktionen durch den Einsatz von Katalysatoren.</li> <li>• beschreiben die Wirkungsweise von Katalysatoren.</li> <li>• beschreiben die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von Temperatur, Druck, Konzentration und Katalysatoren.</li> </ul> <p><b>Erkenntnisgewinnung:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• planen Experimente zur Ermittlung von Stoffeigenschaften und führen diese durch.</li> <li>• nutzen geeignete Modelle zur Deutung stofflicher und struktureller Aspekte.</li> <li>• nutzen die Modellvorstellung des Übergangszustands zur Beschreibung der Katalysatorwirkung.</li> <li>• ermitteln den Stoffumsatz bei chemischen Reaktionen.</li> </ul> <p><b>Kommunikation:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• stellen die Aktivierungsenergie und die Katalysatorwirkung im Energiediagramm dar.</li> <li>• diskutieren die Grenzen und Möglichkeiten von Modellen.</li> <li>• nutzen und beurteilen Informationsquellen.</li> <li>• gestalten und beurteilen Präsentationen.</li> <li>• recherchieren zu Katalysatoren in technischen Prozessen.</li> <li>• recherchieren zu technischen Verfahren in unterschiedlichen Quellen, wählen aussagekräftige Informationen aus und präsentieren ihre Ergebnisse.</li> <li>• interpretieren Reaktionsgleichungen auf Stoff- und Teilchenebene.</li> </ul>

---

**Bewerten:**

- reflektieren die Bedeutung technischer Verfahren unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit, Gesundheit und Umweltverträglichkeit.
  - erkennen und beschreiben die gesellschaftliche Relevanz und Bedeutung von Stoffen in ihrer Lebenswelt.
  - beurteilen den Einsatz von Katalysatoren in technischen Prozessen.
- 
-

## 7.2 Angebote für Schülerlabore

Nachdem die Gründung vieler Schülerlabore in den vergangenen Jahren zunächst als kurzfristige Reaktion auf die Ergebnisse der TIMSS- und PISA-Studie wahrgenommen wurde<sup>[319]</sup>, haben sie sich inzwischen als fester Bestandteil der deutschen Bildungslandschaft etabliert. Gegenwärtig sind im Schülerlabor-Atlas des Vereins LERNORT LABOR deutschlandweit 332 Schülerlabore registriert<sup>[320]</sup>, welche pro Jahr geschätzte 500.000 Besucher pro Jahr verzeichnen<sup>[319]</sup>. Als Bindeglied zwischen Schule und Hochschule nehmen Schülerlabore unter der Vielfalt an außerschulischen Lernorten somit eine wichtige Funktion ein.

Charakterisierend für solche Labore im Vergleich zu formellen Lernorten ist dabei die Möglichkeit für SuS, selbstständig und über einen längeren Zeitraum in einem wissenschaftlichen Labor zu experimentieren. Darüber hinaus bieten Schülerlabore aus einer Vielzahl von Gründen (u.a. veränderte Lernsettings, affektive Vermittlung von Lerninhalten, gesteigerte Authentizität) für SuS eine besondere Ausgangssituation, um einerseits vernetzte wissenschaftliche Inhalte und andererseits eine genauere Vorstellung von wissenschaftlichen Arbeitsweisen, Tätigkeitsfeldern und Berufsperspektiven kennenzulernen. Diese inhaltlichen, methodischen und materiellen Freiheiten sind in der Schule oftmals schwer zu erreichen.

Aus diesem Grund werden Schülerlabore auch aus fachdidaktischer Perspektive im Hinblick auf das Lernerinteresse beforscht – in aller Kürze sollen das individuelle Interesse des Lernalters und die Interessanztheit der Lernumgebung genutzt werden, um das aktuelle Interesse des Besuchers zu steigern<sup>[321]</sup>. Insbesondere das Erleben von Kompetenz, Autonomie und sozialer Eingebundenheit bieten hierbei großes Potenzial, diese Ziele umsetzen zu können<sup>[322]</sup>. Als Resultat zeigen Studien von BRANDT eine mittelfristige Interessensförderung<sup>[323]</sup>, weitere Erkenntnisse von ENGELN und SCHARFENBERG belegen, dass insbesondere die emotionale Komponente (als Teil des aktuellen Interesses) insbesondere durch das selbstständige Experimentieren gefördert werden kann<sup>[324, 325]</sup>. Wichtige Faktoren bei der Kursgestaltung sind nach PAWEK<sup>[319]</sup>, und GLOWINSKI<sup>[322]</sup> die Experimente, Authentizität, Verständlichkeit und Betreuung.

Insgesamt besitzen Schülerlabore aufgrund dieser Merkmale und dem starken Anschluss an Forschungsinstitute besondere Möglichkeiten für die Vermittlung aktueller Themengebiete der Naturwissenschaften, wie etwa der Nanowissenschaften. Wie bereits in Kap. 3.3.2 beschrieben, werden entsprechend neu entwickelte Inhalte nur sehr verzögert in die Kerncurricula der Bundesländer sowie in entsprechende Lehrwerke aufgenommen. Außerschulische Lernorte bieten das Potenzial, diese Lücke zu schließen und über die didaktische Erschließung des Themengebietetes gleichzeitig als Katalysator für den Transfer in die formale Bildung zu fungieren.

In den oben beschriebenen Projekten konnten zwar Möglichkeiten beschrieben werden, wie innerhalb des Themengebietetes „Nano“ typische curriculare Inhalte vermittelt werden können. Der Transfer neuer didaktischer Erkenntnisse in die Schulpraxis erfordert aber Zeit; darüber

hinaus haben nur ein Teil der Lehrkräfte den entsprechenden Zugang zu Fachliteratur und sind auch gewillt, sich mit entsprechenden Impulsen auseinanderzusetzen. Unter diesen Voraussetzungen ist es nicht verwunderlich, dass entsprechende Angebote aus Schülerlaboren auf Interesse seitens der Lehrkräfte stoßen, was einerseits die steigenden Besucherzahlen sowie die Ergebnisse der oben beschriebenen Umfrage betonen; hier beschrieben Lehrkräfte den Besuch eines Schülerlabors in Bezug auf die Vermittlung des Themenfeldes „Nano“ als „ziemlich interessant“ (siehe Kap. 6.1.3). Auf diese Weise können Lehrkräfte SuS forschungsnahe Einblicke ermöglichen, indem die Vermittlung von Experten übernommen wird.

Nachfolgend werden zwei Projekte präsentiert um zu illustrieren, wie das Potenzial von Schülerlaboren für die Vermittlung dem Themengebietes „Nano“ genutzt werden kann.

### ***7.2.1 Projekt 5: Nanotechnologie – ein experimentelles Kursdesign für das Schülerlabor***

In diesem Projekt soll ein Konzept für einen Schülerlaborkurs mit zusätzlichen Materialien für eine anschließende Nachbehandlung im Unterricht vorgestellt werden. Der Kurs <sup>[326]</sup> wurde für das GÖTTINGER EXPERIMENTALLABOR FÜR JUNGE LEUTE E. V. (XLAB) entwickelt <sup>28</sup>, das Konzept kann jedoch auch auf andere Lernorte übertragen werden. Da Halb- und Ganztageskurse aus mehreren Gründen (Anreise, verfügbare Zeit, Kosten, ...) zu den populärsten Formaten zählen, soll die fertige Einheit variabel auf die entsprechenden Bedürfnisse angepasst werden. Zielgruppe sind SuS aus der Sekundarstufe II. Abbildung 83 gibt einen Überblick über die gesamte Kursstruktur.

---

<sup>28</sup> Das XLAB wurde im Jahr 2000 gegründet und befindet sich auf dem naturwissenschaftlichen Campus der Universität Göttingen. Es ist Deutschlands größtes Schülerlabor <sup>[327]</sup>.



1   Einführungsseminar	2   Experimenteller Abschnitt	3   WebQuest
"Nano" in Wissenschaft und Alltag Einstieg über das Herstellen von Alltagsbe- zügen, interdisziplinärer Charakter, heutige & zukünftige Bedeutung in Alltag, Wissen- schaft und Industrie.	5.1 Synthese von ZnO-NP und Auswertung der Fluoreszenz.	Silber-Nanopartikel Antimikrobielle Wirkung von Silber- Nanopartikeln in Kosmetika. Durch- führung und Auswertung des Ex- perimentes
"Nano"-Grundlagen Größendimension, Definition, Morpholo- gien von Nanomaterialien, besondere Ei- genschaften	1.1 Isolation von TiO <sub>2</sub> -NP aus Alltagsgegenständen	5.3
Größendimension Vergleich der "Nano"-Ebene und makro- skopischer Ebene über eine REM-Aufnahme	1.2 Nasschemische Nachweise 3.1 von Zink- und Titan-Ionen	WebQuest zur Bewertung des Einsatzes verschiedener Nanomaterialien in diversen Kontexten (Nahrung, Industrie, Kosmetik, ...)
Charakteristische Eigenschaften "Nanocubes"-Experiment, Oberfläche-zu- Volumen-Verhältnis	5.2 Photokatalytischer Abbau mit photometrischer Messung	Ergebnissicherung Erstellen und Präsentieren des Handouts
	3.3 Bestimmung der Partikelgröße mit Rasterelektronenmikroskopie	Abschluss Expertendiskussion zu Nanotechnologie
	1.4 Superhydrophile Nanoschicht Superhydrophilie, Bottom-Up- Synthese, Transparente TiO <sub>2</sub> -Schicht	
	ZnO-NP an Pflanzenzellen 2.6 Verfolgung der Interaktion anhand der Fluoreszenz	

Abbildung 83 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.

### Einführungsseminar

Die im bisherigen Verlauf präsentierten Ergebnisse (siehe Kap. 6.1.3) lassen die Vermutung zu, dass SuS auf nur wenige oder sehr wenige thematische Vorkenntnisse zurückgreifen können – folglich soll als Einstieg ein Einführungsseminar gewählt werden. Dies ist dahingehend kontrovers zu diskutieren, als dass aktuelle Forschung zu Schülerlaborbesuchen (insbesondere zu erwähnen ist hierbei die Studie von STRELLER<sup>[328]</sup>) gezeigt hat, dass die Wirksamkeit durch eine thematische Vor- und Nachbereitung durch die Lehrkraft gesteigert werden kann. Auf den ersten Blick liegt somit der Gedanke nahe, vorbereitend für den Besuch im Schülerlabor die Grundlagen in der Schule erarbeiten zu lassen, um vor Ort mehr Zeit für die Experimente zur Verfügung stellen zu können. Trotz Kenntnis der Studienlage wurde in Absprache mit der Kursleiterin entschieden, die entsprechenden theoretischen Grundlagen im XLAB einzuführen. Dies geschah für den speziellen Fall im Themengebiet „Nano“ aus mehreren Gründen (die sich aus der durchgeführten Studie ableiten, siehe Kap. 6.2.3):

1. Viele Lehrkräfte schätzen ihre fachlichen Grundlagen zu diesem Thema als gering ein. Somit fühlen sie sich möglicherweise nicht in der Lage, entsprechende Inhalte zu vermitteln (oder können es ggf. sogar nicht).
2. Eine durchaus wahrscheinliche Motivation für den Besuch des Schülerlabors und die Wahl dieses Kurses ist der Wunsch, das Thema „Nano“ von Experten vermitteln zu lassen. Eine „Rückverlagerung“ in den eigenen Unterricht liefe dieser Motivation entgegen.
3. Durch eine Einführung vor Ort können behandelte Konzepte unmittelbar im Anschluss experimentell überprüft bzw. veranschaulicht werden. Neben der inhaltlichen Anbindung fördert der alternierende Wechsel von Theorie und Versuchen zudem auch die Motivation der Kursteilnehmer<sup>[329]</sup>.

4. Lehrkräften wird während der Vermittlung des Themengebietes im Schülerlabor durch Experten eine praxiserprobte Möglichkeit präsentiert, wie das Thema „Nano“ eingeführt werden kann. Dieses Wissen können sie für zukünftige Jahrgänge nutzen oder an Kolleginnen und Kollegen weitergeben.

Auf besonderen Wunsch der Lehrkräfte (bspw. um Zeit bei einem Halbtagskurs einzusparen) können entsprechende Materialien im Vorfeld an Schulen herausgegeben werden – im Regelfall werden die folgenden Inhalte allerdings am XLAB vermittelt:

- Bedeutung und interdisziplinärer Charakter der Nanowissenschaften (LL1, LL2),
- die nanoskalige Größendimension (LL3),
- Morphologien von Nanomaterialien und nanostrukturierten Materialien (LL4),
- das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (LL5),
- Quanteneffekte und Quantum Dots (LL6),
- einfache und wissenschaftliche Charakterisierungsmethoden (Tyndall-Effekt, REM, Fluoreszenzmikroskopie, LL6)
- Synthesestrategien (Top-Down und Bottom-Up, LL6) sowie
- Alltagsanwendungen und –anschlüsse (LL8).

Das XLAB versteht sich als Brücke zwischen Schule und Hochschule; das Seminar bzw. der PowerPoint-Vortrag weist dabei bewusst einen gewissen Vorlesungscharakter. Dennoch sollen ausreichend Arbeitsaufträge für die SuS eingearbeitet werden, um die mitgebrachte Motivation zu erhalten und die Eigenaktivität zu steigern. Die entsprechenden Materialien finden sich im Anhang (A3.14).

### **Experimenteller Part**

Ein hoher Anteil an selbstständigem Experimentieren ist essentieller Bestandteil des XLABs. Für die inhaltliche Auswahl kann hierbei die besondere Gestaltungsfreiheit außerschulischer Lernorte genutzt werden. Das wesentliche (fachliche) Ziel des Besuchs des Schülerlabors und damit auch des Kurses ist es, einen breiten und authentischen Einblick in das Themenfeld der Nanotechnologie zu erhalten. Somit soll in diesem Projekt keine thematisch auf einen Kontext fokussierte Unterrichtseinheit, sondern ein breit gefächertes Einblick in ein aktuelles Forschungsfeld mit vielfältigen experimentellen Zugängen sowie hoher Alltagsanbindung entwickelt werden. Im Fokus sollen eine hohe Eigenaktivität der SuS und insbesondere das (freie) Experimentieren in Kleingruppen stehen.

In schulisch ausgelegten Projekten wurde der Fokus aus thematischen und finanziellen Gründen oftmals auf ein Nanomaterial gelegt. Die Ausstattung und Ausrichtung des XLAB ermöglicht es, mit Titandioxid-, Zinkoxid-Nanopartikeln sowie nanostrukturierten Silica-Materialien verschiedene Stoffklassen (mit ihren entsprechenden Möglichkeiten) in einem Kurs zu untersuchen. Für die Gestaltung des vorliegenden Kurses konnten somit die aussagekräftigsten Inhalte

aus den bisher vorgestellten Projekten 1-4 verwendet werden, um vielfältige Einblicke in das Thema zu ermöglichen und für die Lehrkräfte ebenso viele Anknüpfungspunkte für den anschließenden Unterricht zu bieten.

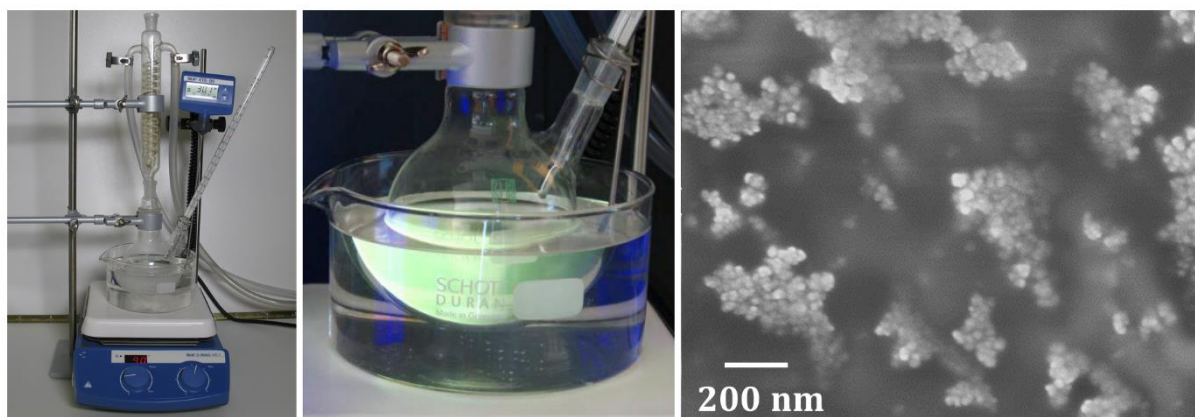
Zusätzlich wurden die Experimente bislang in einigen Fällen für den Einsatz im Chemieunterricht vereinfacht, da die Verwendung komplexerer Aufbauten vermieden werden sollte. Im XLAB wird mit Einblicken in naturwissenschaftliche Arbeitsweisen eine andere Zielsetzung verfolgt, sodass andere Voraussetzungen gelten. Wenn aus dem erhöhten Aufwand einer komplexeren Apparatur eine signifikante Verbesserung des Experimentes bzw. Produktes resultiert, wurde dieser für das vorliegende Konzept gewählt. Ein Beispiel hierfür ist die Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln unter Reflux (Experiment 5.1), welche stabilere Partikel bildet, als im Becherglas (Experiment 2.1). Andere Experimente werden um neue Aspekte erweitert; beispielsweise bietet eine photometrische Auswertung des Abbaus von Methylenblau in Experiment 1.3 und 2.5 eine quantitative Auswertung des photokatalytischen Abbaus. Zudem verfügt das XLAB über ein Fluoreszenzmikroskop, welches qualitativ höherwertige Betrachtungen ermöglicht, als in Experiment 2.6 dargestellt ist. Zudem besteht eine Kooperation mit dem INSTITUT FÜR MATERIALPHYSIK der Universität Göttingen, wodurch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von synthetisierten Nanomaterialien erhalten werden können (LL6).

### **Experiment 5.1: Herstellung und Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln (Schülerlabor)**

*Geräte und Chemikalien:* Ethanol (99 %), Natriumhydroxid-Plätzchen (NaOH), Zinkacetat-Dihydrat, Magnetrührer, Rückflusskühler, 250 mL Zweihalsrundkolben, Becherglas, Thermometer mit Schliff, Stativmaterial, Ölbad, UV-Handlampe (bspw. Herolab UV-16 L).

*Versuchsdurchführung:* Zunächst wird eine ethanolische Natriumhydroxid-Lösung (0,2 M) hergestellt, indem 0,28 g Natriumhydroxid-Plätzchen in 35 mL Ethanol bei 40 °C unter stetigem Rühren in einem Becherglas gelöst werden. Parallel dazu werden in einem Zweihalsrundkolben 2,2 g Zinkacetat-Dihydrat in 100 mL Ethanol 10 Minuten bis zum vollständigen Lösen des Feststoffes unter Rückfluss bis zum Sieden erhitzt und anschließend abgekühlt (siehe Abbildung 84 links). Sobald die Temperatur der Lösung 60 °C beträgt, wird langsam die ethanolische Natriumhydroxid-Lösung zugegeben. Dabei wird die Lösung unter UV-Licht betrachtet.

*Beobachtung:* Unter UV-Licht zeigt die entstehende klare Lösung eine gelb-grüne Fluoreszenz (siehe Abbildung 84 mitte). Abbildung 84 (rechts) zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Zinkoxid-Nanopartikel nach einer Woche Kristallwachstum.



**Abbildung 84** – Links: Versuchsaufbau zur Herstellung von Zinkoxid-Nanopartikeln; Mitte: Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln unter UV-Licht. Rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Zinkoxidpartikeln nach einer Woche Kristallwachstum.

*Auswertung und Abgrenzung zu Experiment 2.1:* Bei der Reaktion von Zinkacetat-Dihydrat mit Natriumhydroxid in Ethanol werden Zinkoxid-Nanopartikel durch eine Fällungsreaktion gewonnen (analog zu Experiment 2.1). Durch den vorgeschlagenen Aufbau kann einerseits über das Thermometer die Temperatur genauer kontrolliert werden und andererseits wird Zinkacetat-Dihydrat durch das Sieden unter Reflux schneller gelöst, als im Becherglas. Darüber hinaus sinkt das Risiko, dass (schwer sichtbare) Zinkacetat-Dihydratkristalle in der Lösung verbleiben, die dann zum einen nicht für die Reaktion zur Verfügung stehen und zum anderen als Kristallisationskeime für entsprechendes Partikelwachstum fungieren können. Beide Aspekte sind einem gleichmäßigen Wachstum von Nanopartikeln und ihrer Stabilität abträglich. Entsprechend zeigt sich, dass bei der hier vorgestellten Synthese deutlich weniger oder sogar keine Kristalle nach der Reaktion an der Gefäßwand zu erkennen sind und die Zinkoxid-Nanopartikeldispersion auch langzeitstabiler ist.

### **Experiment 5.2: Photometrische Messung des Abbaus von Methylenblau (Schülerlabor)**

Anknüpfend an die in den Experimenten 1.3 und 2.5 vorgestellten Versuche zum photokatalytischen Abbau eines organischen Farbstoffes mit Titandioxid- oder Zinkoxid-Nanopartikeln kann die Auswertung vertiefend über entsprechende photometrische Messungen durchgeführt werden. Hierdurch kann die Reaktion quantitativ ausgewertet, die Katalyseleistung berechnet und eine Methode der Analytik eingeführt werden.

*Geräte und Chemikalien:* Analog zu Experiment 1.3 bzw. 2.5, zusätzlich Photometer mit Küvetten und (wenn Titandioxid-Nanopartikel als Photokatalysator verwendet wird) Zentrifuge mit passenden Zentrifugengläsern.

*Versuchsdurchführung:* Photokatalytische Reaktionen wie in Experimenten 1.3 und 2.5 beschrieben werden durchgeführt. An ausgewählten Messzeitpunkten (etwa alle 5 oder 10 Minuten) werden Proben aus den Bechergläsern entnommen.

Vor der Verwendung im Photometer müssen die Dispersionen ggf. vorbereitet werden. Um die Dispersion von Titandioxid-Nanopartikeln von der Methylenblau-Lösung zu trennen, wird diese in ein Zentrifugenglas gegeben und bei möglichst hoher Drehzahl für wenige Minuten zentrifugiert, bis sich der weiße Feststoff unten abgesetzt hat. Die klare Lösung wird abdekantiert. Bei einer Zinkoxid-Nanopartikeldispersion mit sichtbaren Kristallen wird ähnlich verfahren; zeigt sie hingegen keine Trübung oder Kristalle, kann sie ohne weitere Behandlung verwendet werden.

Das Photometer wird über die Software mit demin. Wasser geeicht; mit der Ausgangslösung wird anschließend das Absorptionsmaximum bestimmt. Anschließend werden die entnommenen Proben im Bereich des Absorptionsmaximums gemessen und in ein Diagramm eingetragen.

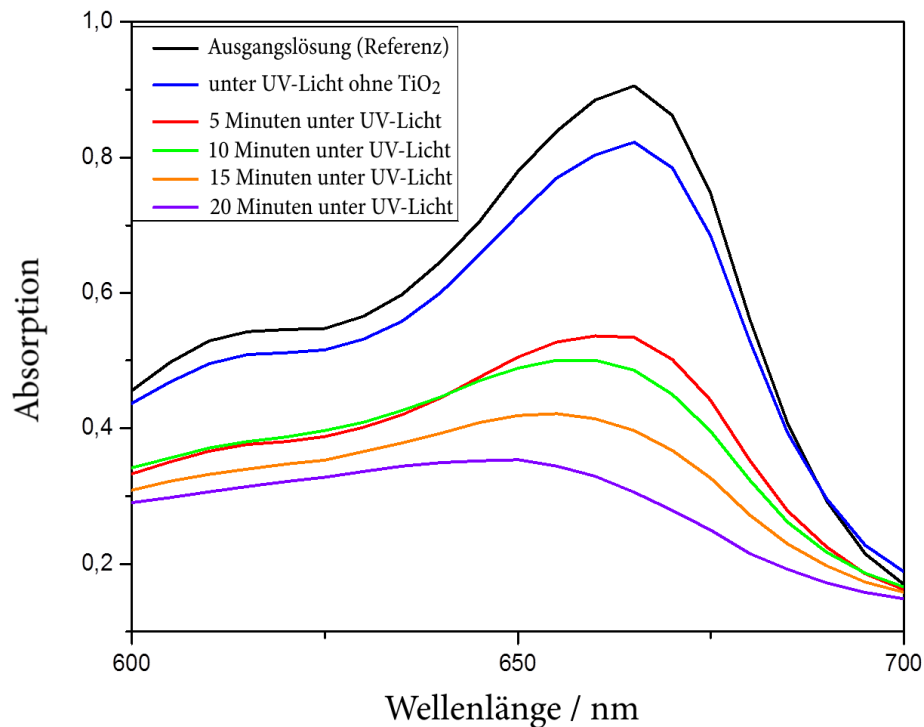


Abbildung 85 – VIS-Spektrum einer Methylenblau-Lösung zu verschiedenen Messzeitpunkten während des photokatalytischen Abbaus.

*Beobachtung:* Das Absorptionsmaximum von Methylenblau wird bei 665 nm beobachtet. In den Messungen wird ein Diagramm ähnlich wie Abbildung 85 erhalten.

*Auswertung:* Der graphischen Auftragung der können SuS auf einfache Weise Informationen über den Reaktionsverlauf entnehmen. Die Methylenblau-Konzentration kann anschließend quantitativ über das Lambert-Beer'sche Gesetz berechnet werden.

$$\varepsilon \cdot c \cdot d = -\lg \frac{I}{I_0}$$

Tabelle 25 zeigt mögliche Messwerte, die je nach Konzentration der Methylenblau-Lösung und Menge an eingesetztem Katalysator erhalten werden können:

Tabelle 25 – Beispiel einer photometrischen Messung; verschiedene Absorptionswerte.

Lösung	Absorption bei 665 nm
Ausgangslösung (Referenz)	0,9076
ohne Titandioxid 20 min UV-Licht	0,8255
5 Min UV-Licht	0,5332
10 Min UV-Licht	0,4839
15 Min UV-Licht	0,3969
20 Min UV-Licht	0,3049

Anhand einer Eichkurve oder eines Umrechnungsfaktors können anschließend auch die Konzentration und somit die Abbaurrate pro Minute ermittelt werden <sup>[330]</sup>. Dies ist aufgrund der Komplexität jedoch nur für leistungsstarke Lerngruppen empfehlenswert.

### **Auswertung, Ergebnissicherung und Anschluss**

Eine erste Zwischenauswertung der Ergebnisse findet vor der Mittagspause statt, damit frühzeitig auf Rückfragen der SuS eingegangen und Impulse für die weitere Arbeit nach der Mittagspause gegeben werden können. Die zweite und abschließende Auswertung findet nach der experimentellen Phase statt; sie dient gleichzeitig auch als Ergebnissicherung.

Eine vertiefte Fokussierung auf die Bewertung des Einsatzes von Nanotechnologie (und damit auch die Förderung der prozessbezogenen Kompetenzbereiche) kann je nach Format entsprechend gestaltet werden. Hier bietet es sich (insbesondere bei Halbtageskursen) an, die wichtigsten Fragen zu Experimenten im Schülerlabor abzuschließen und in der Schule weitere Experimente und Kontexte zu behandeln oder eine vertiefte Auswertung vorzubereiten <sup>[307]</sup>. Somit

kann einerseits viel Zeit zum Experimentieren verwendet und andererseits potenziell die Wirksamkeit bzw. Nachhaltigkeit des Besuchs im Schülerlabor gesteigert werden <sup>[328]</sup>.

Ganztageskursen bieten hingegen mehr Zeit für eine vertiefte Auswertung; diese kann bspw. in einer Diskussion über den Einsatz von Nanomaterialien oder im Rahmen eines WebQuests erfolgen. Ein auf die Gegebenheiten des XLAB angepasstes WebQuest wurde entsprechend zu der Verwendung von Silber-Nanopartikeln entwickelt; im Folgenden sollen hieraus ausgewählte Inhalte vorgestellt werden.

### **WebQuest: „Mit Nanosilber gegen Bakterien“ - Antimikrobielle Silber-Nanopartikel in Alltagsgegenständen**

Silber ist einigen SuS aus dem Alltag oder aus der Werbung bekannt als Mittel gegen Bakterien und andere Mikroben; neben Kühlschränken, Funktionswäsche, Pflastern werden insbesondere Kosmetika mit Silber intensiv beworben (LL2, LL8). Ein Beispiel ist die Pflegeserie „Silver Protect“ von NIVEA (BEIERSDORF AG), welche etwa Aftershaves, Rasiergele und insbesondere Deodorants umfasst <sup>[331, 332]</sup>. Bei den wirksamen Bestandteilen handelt es sich um Silber-Nanopartikel, was durch entsprechende Messungen von GOETZ bestätigt wurde <sup>[333]</sup>. Somit bieten Silber-Nanopartikel vielerlei Anchlüsse an die Lebenswelt von SuS, auch wenn ihnen dies möglicherweise nicht häufig bewusst ist.

Nachfolgend soll die antimikrobielle Wirksamkeit dieser Partikel illustriert werden. Hierzu wird ein einfaches Experiment mit Silber-Nanopartikeln aus Alltagsmaterialien im Schülerlabor durchgeführt.

### **Experiment 5.3: Antimikrobielle Wirkung von Silber-Nanopartikeln**

*Geräte und Chemikalien:* Zwei Petrischalen, Becherglas, Glasstab, Nivea „Silver Protect“-Deodorant oder Aftershave, helles Malzextrakt oder Zuckerlösung, Agar, demin. Wasser.

*Versuchsdurchführung:* Zur Herstellung eines Nährmediums<sup>29</sup> werden 2 g Malzextrakt und 2 g Agar im Becherglas mit dem Glasstab miteinander vermengt. 100 mL Wasser werden hinzugegeben und die Mischung kurz aufgekocht. Anschließend werden die Petrischalen 2-3 mm hoch mit der Nährlösung bedeckt. Nach dem Abkühlen werden beide Petrischalen kontaminiert; dies kann beispielsweise durch Andrücken an Türklinken, Tastaturen oder Ähnliches geschehen. Eine der beiden Nährmedien wird anschließend mit Deodorant besprüht oder der Aftershave-Lösung benetzt (siehe Abbildung 86). Die andere Petrischale dient als Blindprobe. Die Petrischalen werden für vier Tage bei Umgebungstemperatur oder für 8 Stunden in einem Inkubator abgedeckt stehen gelassen.

---

<sup>29</sup> Entsprechende Nährmedien können auf günstig erworben werden (Stückpreis ca. 1,50 €) <sup>[334]</sup>.



**Abbildung 86** – Links: Präparation der Probe mit Silber-Nanopartikeln. Rechts: Probe (links) und mit Silber-Nanopartikeln behandelte Probe (rechts) nach vier Tagen.

*Beobachtung:* Nach vier Tagen bei Umgebungstemperatur oder nach acht Stunden im Inkubator sind auf der unbehandelten Platte unterschiedliche Veränderungen zu erkennen. In der vorliegenden Probe (siehe Abbildung 86) sind grüne und rote Verfärbungen zu erkennen. Die mit Silber-Nanopartikeln behandelte Platte bleibt hingegen unverändert. Sofern sie abgedeckt aufbewahrt wird, zeigen sich auch nach zwei Wochen Aufbewahrung bei Umgebungstemperatur keine Veränderungen.

*Auswertung:* Bei den Veränderungen auf der unbehandelten Platte handelt es sich um Schimmel (schwarze Flecken) oder um Pilze (roter Punkt). Die behandelte Platte zeigt, dass Silber-Nanopartikel antimikrobiell wirken. Dieser Effekt ist auf die Bildung von Silber-Ionen zurückzuführen, welche für verschiedene Mikroben toxisch wirken <sup>[335–337]</sup>. Nanopartikel erzeugen durch ihre gesteigerte Oberfläche weitaus mehr Ionen und sind daher letztendlich weitaus biozider als größere Partikel (LL5). Somit kann Material eingespart werden <sup>[338]</sup> (LL9).

*Anmerkungen zum Einsatz im Kurs:* Von den SuS selbstständig hergeleitet werden kann nur die antimikrobielle Aktivität – die weiteren Ursachen, wie etwa die Toxizität der Ionen sowie deren gesteigerte Bildung bei Nanomaterialien werden erst im Verlauf des WebQuests erschlossen.

In dem Einstiegsexperiment konnten SuS erschließen, dass Silber-Nanopartikel antibakteriell wirken. In dem Auswertungsgespräch stellen die Lernenden aber weitere Fragen –wie genau wirken die Partikel? Wie werden sie hergestellt und wo werden sie verwendet? Und sind sie gefährlich für den Menschen? Diese Fragestellungen werden gesammelt; es ist nun die Aufgabe der SuS, sich über diese Aspekte von Silber-Nanopartikeln zu informieren. Für das hier vorgestellte Projekt könnten dies etwa sein:

1. Herstellung (Syntheseprozesse und –verfahren und Anwendungen, LL6)



2. Wirkprinzip (Größe von Nanopartikeln, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, Wirkprinzip, LL3 & LL4)
3. Anwendungsbeispiele (Nanosilber in Alltag und Industrie, Anwendungsbereiche, LL2 & LL8)
4. Risiken und Nutzen (Abwasserbelastung durch (Nano-)Silber und Einfluss auf entsprechende Biosphären, LL9)

Mithilfe der vorgegebenen Quellen erschließen die SuS ihren Aufgabenbereich. In Gruppen vergleichen sie anschließend ihre Ergebnisse und sichern diese in einem Handout. Nach der Diskussion in den Kleingruppen präsentieren sie ihr Handout abschließend im Plenum und beantworten Rückfragen anderer SuS.

Das WebQuest ist online kostenlos verfügbar <sup>[339]</sup> und ebenfalls im Anhang (A3.15) zu finden.

### **Abschlussbetrachtung**

Das vorliegende Kurskonzept verfolgt das Ziel, den SuS eine möglichst selbstständige Erarbeitung des Themengebietes „Nano“ zu ermöglichen. In methodischer Hinsicht wurde hierzu – wie in den Projekten 3 und 8 – daher das skriptbasierte Lernen ausgewählt. Dies ermöglicht nicht nur die weitgehend eigenständige experimentelle Arbeit (und gesteigerte Selbstständigkeit), sondern stellt darüber hinaus auch eine Vorbereitung auf universitäre Arbeitsweisen dar. Für weitere Argumente sei auf insbesondere auf die in Kap. 7.1.2.2 aufgeführten Aspekte verwiesen. Inwiefern diese gesteckten Ziele auch erreicht werden können, muss nun erhoben werden. Der Kurs wurde nach der theoretischen Konzeption in einem Probedurchlauf mit den Lehrkräften des XLAB erstmals durchgeführt. Auf dieser Basis des Feedbacks wurde der Kurs anschließend optimiert und nochmals erweitert – allerdings sind Lehrkräfte und SuS kaum vergleichbare Lerngruppen. Eine entsprechende erste Evaluation mit Schülergruppen und die Übernahme in das Programm des XLAB sind für die nahe Zukunft vorgesehen.

Insgesamt zeigt das Konzept eine der vielen Möglichkeiten, das Thema „Nano“ in Schülerlaboren aufzugreifen und theoretische Einblicke sowie insbesondere entsprechende experimentelle Zugänge innerhalb eines Tages- oder Halbtagesformats anzubieten. Die Versuche reichen dabei von der Isolation und Herstellung von Titandioxid- sowie Zinkoxid-Nanomaterialien über entsprechende Nachweise und Charakterisierungsmöglichkeiten bis hin zu der Untersuchung von entsprechenden Eigenschaften und potenziellen Anwendungen. Dies stellt jedoch nur einen Vorschlag dar; über den Tageskurs hinaus bieten sich weitere Möglichkeiten, das Thema „Nano“ vertiefend zu behandeln. Für die Zukunft geplant ist daher die Einführung eines mehrtägigen Kursangebotes (bspw. eine Summer School), wodurch sich viele Möglichkeiten ergeben, das Thema „Nano“ vertieft zu behandeln. Ein entsprechendes Konzept zu nanostrukturierten Materialien wird in Projekt 7 (Kap. 7.2.3) beschrieben.

## 7.2.2 Projekt 6: Synthese von Nanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor<sup>30</sup>

In diesem Projekt wird das bekannte Leidenfrost-Phänomen des „tanzenden“ Tropfens auf einer heißen Oberfläche genutzt, um in einer einfachen Synthese Nanopartikel im wässrigen Milieu herzustellen sowie zu charakterisieren. In dem sogenannten Leidenfrost-Reaktor können in einfachen Experimenten verschiedene Nanomaterialien erzeugt werden, was erstmals von RAMZY ABDELAZIZ und MADY ELBAHRI fachwissenschaftlich beschrieben wurde<sup>[342]</sup>. In Kooperation mit STEFAN SCHWARZER wurde dieses Phänomens fachdidaktisch aufgearbeitet – gemeinsam wurden entsprechende experimentelle Zugänge zu diesem Themengebiet für Schule und insbesondere das Schülerlabor des IPN (KLICK!LABOR) entwickelt, welche nachfolgend vorgestellt werden sollen.

### 7.2.2.1 Nanotechnologie im Leidenfrost-Reaktor

Wird ein Wassertropfen auf eine Oberfläche gegeben, die eine deutlich höhere Temperatur aufweist als den Siedepunkt des Wassers, beginnt der Tropfen, sich schnell und unkontrolliert zu bewegen<sup>[343]</sup>. Einigen SuS ist dieser Effekt aus dem Alltag bekannt, wo dieses Phänomen beispielsweise auf einer heißen Bratpfanne zu sehen ist. 1756 hat JOHANN GOTTLÖB LEIDENFROST erstmals dieses später nach ihm benannte Phänomen beschrieben<sup>[344, 345]</sup>, das auch Hände beim Eintauchen in flüssiges Blei<sup>[346]</sup> oder flüssigen Stickstoff spektakulär aber nur kurzfristig vor Verbrennungen bzw. Erfrierungen schützt sowie Trockeneis auf glatten Oberflächen gleiten lässt. Der Leidenfrost-Effekt wird in der Schule in der Regel nicht eingehender behandelt, allenfalls findet er im Physikunterricht der Mittelstufe und in der didaktischen Literatur unter der Thematik Wärmeleitung anekdotische, flüchtige Erwähnung<sup>[347]</sup>. Sein Potenzial für das Schülerlabor, das in diesem Projekt verdeutlicht werden soll, besteht in der Möglichkeit des Verbindens von physikalischen Grundlagen mit besonderen Reaktionsbedingungen, den daraus resultierenden Materialeigenschaften wie Wärmeleitung auf der einen Seite sowie den gleichzeitig auftretenden besonderen Bedingungen in chemischen Systemen auf der anderen Seite. Konkret ausgedrückt können die besonderen chemischen Bedingungen im Leidenfrost-Tropfen mit einer einfachen Synthese von Nanopartikeln in Bezug gesetzt werden.

Die in den folgenden Experimenten erläuterten chemischen Zusammenhänge können im Rahmen klassischer Unterrichtsthemen, wie Ionisierung und Fällungsreaktionen, angesprochen werden. Es bieten sich ferner lohnenswerte Anknüpfungspunkte an neue Technologien und vielfältige Förderungsmöglichkeiten der verschiedenen Kompetenzbereiche. Der Kompetenzbereich Bewertung kann bei der Diskussion von Chancen und Risiken, z.B. bei der in diesem

---

<sup>30</sup>Die Inhalte von Projekt 6 (Kap. 7.2.2) wurden vom Autor zusätzlich in den Fachzeitschriften PRAXIS DER NATURWISSENSCHAFTEN – CHEMIE IN DER SCHULE<sup>[127]</sup> und CHEMIE KONKRET<sup>[340]</sup> veröffentlicht bzw. eingereicht. Eine weitere Veröffentlichung befindet sich in Vorbereitung<sup>[341]</sup>. Mit freundlicher Genehmigung der Verlage (siehe Anhang A4.3) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

Beitrag angeführten „grünen“ Technologie bei minimalem Einsatz von Chemikalien in einem wässrigen Milieu, Anwendung finden.

### 7.2.2.2 Das Leidenfrost-Phänomen

Typisch für das Leidenfrost-Phänomen sind kreisförmige Bewegungen, die insbesondere dann auftreten, wenn der Tropfen das erste Mal auf die heiße Oberfläche trifft oder sein Dampfpolster bei einer seiner Bewegungen einbüßt. Fachaufsätze beschreiben die Ursachen der Antriebskraft des Tropfens auch als eine Folge von Ausdehnung und Verdampfen der stark erhitzten Flüssigkeit, um genauer zu sein, als Resultat der Eigenschaftsänderungen der überhitzten Kontaktzone (siehe Abbildung 87) zwischen dem Tropfen und der Oberfläche <sup>[342]</sup>.



Abbildung 87 – Schematischer Aufbau eines Leidenfrost-Tropfens.

Diese isolierende Dampfschicht ist auch als Grund für den verzögerten Verdampfungsvorgang des Tropfens zu sehen, da die direkte Wärmeleitung verhindert wird. In Zeitlupe und mit einem professionellen Kontaktwinkelmessgerät betrachtet, ist die kurzfristige Berührung (Abbildung 88 b) mit dem sich anschließenden „Schwebezustand“ (Abbildung 88 c) des Tropfens zu erkennen.

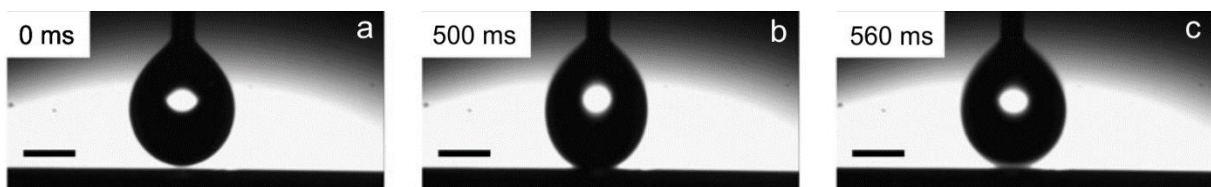


Abbildung 88 – Ein durch eine Nadel in Position gehaltener Wassertropfen trifft auf eine 250 °C heiße Oberfläche aus Aluminium <sup>[342]</sup>.

Für das Auftreten dieses Effekts des gleitenden Tropfens wird dabei eine Temperaturdifferenz zwischen Flüssigkeit und Oberfläche benötigt; bezogen auf Wasser oder verdünnte wässrige Lösungen wird diese Temperatur als Leidenfrost-Temperatur bezeichnet. Sie ist zum einen materialspezifisch und zum anderen von diversen weiteren Faktoren abhängig, was gegenwärtig immer noch in der Fachwissenschaft diskutiert wird. Bei Betrachtung des gleichen, flüssigen Mediums kommt der Oberflächenbeschaffenheit, d. h. ihrer Rauheit und der damit verbundenen Benetzungsfähigkeit <sup>[348]</sup>, eine bedeutende Rolle zu. Verallgemeinert lässt sich sagen, dass die

Leidenfrost-Temperatur vor allem vom Oberflächenmaterial abhängt, auf dem der Tropfen erhitzt wird. Für die in diesem Projekt angeführten Synthesen wird als Material Aluminium verwendet. So ergibt sich eine ungefähre Temperatur von 250 °C, bei der ein Leidenfrost-Effekt beobachtet wird. Die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden bei einer Temperatur von 300 °C durchgeführt, um in jedem Fall einen erfolgreichen Versuchsverlauf zu gewährleisten.

Nicht nur die Leidenfrost-Temperatur stand bis jetzt im Fokus eingehender Untersuchung, sondern auch das Temperaturprofil in einem „Tropfen-Reaktor“. Dieses ist insbesondere für eine Charakterisierung der für die folgende Reaktion in der Kontaktzone herrschenden Reaktionsbedingungen von Interesse. Abbildung 89 zeigt das mit einer Wärmebildkamera aufgenommene Profil. Bekanntlich ist Wasserdampf ein schlechter Wärmeleiter und in Verbindung mit der einhergehenden Abkühlung beim Verdampfungsvorgang stellt sich ein beobachtbarer Temperaturgradient mit einer überhitzten Zone direkt an der flüssig/gasförmigen Grenzfläche ein <sup>[342]</sup>.

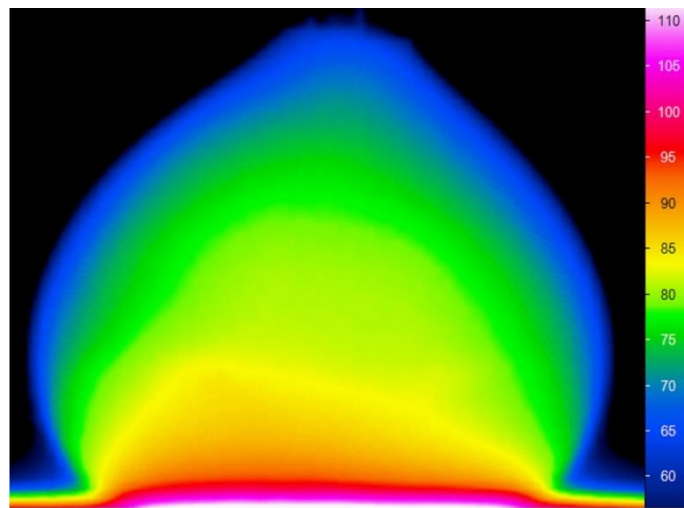


Abbildung 89 – Temperaturprofil eines erhitzten Wassertropfens.

In dem Wärmebild ist außerdem zu erkennen, dass der Tropfen selbst im Mittel eine Temperatur im Bereich von ca. 70 – 80 °C annimmt <sup>[349]</sup>. Das folgende Experiment 6.1 soll SuS ermöglichen, diese besonderen Bedingungen nachzuvollziehen.

### Experiment 6.1: Kontaktwinkelmessung eines Leidenfrost-Tropfens

Mittels einer einfachen Kontaktwinkelmessmethode für den Einsatz im Schülerlabor (Abbildung 90) ist eine Feststellung der Eigenschaftsänderung der erhitzten Oberfläche bis hin zur Beobachtung des Schwebezustandes eines Wassertropfens möglich. Unter Einsatz einer handelsüblichen Fotokamera, einer Spritze mit Kanüle, einem Stativ, einer Aluminiumplatte und der Freeware IMAGEJ <sup>[350]</sup> wird das Benetzungsverhalten in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur festgestellt. Der Tropfen wird dabei durch eine Kanüle in Position gehalten.

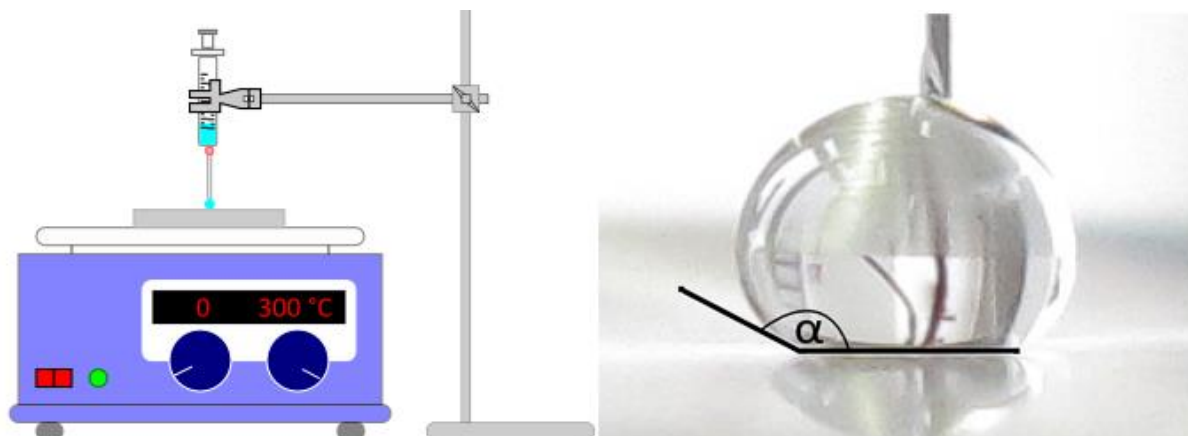
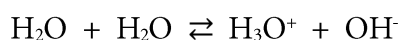


Abbildung 90 – Links: Vereinfachter Aufbau zur Beobachtung von Benetzungsverhalten und Kontaktzone eines Leidenfrost-Tropfens auf einer heißen Oberfläche; Rechts: Kontaktwinkelmessung an einem solchen Wassertropfen.

Mit der vorgeschlagenen Methode können an einem Leidenfrost-Tropfen Winkel in einer Größenordnung von bis zu  $160^\circ$  ermittelt werden. Eine ausführliche Anleitung zu diesem Versuchsteil mit Bezugnahme auf das dargestellte Temperaturprofil findet sich im Anhang (A3.16). Ebendort finden sich auch Arbeitsmaterialien, die die SuS zur Auswertung durchführen.

### 7.2.2.3 Chemie im Leidenfrost-Reaktor

Wasser, das einer raschen Phasenänderung, z.B. von flüssig zu gasförmig unterworfen wird, kann sich verstärkt selbst ionisieren (Autoprotolyse):



FARADAY beschrieb dieses Verhalten bereits in seinem dreiteiligen Werk *EXPERIMENTAL RESEARCHES IN ELECTRICITY* <sup>[351]</sup>. Verstärkte Ionisierung von Wasser wird als natürliches Phänomen nicht nur im besonderen Maße an Wasserfällen <sup>[352]</sup>, sondern auch in Meeresnähe <sup>[353]</sup> gemessen.

Die Ionisation, die mit einer Ladungsseparierung einhergeht, kann ebenfalls im Leidenfrost-Tropfen beobachtet <sup>[342]</sup> und anschaulich durch Leitfähigkeitsmessungen oberhalb und innerhalb des Wassertropfens nachvollzogen werden. Dies geschieht bei entsprechend hohen Temperaturen ab  $250^\circ\text{C}$  und unter Berücksichtigung der bereits erwähnten Materialabhängigkeiten. Zunächst tritt dabei positive Ladung oberhalb des Tropfens auf, wie in einem Video veranschaulicht wird <sup>[354]</sup>. Ferner kann im Schwebezustand, wenige  $100\ \mu\text{m}$  von der Grenzfläche flüssig/gasförmig entfernt, eine negative Ladung innerhalb des Tropfens gemessen werden <sup>[355]</sup>. Dieser Sachverhalt soll in einem einfachen Experiment mit Universalindikator vereinfacht dargelegt werden.

## Experiment 6.2: Bedingungen im Leidenfrost-Reaktor

*Geräte und Chemikalien:* Verdünnte Schwefelsäure ( $c = 0,1 \text{ M}$ ), Universalindikator, demin. Wasser, Heizrührer mit Metalloberfläche (z.B. IKA RH basic 2) mit Aluminiumplatte und ringförmiger Begrenzung oder Alternativen<sup>31</sup>, Spritze.

*Versuchsdurchführung:* Die Aluminiumscheibe wird auf den Magnetrührer gelegt und dessen Heizplatte auf  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  eingestellt. Nach etwa 5 Minuten Wartezeit wird das Erreichen der notwendigen Temperatur überprüft, indem einige Tropfen demineralisiertes Wasser auf die Platte gegeben werden. Im Temperaturbereich zwischen  $220 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $240 \text{ }^\circ\text{C}$  findet noch Übergangssieden statt, was sich durch ein leichtes „Zischen“ der Tropfen beim Auftreffen auf der Oberfläche bemerkbar macht. Erst wenn die Tropfen über das Aluminium gleiten, ist die Leidenfrost-Temperatur erreicht. Restliches Wasser wird verdampft oder mit einem Tuch entfernt.

Parallel werden  $10 \text{ mL}$  demin. Wasser mit wenigen Tropfen Universalindikator versetzt. Die resultierende grüne Lösung kann optional noch mit wenigen Tropfen stark verdünnter Schwefelsäure angesäuert werden, bis der Indikator sichtbar gelb umschlägt. Anschließend wird mit einer Spritze oder Pasteurpipette der Tropfen vorsichtig auf die Aluminiumplatte gegeben. Nach einer sichtbaren Farbänderung können erneut wenige Tropfen verdünnter Schwefelsäure in den Tropfen gegeben werden.

*Beobachtung:* Nach wenigen Sekunden ändert sich die Farbe des Tropfens von gelb über grün bis hin zu blau (siehe Abbildung 91).

---

<sup>31</sup> Kostengünstige Alternativen sind etwa eine ringförmige Begrenzung, bevorzugt ein Aluminium-Dichtring aus dem Kfz-Bedarf (z.B.  $\emptyset$ -Gesamt  $5,7 \text{ cm}$ ,  $\emptyset$ -Innen/Loch  $5 \text{ cm}$ , DIN 7603 Form A,  $\sim 6 \text{ €}$  online zu beziehen über z.B. eBay); geeignet sind ebenfalls Stahl-Unterlegescheiben, aus dem Baumarkt ( $\emptyset$ -Gesamt mind.  $3 \text{ cm}$ ,  $\emptyset$ -Innen/Loch mind.  $1,5 \text{ cm}$ ,  $\sim 0,15 \text{ €}$ ) oder alternativ eine Aluminiumplatte mit Begrenzungsring aus einem zugeschnittenen Aluminiumrohr.

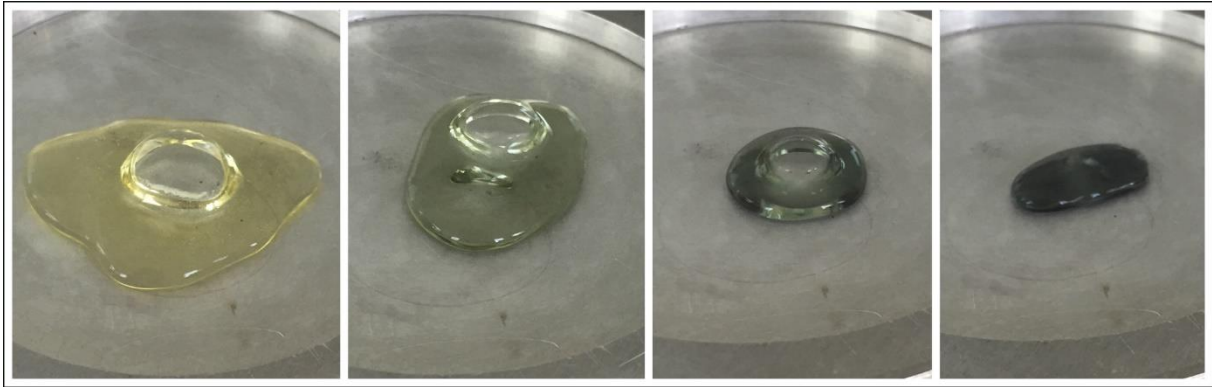


Abbildung 91 – Farbumschlag des Indikators bei fortschreitender Verweildauer auf der Aluminiumplatte auf Leidenfrost-Temperatur.

Nach Zutropfen weiterer Schwefelsäure färbt sich der Tropfen erneut gelb (siehe Abbildung 92).

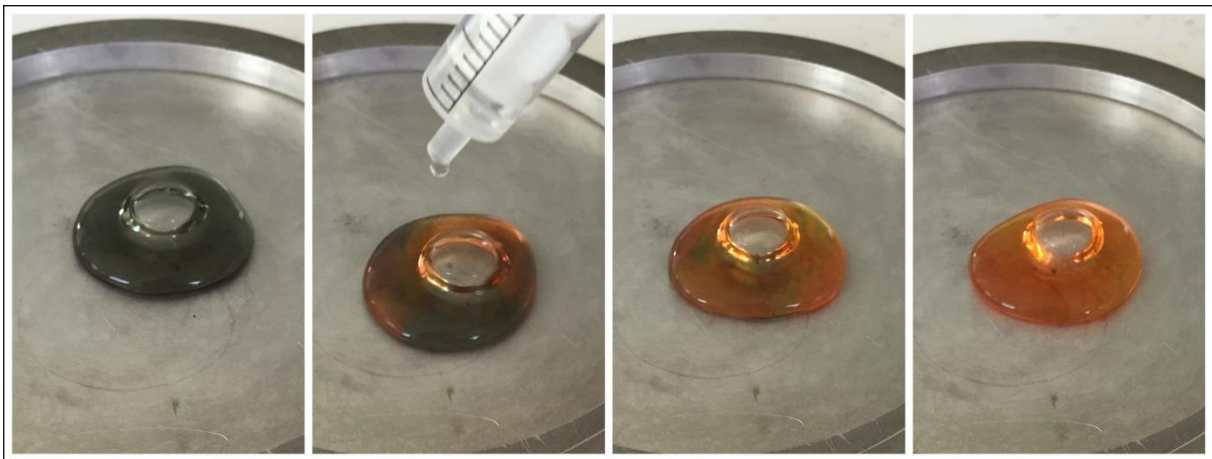


Abbildung 92 – Reversibilität der Farbreaktion durch Zugabe von verdünnter Schwefelsäure.

*Auswertung:* Durch den Kontakt mit der heißen Oberfläche kommt es zu einer verstärkten Autoprotolyse und somit auch zu einer entsprechenden Ladungstrennung. Im Leidenfrost-Reaktor bildet sich ein zunehmend alkalisches Milieu (folglich weist der entweichende Wasserdampf einen sauren pH-Wert auf). Durch weiteres Zutropfen von verdünnter Schwefelsäure kann gezeigt werden, dass es sich hierbei nicht um Konzentrationseffekte, sondern um eine Änderung des pH-Wertes handelt.

In diesem Leidenfrost-Reaktor finden die im Folgenden beschriebene Synthese zu Nanopartikeln und -strukturen statt (LL6). Die Nutzbarmachung eines Wassertropfens als chemischer Reaktor, in dem entsprechende Hydroxid-Ionen aktiv an der Reaktion zu Nanopartikeln teilnehmen, wurde erstmals 2007 von ELBAHRI beschrieben <sup>[356]</sup>. Die folgenden Experimente beschrän-



ken sich auf die Hintergründe zur Herstellung von Zinkoxid- und Gold-Nanopartikeln im wässrigen Milieu, auch wenn vielfältige Variationen an Edukten und Lösungsmitteln bekannt und Gegenstand aktueller Forschung sind <sup>[342]</sup>.

#### 7.2.2.4 Synthese und Eigenschaften von Zinkoxid-Nanopartikeln

Für die Herstellung von Zinkoxid-Nanopartikeln in Wasser zeigt die negative Ladung im Tropfen folglich an, dass überwiegend Hydroxid-Ionen vorhanden sind. In Abbildung 93 wird die Ladungsseparierung schematisch dargestellt. Es werden nur die Reaktionspartner angegeben und die Acetat-Ionen vernachlässigt. Unter der Bedingung des schnellen Verdampfens wird eine Anreicherung von Ionen an der heißen Grenzfläche gefördert und das so auftretende basische Milieu unterstützt das Abreagieren der Zink-Ionen zu Zinkoxid-Nanopartikeln. Im Sinne eines angestrebten Ladungsausgleichs wird postuliert, dass das Edukt, z.B.  $\text{Zn}^{2+}$ -Ionen bei der Darstellung von Zinkoxid-Nanopartikeln, bis zur Reaktion an der Grenzfläche konzentriert ist <sup>[342]</sup>. Da auf diesem Syntheseweg neben Zinkacetat-Dihydrat keine weiteren Chemikalien zur Erzeugung der Nanopartikel zugesetzt werden müssen, kann von einer grünen, ressourcenschonenden Chemie gesprochen werden (LL9, siehe nachfolgenden Abschnitt).

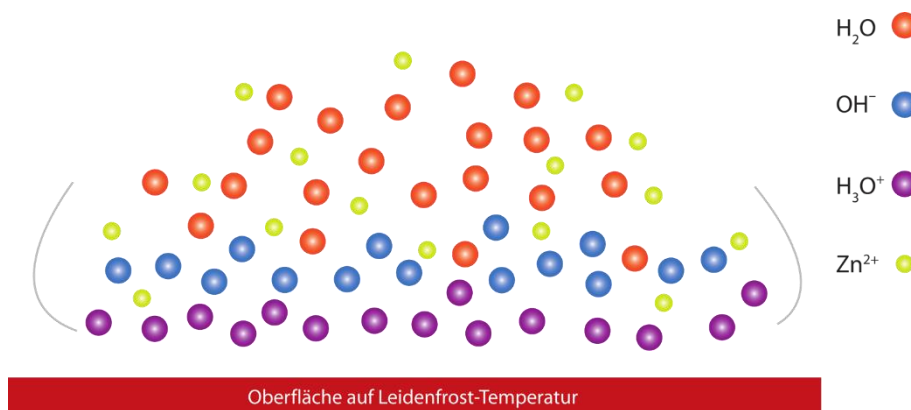


Abbildung 93 – Vereinfachte schematische Darstellung der Ionisierung und Ladungsverteilung in einem Leidenfrost-Tropfen unter Berücksichtigung der Reaktionspartner.

### Experiment 6.3: Synthese unter Leidenfrost-Bedingungen und Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln

Die Fällung von Zinkoxid erfolgt im Allgemeinen im basischen Milieu (siehe Experiment 2.1). Diese Bedingung ist durch die im Leidenfrost-Tropfen vorhandenen Hydroxid-Ionen an der überhitzten Kontaktzone gegeben. In dem nun folgenden Versuch soll eine Darstellung in einem Leidenfrost-Reaktor gezeigt werden, die außer Zinkacetat-Dihydrat und Wasser keine weiteren Chemikalien benötigt.

*Geräte und Chemikalien:* Zinkacetat-Dihydrat, demin. Wasser, Heizrührer mit Metalloberfläche (z.B. IKA RH basic 2) mit Aluminiumplatte und ringförmiger Begrenzung oder Alternativen (siehe oben), Becherglas, UV-Lampe (bspw. Herolab UV-16 L).



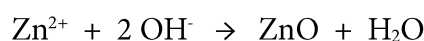
*Versuchsdurchführung:* Die Aluminiumscheibe wird auf den Magnetrührer gelegt und dessen Heizplatte auf 300 °C eingestellt und nach etwa 5 Minuten Wartezeit das Erreichen der Leidenfrost-Temperatur überprüft. Mit einer Spritze werden 15 mL einer wässrigen Zinkacetat-Lösung ( $c = 0,02 \text{ M}$ ) vorsichtig auf die Mitte der Aluminiumplatte aufgetragen (ggf. in die Aluminiumringe). Unter UV-Licht wird nun der Reaktionsverlauf verfolgt.

*Beobachtung:* Nach etwa 30 Sekunden beginnt die Lösung, unter UV-Licht gelb zu fluoreszieren (siehe Abb. 7). Die Intensität der Fluoreszenz nimmt im weiteren Verlauf der Reaktion zunächst zu, nach einiger Zeit lässt sie wieder nach. Parallel trübt sich die Lösung nach und nach ein.



**Abbildung 94 – Leidenfrost-Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln.**

*Auswertung:* Unter Leidenfrost-Bedingungen findet eine verstärkte Autoprotolyse des Wassers statt und an der heißen Grenzfläche steigt in der Folge die Konzentration an Hydroxid-Ionen. Damit kann die in Experiment 2.1 beschriebene Fällungsreaktion nun auch im wässrigen Milieu des Leidenfrost-Reaktors ablaufen <sup>[342]</sup>:



Die gelbe Fluoreszenz, die im Verlauf der Reaktion auftritt, ist auf die entstehenden Zinkoxid-Nanopartikel zurückzuführen, welche in einem Größenbereich von etwa 2 – 8 nm fluoreszieren <sup>[291]</sup>. Die detaillierten Hintergründe dieses Phänomens sind aktuell Gegenstand fachwissenschaftlicher Forschung und noch nicht abschließend geklärt; in Kap. 7.1.2.3 wird eine Möglichkeit beschrieben, diese Eigenschaft auf schulischer Verständnisebene mit Hilfe eines vereinfachten Energiestufenmodells zu vermitteln.

Das Erlöschen der Fluoreszenz und die gleichzeitig auftretende milchige Trübung der Lösung kann dadurch erklärt werden, dass die entstandenen Zinkoxid-Nanopartikel weiter wachsen (OSTWALD-Reifung) und damit den Größenbereich von 2 – 8 nm verlassen (LL4, LL5).

*Anmerkungen:* Für das Leidenfrost-Phänomen darf die Oberfläche der Aluminiumplatte keine Unregelmäßigkeiten oder eingebrannten Reste aufweisen. Um ein Einbrennen des entstehenden

Zinkoxids zu verhindern, sollte der verbleibende Tropfen nach dem Experiment mit einer Glaspipette von der Platte genommen werden. Sollten dennoch Rückstände auftreten, können diese mechanisch mit Sandpapier (1000er) oder chemisch mit stark verdünnter Salpetersäure entfernt werden.

Wird die entstehende Zinkoxid-Nanopartikeldispersion rechtzeitig aus dem Reaktor entnommen, ist sie für etwa anderthalb Stunden stabil, anschließend fallen die Partikel sichtbar aus und die Lösung trübt sich. Soll eine höhere Stabilität erreicht werden, kann alternativ eine weniger konzentrierte Zinkacetat-Lösung ( $c = 0,01 \text{ M}$ ) verwendet werden.

*Anmerkungen zum Einsatz im Schülerlabor:* Für das Schülerlabor bietet der vorliegende Schülerversuch Möglichkeiten, mehrere curricular relevante Inhalte, wie etwa Redox- und Fällungsreaktionen sowie die Autoprotolyse von Wasser, je nach Lehrplan in der Sek. I/II einzuführen oder in der Sek. II weiter zu vertiefen. In Abhängigkeit von der Leistungsstärke der Lerngruppe und dem verfügbaren zeitlichen Rahmen kann die Auswertung des Versuchs, angelehnt an das Basiskonzept Struktur-Eigenschaft, zusätzlich in unterschiedlicher fachlicher Tiefe erfolgen. Beispielsweise wird das Beschreiben der Fluoreszenz rein phänomenologisch als größenabhängige Stoffeigenschaft oder detaillierter unter Verwendung des oben bereits genannten, simplen Bändermodells betrachtet. Auch sei an dieser Stelle auf andere Kontexte <sup>[357, 358]</sup> verwiesen, in denen die Fluoreszenz bereits aus fachdidaktischer Perspektive untersucht wurde.

Das mit dem Arbeitsblatt (siehe A.3.16) zu erarbeitende Benetzungsverhalten einer Oberfläche durch Wasser ermöglicht ebenfalls eine adressatengerechte Betrachtung: Die Benetzung kann mit einer einfachen Kontaktwinkelmessung quantifiziert und in einem Folgeschritt in Abhängigkeit der Vorkenntnisse unterschiedlich vertieft erörtert werden.

Im Anschluss an die Untersuchung der fachlichen Hintergründe können weitere Eigenschaften von Zinkoxid-Nanopartikeln und dessen Anwendungen in Alltag oder Forschung erarbeitet werden. Eine solche Anwendung ist beispielsweise die Verwendung dieses Nanomaterials als fluoreszierender Biomarker (LL8) – entsprechende Materialien werden in vielen medizinisch- oder biologisch-diagnostischen Verfahren eingesetzt (bspw. *Fluorescence Imaging*, FLI). Aufgrund ihrer hohen Leuchtkraft müssen im Falle von Zinkoxid nur geringe Konzentrationen eingesetzt werden, was ggf. in einer niedrigeren Zytotoxizität im Vergleich zu anderen Leuchtmitteln resultiert. Diese Einsatzmöglichkeit kann zudem im Kontext mit weiteren Experimenten (Exp. 2.5: Photokatalytische Aktivität und Exp. 2.6: Interaktion an Zellwänden) verknüpft und vergleichend diskutiert werden. Neben Fächerübergreifen zur Biologie eröffnen dieses und weitere Experimente zahlreiche Anschlussdiskussionen zum Einsatz von Zinkoxid-Nanopartikeln in (sensiblen) Domänen, wie etwa auf Textilien, in Kosmetik und insbesondere in Lebensmitteln (LL9).

### 7.2.2.5 *Synthese und Eigenschaften von Gold-Nanopartikeln*

Neben der Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln können im Leidenfrost-Reaktor viele weitere Nanomaterialien synthetisiert werden. Insbesondere geeignet für den unterrichtlichen Einsatz sind hierbei Gold-Nanopartikel. Aufgrund der einfachen, gelingsicheren und insbesondere effektstarken Herstellung gehört letztere zu den populären Schülerexperimenten im Bereich „Nano“ – auch wenn sie aufgrund der Materialkosten vorwiegend in Schülerlaboren durchgeführt wird. Gold ist den SuS als charakteristisch glänzendes Metall bekannt. Umso erstaunlicher ist es, nicht nur für SuS, zu lernen, dass nanodimensioniertes Gold die bekannten Eigenschaften nicht mehr aufweist (LL3).

Nachdem die Synthese von kolloidalem Gold bereits erstmals 1951 beschrieben wurde <sup>[359]</sup>, erfährt insbesondere in dem vergangenen Jahrzehnt auch eine unterrichtliche Thematisierung in Schule und Schülerlabor verstärkte Aufmerksamkeit. In den verschiedenen Syntheseverfahren können Gold-Nanopartikel in den Farben Blau, Violett und Rot, über eine einfache wässrige Synthese im Becherglas, erhalten werden <sup>[360–362]</sup>. Als klassische „Goldquelle“ dient Blattgold <sup>[363, 364]</sup> oder eine Goldchlorid-Lösung <sup>[360]</sup>. Als Reduktionsmittel werden typischerweise Natriumcitrat oder auch Zitronensäure, Ascorbinsäure oder Zinkchlorid verwendet. Die direkt zu beobachtende Farbe, erklärbar über die Plasmonenresonanz, hängt dabei unmittelbar mit dem Durchmesser der Gold-Nanopartikel (blaue Partikel: > 150 nm, violette Partikel: 150 nm – 100 nm, rote Partikel: 60 nm – 5 nm) zusammen <sup>[162, 360, 365, 366]</sup>. Dabei wirken sich die eingesetzten Reduktionsmittel, die Reaktionstemperatur sowie die Reaktionszeit direkt auf die Partikelgröße des erhaltenen Produkts, deren Stabilität und somit auch die Farbe der Dispersion aus <sup>[367]</sup>. Zum Erhitzen der Lösungen kann neben einem Heizrührer, eine Mikrowelle <sup>[162, 368]</sup> eingesetzt werden, was mit einer Verkürzung der Reaktionszeit einhergeht. Des Weiteren vermag auch die reduzierende Flammezone eines Gasbrenners, die schräg von oben in eine Goldlösung getaucht wird, die beschriebenen Farben der Goldkolloide schichtweise zu erzeugen <sup>[367]</sup>.

Für den Einsatz im Schülerlabor (und auch im Chemieunterricht) wird nun eine einfache Herstellung von Gold-Nanopartikeln beschrieben, welche nicht nur mit geringerem Materialeinsatz durchzuführen ist, sondern auch ein weiteres Reaktionsprodukt hinzufügt: Eine Tetrachloridogold(III)säure-Lösung im Leidenfrost-Reaktor dient zur Synthese der Gold-Nanopartikeldispersionen, welche die beschriebenen charakteristischen Farben einnehmen und schließlich bis zum elementaren Gold reduziert werden. Dieses liegt nicht, wie schon häufig in der Literatur beschrieben <sup>[342]</sup>, als amorpher schwarzer Feststoff vor, sondern als glänzendes Gold.

#### **Experiment 6.4: Synthese von Gold-Nanopartikeln im Leidenfrost-Reaktor**

*Geräte und Chemikalien:* Tetrachloridogold(III)säure-Trihydrat (Sigma-Aldrich), Tri-Natriumcitrat-Dihydrat, demin. Wasser, Heizrührer mit Metalloberfläche (z.B. IKA RH basic 2) mit Aluminiumplatte und ringförmiger Begrenzung oder Alternativen (siehe oben), Waage, Spatel, zwei Spritzen (5 mL) oder zwei 5-mL-Messpipetten mit Peleusball.

*Hinweis:* Sollten als Alternativen zur Aluminiumplatte verzinkte Unterlegscheiben verwendet werden, können diese nach ein- oder mehrmaligem Gebrauch auf der Innenseite stark oxidiert sein. Es kann vorkommen, dass Leidenfrost-Tropfen dann nicht stabil sind und bei Berührung mit der Begrenzung verdampfen. Abhilfe schafft das Polieren mit einem feinen Schleifpapier (1000er) auf der Innenseite.

*Versuchsdurchführung:* Für eine 0,02 M Tetrachloridogold(III)-säure-Lösung werden 0,159 g Tetrachloridogold(III)-säure-Trihydrat in 20 mL Wasser gelöst. Die Lösung muss möglichst dunkel gelagert werden. Für die Tri-Natriumcitrat-Lösung wird 0,1 g Tri-Natriumcitrat-Dihydrat in 250 mL demin. Wasser gelöst. Die angegebene Menge ist ausreichend für ca. 50 Ansätze.

Parallel zum Ansetzen der Lösungen wird der Heizrührer mit aufgelegter Unterlegscheibe auf ca. 300 °C aufgeheizt. Das Erreichen der Leidenfrost-Temperatur wird mit wenigen Tropfen demin. Wasser überprüft. Nach Erreichen der Leidenfrost-Temperatur werden langsam und tropfenweise 5 mL der Citrat-Lösung in den Reaktor mit der Spritze vorgelegt und unmittelbar danach 0,4 mL der Tetrachloridogold(III)-säure-Lösung hinzugegeben. Werden die Lösungen zu schnell hinzugegossen, verpufft der Tropfen augenblicklich. Ebenfalls ist zu beachten, dass der Tropfen, bevor er vollständig verdampfen (und einbrennen) kann, mit einer Spritze oder einem Tuch entnommen werden sollte.

Es können niedrig und höher konzentrierte Lösungen verwendet werden, falls z.B. ein kleinerer Leidenfrost-Reaktor, z.B. ein Aluminium Dichtring mit kleinem Durchmesser, gewählt wird. Dabei ist lediglich das oben genannten Verhältnis der Konzentration von Tetrachloridogold(III)-säure-Trihydrat und Tri-Natriumcitrat-Dihydrat zu beachten.

*Beobachtung:* Bereits nach kurzer Zeit beginnt sich die Lösung zunächst blau, anschließend violett und schließlich rot zu verfärben. Nach weiterer Zeit scheidet sich charakteristisch glänzendes Metall an der Oberfläche des Tropfens ab. Der Tropfen wird dabei immer klarer (siehe Abbildung 95).



Abbildung 95 – Reaktionsstadien der Gold-Nanopartikel und des Goldes im Leidenfrost-Tropfen.

In jedem Reaktionsschritt können mit der Spritze oder der bereitgelegten Pipette wenige Milliliter der Gold-Nanopartikel-Dispersion zur Betrachtung bzw. als Probe entnommen oder auch zur weiteren Reaktion zurückgeführt werden (siehe Abbildung 96).

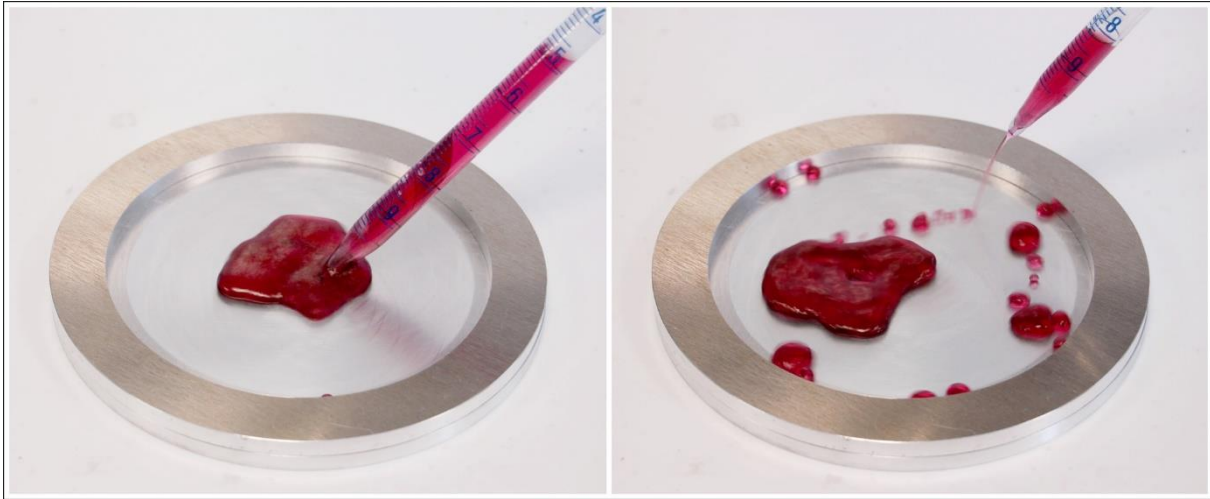


Abbildung 96 – Entnahme und Rückführung der Gold-Nanopartikeldispersion.

Auch ist es möglich, dem Leidenfrost-Tropfen demin. Wasser zuzufügen, um die Reaktion zu verlangsamen. Auf diese Weise können entsprechende Nanopartikel mit unterschiedlicher Größe erhalten werden. Abbildung 97 zeigt illustriert anhand verschieden großer Gold-Nanopartikel das Wachstum bzw. den Übergang von der Teilchenebene (submikroskopische Gold-Ionen) über die Mesoebene (Gold-Nanopartikel) bis hin zur Stoffebene (ausgefallenes Gold).



Abbildung 97 – Im Leidenfrost-Reaktor synthetisierte Gold-Nanopartikel. Illustrierter Übergang von der submikroskopischen Ebene (Gold-Ionen, links außen) über die Mesoebene (Gold-Nanopartikel, mitte) bis hin zur Stoffebene (ausgefallenes Gold, rechts).

Die Reaktion zu den roten Gold-Nanopartikeln verläuft in wenigen Minuten. Die Bildung des elementaren Goldes, unter Abnahme des Tropfenvolumens, dauert ungefähr fünf Minuten. Abschließend kann das elementare Gold mit einem Tuch aus dem geschrumpften Tropfen entnommen werden (siehe Abbildung 98).

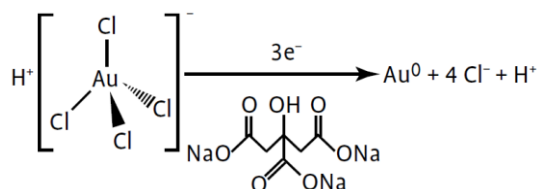


Abbildung 98 – Isoliertes Gold am Ende der Reaktion im Leidenfrost-Reaktor auf einem Baumwolltuch.

*Auswertung:* Wie in Experiment 6.2 und 6.3 beschrieben, herrscht im Leidenfrost-Tropfen ein alkalisches Milieu. Die entstehenden Hydroxid-Ionen dienen dabei auch als Reduktionsmittel und sind in der Lage, den Reduktionsprozess von sehr kleinen Mengen Tetrachloridogold(III)-säure alleinig voranzutreiben <sup>[342, 369]</sup>. Unter Einsatz eines weiteren Reduktionsmittels, wie etwa Citrat-Ionen (Cit), verläuft die Reduktion der Tetrachloridogold(III)-säure deutlich schneller und vollständiger (siehe Abbildung 99):



Die hier aufgeführte Reaktionsgleichung entstammt den Originalarbeiten von TURKEVICH und FRENS <sup>[359, 365]</sup>; allerdings ist in diesem Zusammenhang an anderer Stelle auch zu lesen, dass der genaue Ablauf der Reaktion noch nicht geklärt sei <sup>[282]</sup>. Nicht nur in der didaktischen Literatur existieren noch weitere, zum Teil stark vereinfachte Reaktionsgleichungen, welche die Reduktion der Tetrachloridogold(III)-säure beschreiben, wie bspw. <sup>[368]</sup>:



Da hierbei allerdings die Oxidation der Citrat-Ionen nur im Ansatz dargestellt wird, soll für die Auswertung innerhalb dieses Projektes die oben aufgeführte Reaktionsgleichung der Originalarbeiten herangezogen werden.



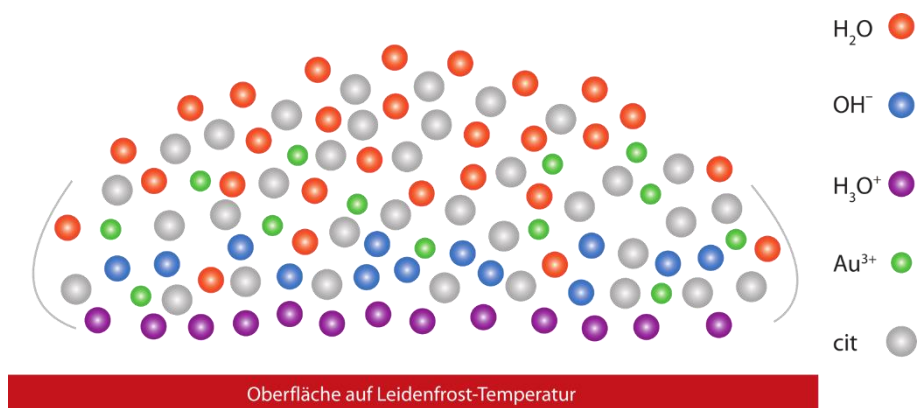


Abbildung 99 – Schematische Darstellung der Reaktionsbedingungen im Leidenfrost-Reaktor.

Über die Funktion als Reduktionsmittel hinaus lagern sich die Citrat-Ionen an die Oberfläche der Gold-Nanopartikel an, diesen somit als Stabilisatoren und vermeiden eine rasche Agglomeration der Partikel. Auf diese Weise resultieren die entsprechenden, für mehrere Tage stabilen Nanopartikel.

*Anmerkungen zum Einsatz im Schülerlabor:* Die beschriebene Synthese bietet die Möglichkeit, über Herstellung und Wachstum von Gold-Nanopartikeln Struktur-Eigenschafts-Zusammenhänge zwischen der Partikelgröße und den optischen Eigenschaften und somit einen zentralen Aspekt der Nanowissenschaften illustrativ darzustellen. Da die Farbigkeit der Dispersion direkt von der Partikelgröße abhängt, können SuS durch einfache (indirekte) Beobachtung der Farbigkeit auf das Wachstum der Partikel rückschließen und dieses verfolgen. Unterrichtlich betrachtet können somit anhand eines Versuches die besonderen Eigenschaften von nanoskaligen Materialien und die Bottom-Up-Synthesestrategie eingeführt werden. Nicht zuletzt aufgrund der hohen Anknüpfungsfähigkeit kann dieser Versuch somit auch als Einstieg in das Themengebiet der Nanotechnologie durchgeführt werden (LL6).

Die vorgestellte Synthesvariante im Leidenfrost-Reaktor erweitert die Synthese um ein weiteres Produkt auf sehr anschauliche Weise und vervollständigt somit die Reihe von Gold-Ionen zu metallischem Gold. Diesen kontinuierlichen Übergang von Ionen zu Nanopartikeln zu größeren Teilchenverbänden, welchen die SuS im Experiment auf der Stoffebene beobachten, beschreiben sie in der anschließenden Auswertung nun auf der Teilchenebene. Analog zu Kapitel 7.1.2.3 kann dabei das klassische Stoff-Teilchenkonzept derart erweitert werden, als dass dieser Übergang, in dem Stoffeigenschaften stark von der Teilchengröße abhängen, als Mesoebene bezeichnet wird. Die Thematisierung dieser Mesoebene kann somit einen Beitrag leisten, SuS für die Andersartigkeit dieses Bereiches zu sensibilisieren und damit den Übergang zum Diskontinuumsdenken zu erleichtern.

Die Synthese im Leidenfrost-Reaktor ermöglicht es zudem, die Reaktionsgeschwindigkeit durch Zugabe von Wasser nach Bedarf anzupassen und so Zwischenprodukte zum späteren Vergleich

zu entnehmen. Zuletzt ist hervorzuheben, dass die eingesetzte Menge an Goldsalz durch die geringe Größe des Tropfens im Leidenfrost-Reaktors reduziert werden kann, wodurch eine Behandlung in Schule und Schülerlabor, auch als Schülerversuch, entsprechend kostengünstiger wird.

*Hinweis:* Aufgrund der hohen Kosten für Tetrachloridogold(III)-säure-Trihydrat eignet sich dieses Experiment vorrangig für Schülerlabore, welche oftmals eine bessere finanzielle Ausstattung besitzen. Da bei der Synthese allerdings nur sehr geringe Mengen an Goldsalz benötigt werden, bieten sich unter Umständen allerdings auch Möglichkeiten für den schulischen Einsatz. Geringe Mengen Gold sind kostengünstig online erhältlich<sup>32</sup> oder können aus alten Computerbausteinen und Handys recycelt werden. In Vorbereitung durch die Lehrkraft kann hieraus mit sehr geringen Mengen Königswasser nach einer von OBENDRAUF beschriebenen Anleitung mittels Spritzentechnik Tetrachloridogold(III)-säure-Trihydrat gewonnen werden<sup>[364]</sup>. Dabei reichen 0,1 g Gold für 4 Klassen à 15 Gruppen aus.

#### 7.2.2.6 Abschlussbetrachtung

Insgesamt bietet das Leidenfrost-Phänomen auf faszinierende Weise eine neuartige, kostengünstige Synthesemethode für unterschiedliche Arten von Nanopartikeln im wässrigen Medium und dies bei geringem präparativen Aufwand. Neben den beschriebenen Darstellungen von Zinkoxid- und Gold-Nanopartikeln sind auch verschiedenartige Kupferoxid- und Silber-Nanopartikel in wenigen Minuten direkt zugänglich<sup>[342]</sup>. Hierdurch ergeben sich neben den bereits beschriebenen Anknüpfungen an die Basiskonzepte und Inhalte des Kerncurriculums zudem weitere Anwendungen und Kontexte. Somit bleibt abschließend festzuhalten, dass das Leidenfrost-Phänomen weitaus mehr didaktisches Potenzial besitzt, als die eingangs erwähnten Show-Experimente es auf den ersten Blick vermuten lassen.

---

<sup>32</sup> 0,1 g Gold sind erhältlich für 9,99 €<sup>[370]</sup>.



### **7.2.3 Projekt 7: Funktionserweiterung durch Porosität - Synthese und Eigenschaften von nanostrukturierten Materialien**

#### **7.2.3.1 Gesamtkonzept**

In den bisherigen Projekten für Schule und Schülerlabor wurden Nanopartikel aus vielen verschiedenen Materialien untersucht. Wie gezeigt werden konnte, bieten diese sehr interessante Eigenschaften und ein hohes didaktisches Potenzial. Die Vielfalt an Nanomaterialien ist jedoch nicht nur auf Nanopartikel limitiert – ganz im Gegenteil existieren vielfältige weitere Morphologien. Die bekanntesten Beispiele sind dabei die röhrenförmigen Carbon Nanotubes oder Buckminster-Fullerene als  $C_{60}$ -Nanosphären (siehe Kap. 5.3).

Seit längerer Zeit von großem wissenschaftlichen wie wirtschaftlichem Interesse sind nanostrukturierte Materialien, welche mindestens ebenso interessante Eigenschaften aufweisen, wie Nanopartikel. Einige bekannte Beispiele finden sich bereits in vielen chemischen Sammlungen (Aktivkohle, Molekularsiebe), Haushaltsgegenständen (Zeolithe in Waschmitteln) oder auch Lebensmitteln (Aktivkohle als Lebensmittelfarbe E153). Gleichzeitig werden sie insbesondere für katalytische Anwendungen und zur Stoffspeicherung und -trennung gegenwärtig intensiv beforscht. Zusätzlich zu einem Anschluss an ein aktuelles Themengebiet der Nanowissenschaften bieten diese Stoffe vielfältige Lerngelegenheiten, bei denen Inhalte wie etwa Templatierungen, Katalyse, Hydrolyse, Kondensation, Hydro- und Lipophilie und Tenside eingeführt oder gefestigt werden können. Darüber hinaus können auch entsprechende Grundlagen der Nanotechnologie (nanostrukturierte Materialien, Bottom-Up-, Top-Down-Syntheseprinzip, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, ...) hieran anknüpfend behandelt werden.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wird anhand von verschiedenen Beispielen illustriert, dass mit der (Nano-)Porosität eines Materials eine signifikante Funktionserweiterung einhergeht. Besonders interessante Perspektiven für den Einsatz im Schülerlabor bieten hierbei Silica-Materialien – wie nachfolgend gezeigt werden soll, sind sie nicht nur ungefährlich und mit günstigen Geräten und Chemikalien herzustellen, sondern bieten auch viele Anchlüsse an die Lebenswelt der SuS sowie klassische Themen des Chemieunterrichts. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten innerhalb dieses Themengebietes sowie der (teilweise) mehrere Versuchstage umspannenden Experimente eignet sich für die Vermittlung ein mehrtägiger Kurs im Schülerlabor, wie etwa die am Göttinger XLAB angebotenen Summer Schools. Ein solches Format bietet die Möglichkeit, einen vertieften Einblick in dieses moderne Themengebiet der Chemie zu erhalten und diese Materialklasse von der Synthese über die Charakterisierung bis hin zu Eigenschaften und Anwendungen in vielfältigen Schülerexperimenten zu erschließen. Die speziellen Lernziele des vorliegenden Projektes lauten:

1. Die SuS beschreiben Nanotechnologie als Forschungsfeld mit großer Bedeutung für Alltag, Wirt- und Wissenschaft (LL1, LL2).
2. Die SuS entwickeln ein genaueres Verständnis für die „Nanodimension“ und ordnen Nanomaterialien korrekt in eine Größenskala ein (LL3).
3. Die SuS beschreiben das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis als charakteristische Eigenschaft von Nanomaterialien (LL4).
4. Die SuS beschreiben das Templating als Synthesestrategie zur Erzeugung nanostrukturierter Materialien.
5. Sie beschreiben weiterhin anhand konkreter Beispiele und mit korrekten fachlichen Begriffen das Soft-Matter- und Hard-Matter-Templating zur Erzeugung von nanostrukturierten Materialien (LL4, LL6).
6. Die SuS untersuchen in Experimenten die Katalyseleistung nanostrukturierter Materialien und deuten diese anhand des gesteigerten Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses (LL4, LL5).
7. Die SuS deuten Zusammenhänge zwischen der Struktur von porösen Silica und Silikonen sowie deren Eigenschaften anhand von entsprechenden (Modell-)Experimenten (LL5).
8. Die SuS nennen Eigenschaften, Anwendungsgebiete sowie konkrete Produkte von nanostrukturierten Materialien in Alltag und Technik (LL8) und bewerten dessen Einsatz (LL9).

Im weiteren Verlauf werden die Inhalte des Kurses zu nanostrukturierten Materialien vorgestellt. Dieser Kurs ist untergliedert in die drei Abschnitte „Mesoporöse Silica“, „Nanostrukturierte Materialien“ und „Makroporöse Silikone“, welche auf einen breiten thematischen Einblick abzielen und gleichzeitig inhaltlich aufeinander aufbauen. Dieser inhaltlichen Struktur folgt auch (weitestgehend) die Gliederung des Kurses; Abbildung 100 zeigt einen Überblick des Gesamtkonzeptes mit den zugehörigen Inhalten, welche in eigenen Unterkapiteln nachfolgend vorgestellt werden.

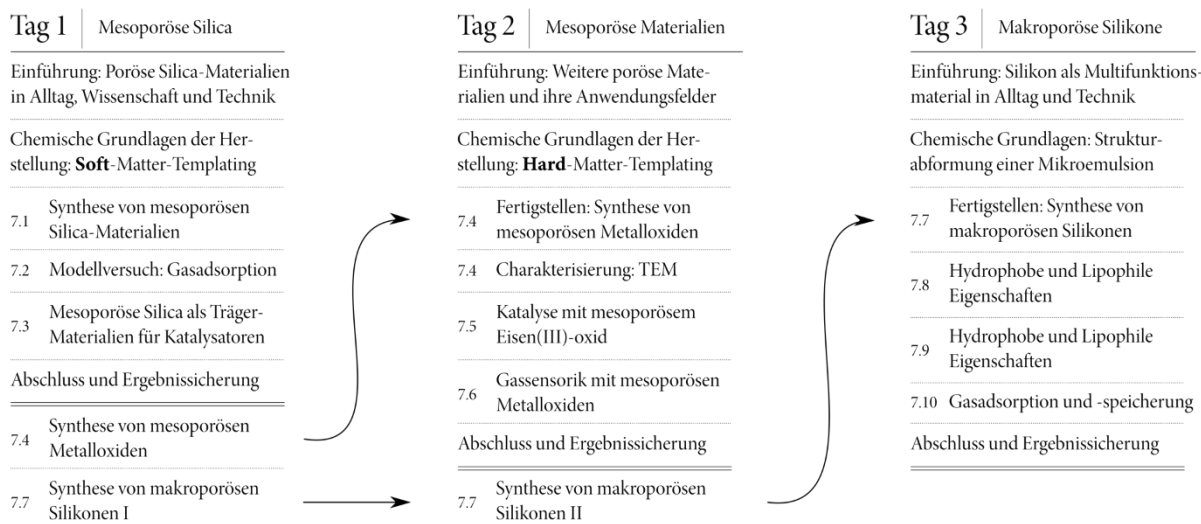


Abbildung 100 - Gesamtstruktur des Kurses und ausgewählte Inhalte der einzelnen Kurstage.

### 7.2.3.2 Tag 1: Mesoporöse Silica-Materialien<sup>33</sup>

Poröse Materialien<sup>34</sup> spielen in vielen Bereichen des Alltags, der Natur und Technik eine bedeutende Rolle, so zum Beispiel in der Stofftrennung, der heterogenen Katalyse, der Gasspeicherung und der Sensorik. Eine derzeit intensiv beforschte Materialklasse sind die erst seit knapp 20 Jahren synthetisch zugänglichen mesoporösen Silica-Materialien. Diese Materialien besitzen interessante charakteristische Eigenschaften wie hoch geordnete Porensysteme mit scharfen Porengrößenverteilungen im Bereich von 2 bis 10 nm und großen spezifischen Oberflächen bis etwa  $1000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ . Mesoporöse Silica-Materialien sind thermisch bis etwa  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  stabil und können daher als Trägermaterialien für die heterogene Katalyse oder als Feuchtesensoren in der Trocknungstechnik genutzt werden<sup>[372]</sup>. Auch in der Medizin finden sie vielfach Verwendung, unter anderem im „NANOBONE“-Projekt; hierbei dient nanoporöses Silica als Trägermatrix für die Einlagerung von Hydroxylapatit, welches die Grundlage für eine rasche Knochenentwicklung bildet<sup>[373, 374]</sup>.

Die Herstellung dieser Materialien verläuft klassischerweise in einem Sol-Gel-Prozess über templatgesteuerte Synthesen (Bottom-Up-Synthesestrategie). Hierbei lassen sich einerseits besonders viele Aspekte chemischer Kenntnisse im Bereich des Fachwissens miteinander verknüp-

<sup>33</sup> Die Inhalte dieses Kurstages (Kap. 7.2.3.2) wurden vom Autor zusätzlich in der Fachzeitschrift CHEMIE KONKRET<sup>[136]</sup> veröffentlicht. Mit freundlicher Genehmigung des Verlags (siehe Anhang A4.4) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

<sup>34</sup> Um die Vielfalt poröser Stoffe klassifizieren zu können, hat die IUPAC vorgeschlagen, poröse Materialien anhand ihres Porendurchmessers in mikroporöse, mesoporöse und makroporöse Materialien einzuteilen<sup>[371]</sup>. Mikroporöse Materialien verfügen demnach über Porendurchmesser, die kleiner als 2 nm sind, mesoporöse über solche zwischen 2 und 50 nm und makroporöse Materialien besitzen Porendurchmesser größer als 50 nm.

fen, wie beispielsweise die Hydrolyse und Kondensation; andererseits bildet das Hier verwendete Soft-Matter-Templating (siehe unten) die Basis für die Untersuchung von etwas anspruchsvolleren Syntheseverfahren (Hard-Matter-Templating, Strukturabformung einer Mikroemulsion), welche in den nachfolgenden Kurstagen verwendet werden sollen. Zudem ist die Herstellung dieser Materialien leicht realisierbar, da die Ausgangsubstanzen, wie beispielsweise Kieselsäurevorläuferverbindungen, Ammoniak und Ethanol, sowie die Synthesevorschrift einfach zu handhaben bzw. durchzuführen sind. Aus diesen Gründen wurden mesoporösen Silica für den ersten Kurstag als Einstieg in die nanostrukturierten Materialien gewählt.

### **Fachdidaktische Hintergründe: Poröse Materialien im Chemieunterricht**

Poröse Materialien bieten im Allgemeinen eine Reihe von Anknüpfungspunkten an die Lebenswelt von SuS (LL2) und werden bereits durch eindrucksvolle und aussagekräftige Experimente zu ihren Eigenschaften in den Chemieunterricht integriert. Hierzu zählen klassische Versuche zur Adsorption von Molekülen an Aktivkohle, wie die Entfärbung von Colagetränken im Chemieanfängsunterricht (LL4) oder die experimentelle Bestimmung der Adsorptionsisothermen von Essigsäure im Oberstufenunterricht. Weitere Beispiele für den Einsatz von porösen Materialien finden sich in der fachdidaktischen Literatur vor allem im Kontext der Umweltchemie und Energiespeicherung, zum Beispiel bei der Sanierung von Grundwasserschäden, der Adsorption von Schadstoffen an Gewässersedimenten, als reversible thermochemische Energiespeicher in selbstkühlenden Bierfässern, oder als Wirtmaterialien für die Gasspeicherung <sup>[372, 375–377]</sup>.

Neben den weitreichenden Alltagsbezügen, die sich über die Verwendung poröser Materialien herstellen lassen, bietet vor allem die Synthese mesoporöser silicatischer Materialien gute Möglichkeiten, chemische Fachkenntnisse zu erarbeiten bzw. anzuwenden. Hierbei können die SuS einen Einblick in die Synthesemethoden eines Forschungsgebietes der Materialchemie erhalten (LL6), die auch in der Schule realisierbar und didaktisch besonders gut reduzierbar sind. Die chemischen Grundlagen der Templatchemie, wie die Mizellenbildung, Hydrolyse, Kondensation, Verbrennung, oder physikalische Verfahren, wie Extraktion und Adsorption, sind bereits Gegenstand des Chemieunterrichts, so dass das Thema der „Herstellung“ besonders gut verschiedene Inhalte des Oberstufenchemieunterrichts miteinander verknüpfen kann. Neben der Synthese dieser Materialien sind besonders Experimente aus den oben genannten Bereichen der Gasspeicherung und Stofftrennung, aber auch aus dem Bereich der Katalyse eine wertvolle Ergänzung für den Chemieunterricht. So spielt beispielsweise die Entwicklung von effektiven Katalysatorsystemen für technische Verfahren oder für den Umwelt- und Energiebereich in Zukunft eine immer größere Rolle.

Anhand poröser Silica-Materialien kann SuS vermittelt werden, dass die Eigenschaften von Trägermaterialien, wie Porosität, große Oberflächen und hohe Temperaturstabilität, bedeutend für eine Reihe von katalytischen Prozessen sind (LL4). So übernimmt in solchen Prozessen das Me-

soporen-System beispielsweise die Aufgabe einer stabilisierenden „Matrix“ für Metall- oder Metalloxid-Nanopartikel, indem es das Versintern dieser Partikel im Reaktionsprozess verhindert und damit die großen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisse der katalytisch aktiven Partikel aufrecht erhält (LL3) <sup>[378]</sup>. Einen besonders wertvollen Beitrag liefert das Thema „mesoporöse Materialien“ auch im Hinblick auf die (gelegentlich beklagte Vernachlässigung der) Siliziumchemie im Chemieunterricht. Am Beispiel von  $\text{SiO}_2$ -Vorläuferverbindungen können auch Reaktionen der Hydrolyse und Kondensation an einem anderen Beispiel als der Kohlenstoffchemie erarbeitet oder gefestigt werden (siehe Experiment 7.1).

### Einführung und chemische Grundlagen zur Herstellung von mesoporösen Silica

Der Einstieg in den Kurs erfolgt zunächst alltagsorientiert, indem Bezüge von porösen Materialien zur Lebenswelt der SuS hergestellt werden. Welche Materialien sind ihnen bereits bekannt, welche Eigenschaften besitzen sie, wo werden sie verwendet? Anknüpfend an Vorstellungen und Vorwissen der SuS wird nun mit mesoporösen Silica ein weiteres poröses Material mit Poren im nanoskaligen Bereich und gleichzeitig ein aktuelles Forschungsfeld der Chemie vorgestellt. Abbildung 101 zeigt elektronenmikroskopische Aufnahmen derartiger Silica-Partikel.

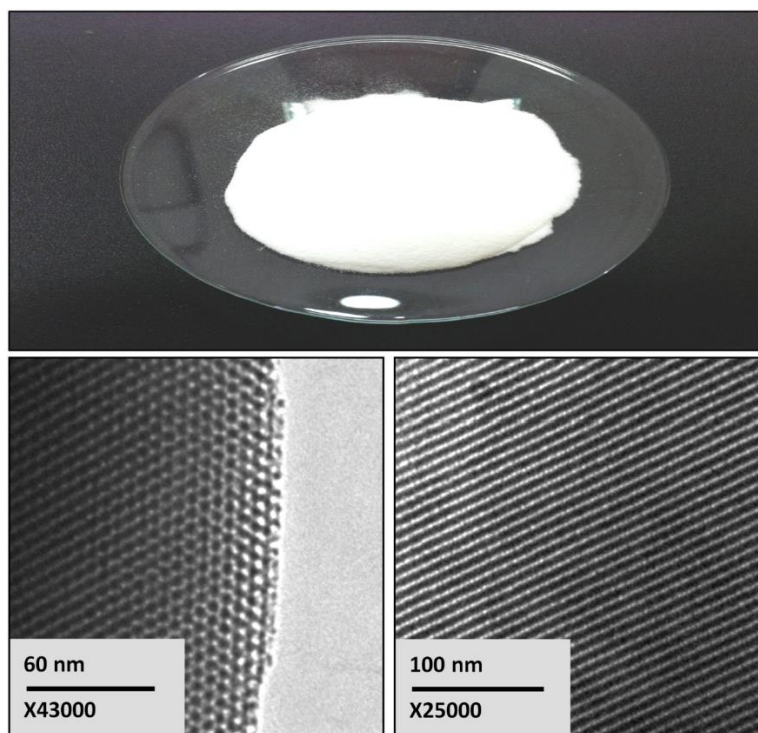


Abbildung 101 – Foto von porösem Silica-Pulver (oben) und elektronenmikroskopische Aufnahme poröser Silica-Partikel (unten): links entlang der Porenachse, rechts senkrecht zur Porenachse.

Die gezeigten elektronenmikroskopischen Aufnahmen eröffnen bei den SuS nun die Fragestellung, wie es möglich ist, Materialien zu synthetisieren, die über (geordnete) Poren mit so geringer Größe verfügen. Dieses Interesse aufgreifend, werden im ersten Schritt die chemischen

Grundlagen von Templatierungsverfahren im Allgemeinen erläutert, bevor sie auf die Herstellung von mesoporösen Silica im Besonderen konkretisiert werden.

Bei Templatierungsverfahren werden im Allgemeinen Moleküle oder Aggregate von Molekülen als Strukturgeber (Template) für die Erzeugung von Poren genutzt (siehe Kap. 5.5). Die Herstellung ist somit prinzipiell vergleichbar mit Abformverfahren aus der makroskopischen Welt, bei denen Gussformen verwendet werden, um beispielsweise Zahnprothesen, Maschinenteile oder Kunstgegenstände herzustellen (siehe Abbildung 102).

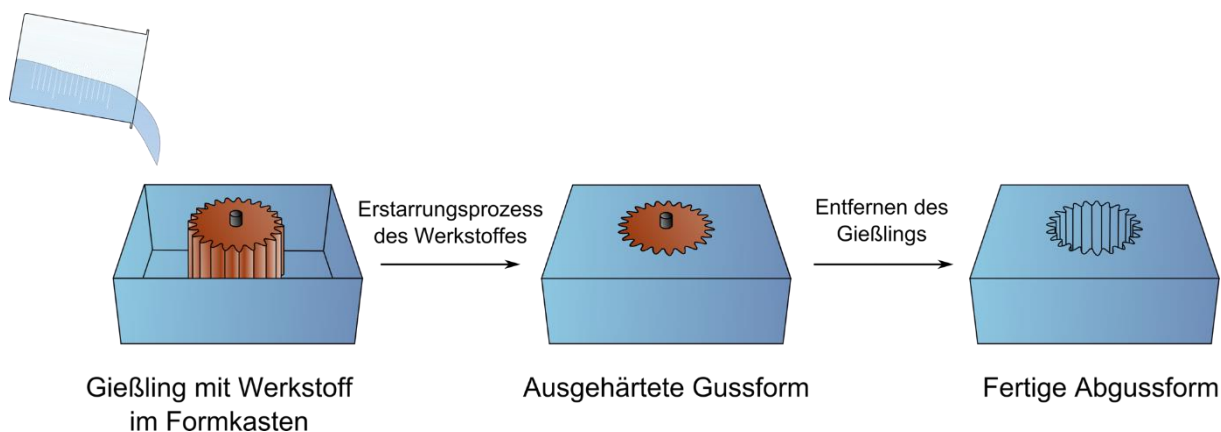


Abbildung 102 – Prinzip des Abgussverfahrens am Beispiel der Herstellung eines Zahnradabdrucks.

Im Falle der Synthese mesoporöser Silica hingegen werden als Template Mizellare Anordnungen von amphiphilen Molekülen in wässriger Lösung genutzt. Amphiphile werden bereits im Kontext des Waschprozesses (Tenside) im Chemieunterricht thematisiert. Da es sich bei solchen Anordnungen nicht um rigide Template handelt (siehe unten), wird in diesem Kontext häufig auch vom „Soft-Matter-Templating“ gesprochen. Ein Teil dieser Architekturen kann unter Erhalt der Struktur in einen Festkörper eingebaut werden, so dass man ein auf der Nanometerskala strukturiertes Kompositmaterial erhält. Dieses setzt sich aus der organischen Phase (Amphiphil) und einer anorganischen Phase zusammen. Vorläuferverbindungen von Silica hingegen, wie beispielsweise Tetraethylorthosilikat (TEOS), können unter chemisch adäquaten Bedingungen zu Kieselsäure hydrolysieren und anschließend amorph um die Aggregatstrukturen herum kondensieren, so dass die Architektur der lyotropen Phase in den Festkörper eingeschlossen werden kann. Nach Entfernung des Tensids, zum Beispiel durch thermische Zersetzung oder Lösungsmittel-Extraktion, wird ein poröser Festkörper mit einer der lyotropen Phase vergleichbaren Porenarchitektur erhalten. Abbildung 103 zeigt zusammenfassend ein Syntheschema für die Herstellung einer mesoporösen Silica-Phase mit hexagonaler Symmetrie, welche im Templatverfahren hergestellt wird.

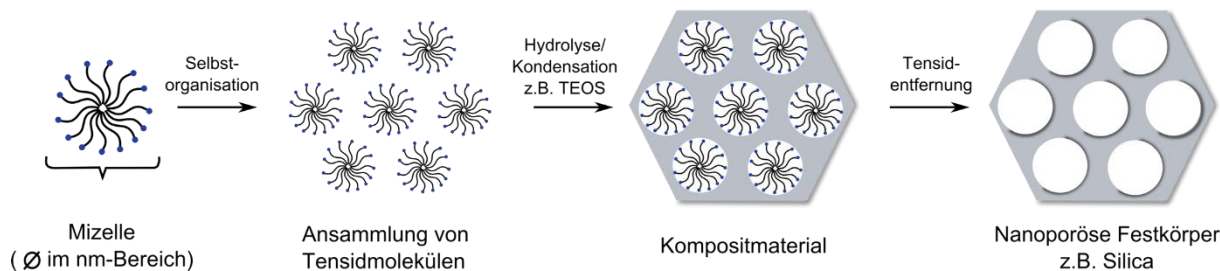


Abbildung 103 – Schematische Darstellung des Templatverfahrens zur Herstellung mesoporöser Silica.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wird nun im nachfolgenden experimentellen Teil dieses Prinzip praktisch im Rahmen der Synthese von mesoporösen Silica umgesetzt. Darüber hinaus werden auch die Eigenschaften dieser Materialien in weiteren Experimenten untersucht.

### Experimenteller Abschnitt

Anhand der im Folgenden vorgestellten Versuche erarbeiten die SuS wichtige Eigenschaften poröser Silica-Materialien, wie Temperaturstabilität und Adsorptionsvermögen, und werten diese mit Hilfe einfacher Modelle aus. Begonnen wird mit der Synthese von Silica, dessen Herstellung zum Vergleich sowohl mit als auch ohne Poren im nachfolgenden Experiment 7.1 vorgestellt wird.

#### **Experiment 7.1: Herstellung von mesoporösem und unporösem Silica-Pulver**

**Geräte und Chemikalien:** Hexadecylrimethylammoniumbromid (Alfa Aesar, 16,80 € / 100 g), Tetraethylorthosilicat (Alfa Aesar, 14,20 € / 100 mL), Wasser, Ammoniak (Lösung, 10 %), Ethanol, Soxhlet-Apparatur oder Muffelofen, Magnetrührer, Bechergläser (250 mL), Trockenschrank.

**Versuchsdurchführung:** In einem Becherglas werden unter leichtem Erwärmen 2,4 g Hexadecylrimethylammoniumbromid (CTAB) in 100 mL demin. Wasser gelöst. Anschließend werden 25 mL Ammoniaklösung (10 %) zugegeben und für weitere 10 Minuten gerührt, bevor schließlich die Zugabe von 10 mL Tetraethylorthosilicat (TEOS) erfolgt. Das Reaktionsgemisch wird über Nacht gerührt und am nächsten Tag filtriert, der Filtrückstand nacheinander mit Wasser und Ethanol gewaschen und getrocknet. Anschließend wird das organische Templat durch Verbrennen (so genannte Calcinierung) im Muffelofen bei 550 °C für 6 h entfernt. Alternativ kann das Tensid auch durch eine fünf- bis sechsstündige Extraktion mit Hilfe einer Soxhlet-Apparatur (ca. 100 mL Ethanol) aus dem Silica herausgelöst werden.

b) Herstellung von unporösem Silica-Pulver. Die Synthese erfolgt analog der Synthese von porösem Silicapulver, jedoch ohne Zugabe des Tensids.

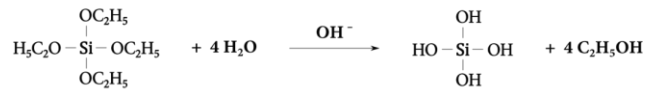
**Beobachtung:** TEOS ist mit Wasser nicht mischbar, was zum Zeitpunkt der Zugabe in die Tensidlösung deutlich erkennbar ist. Im Laufe der Reaktion bildet sich nach einiger Zeit jedoch eine



homogene (zunächst trübe) Lösung. Schließlich bildet sich ein weißer Feststoff, der nach Filtration und Trocknung als weißes, sehr feines Pulver vorliegt.

*Auswertung:* Die Bildung des Festkörpers findet durch eine basenkatalysierte Hydrolyse und anschließender Kondensation von TEOS statt, die sich wie folgt beschreiben lässt (siehe Abbildung 104):

a) Basenkatalysierte Hydrolyse



b) Basenkatalysierte Kondensation

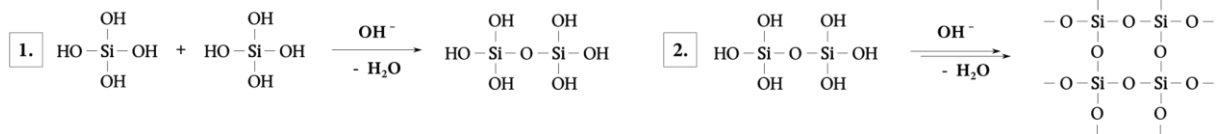


Abbildung 104 – a) Idealisierte basenkatalysierte Hydrolyse von TEOS. b) Basenkatalysierte Kondensation von Kieselsäure.

Nach dem Ablauf der Kondensation wird schließlich das Tensid entfernt. Abbildung 105 zeigt ein Modell des erhaltenen porösen Silica mit amorpher Porenwand.

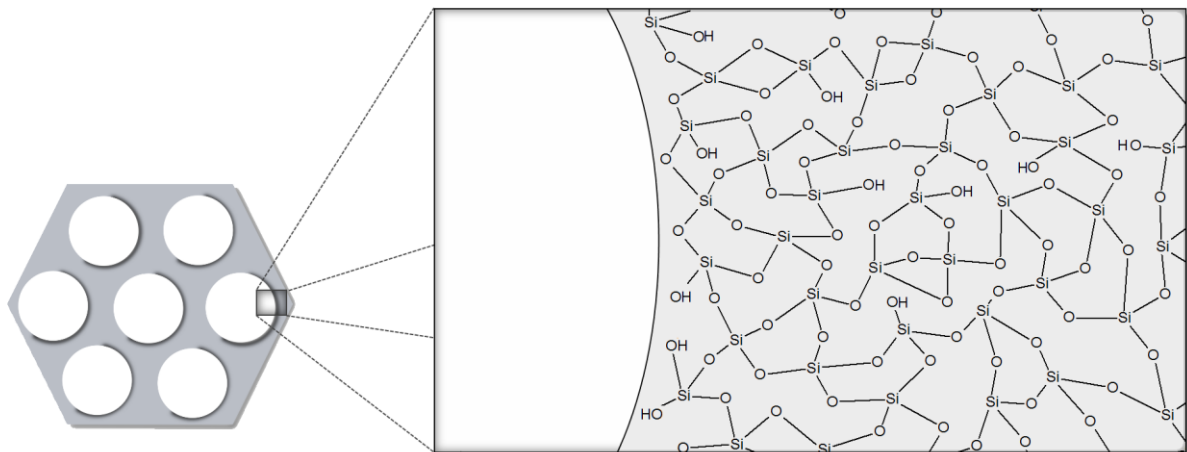


Abbildung 105 – Modell eines porösen Silica-Partikels mit amorpher Wand.

*Hinweis:* Dieser Versuch besteht aus einfach durchzuführenden Arbeitsschritten, welche allerdings auf zwei Versuchstage aufgeteilt werden müssen. Die letzten Schritte der Synthese werden daher am zweiten Kurstag durchgeführt und die weiteren Experimente mit vorbereiteten Silica-Materialien (etwa aus dem letzten Durchlauf).



### Experiment 7.2: Modellversuch zur Gasadsorption an Silica

**Geräte und Chemikalien:** Gasverflüssigungspumpe (PHYWE) mit entferntem Kugelverschluss, Rundkolben (100 mL), Dreiwegehahn, Eisbad, Manometer (z.B. PHYWE Cobra4 Sensor-Unit Thermodynamics), transparentes Klebeband, poröses und unporöses Silica-Pulver (aus Experiment 7.1).

**Versuchsdurchführung:** Zunächst wird eine Apparatur gemäß Abbildung 106 aufgebaut. Hierbei ist auf möglichst kurze Schlauchwege und auf Dichtigkeit der Apparatur zu achten. Die Glas- teile sollten aus Sicherheitsgründen mit Klebeband umwunden werden (Splitterschutz), obgleich nur mit sehr geringem Überdruck gearbeitet wird. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit sollten im Vorfeld der Adsorptionsmessungen  $pV$ -Kurven (Kompression mit anschließender Expansion) ohne Adsorptionsmittel aufgenommen und verglichen werden, um die Dichtigkeit der Apparatur zu überprüfen. Anschließend werden die Sorptionsmessungen mit porösem und unporösem Silica-Material durchgeführt. Hierzu werden jeweils 5 g der entsprechenden Substanz in einen Rundkolben gegeben. Die Druckmessung beginnt, sobald sich der Gleichgewichtsdruck in der geschlossenen Apparatur stabil eingestellt hat. Hierzu wird in Schritten zu je  $5 \text{ cm}^3$  das Volumen mit der Gasverflüssigungspumpe verringert und diese Stellung mit Hilfe der Einrastnocken fixiert. Nach jedem Schritt wird erneut die Einstellung des Adsorptionsgleichgewichts abgewartet (etwa 2 Min) und der Druck am Manometer abgelesen.

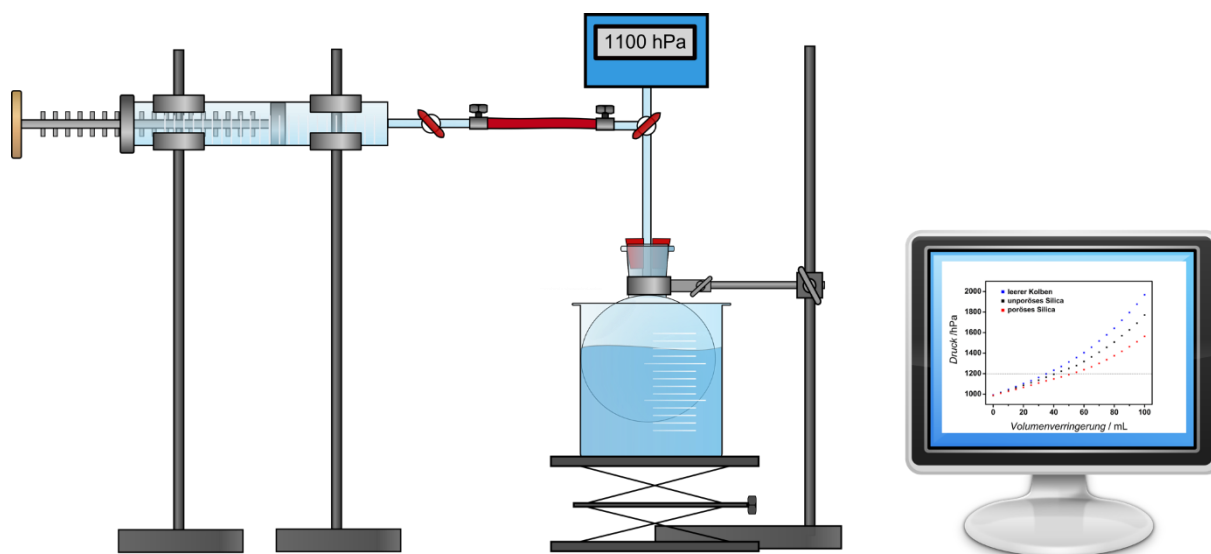


Abbildung 106 – Aufbau einer einfachen Sorptionsapparatur.

**Auswertung:** Die Messwerte werden in einem  $pV$ -Diagramm aufgetragen und miteinander verglichen (siehe Abbildung 107). Alle Kurven zeigen den Verlauf eines klassischen isothermen  $pV$ -Diagramms, also eine steigende Druckzunahme bei stetiger Kompression. Die Isotherme

im Teilversuch mit porösem Material hat einen ähnlichen  $pV$ -Verlauf, zeigt aber eine geringere Steigung als im Falle des leeren Kolbens und des unporösen Materials.

*Hinweise:* Die Apparatur wurde in Versuchen bis ca. 2.000 hPa betrieben, wobei aussagekräftige Messungen bereits schon bei einem Druck von 1.200 hPa erhalten werden, was für den Lehrbetrieb ausreicht. Zudem lässt sich durch Einbau eines Dreiwegehahns auch die Adsorption von anderen Gasen messen.

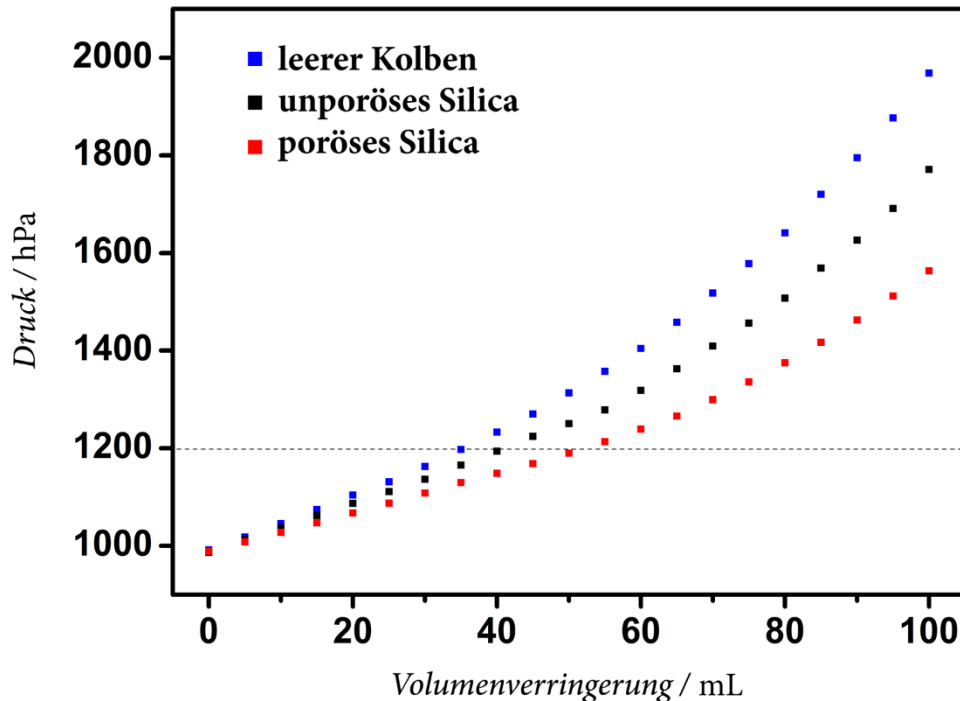


Abbildung 107 –  $pV$ -Diagramm der Adsorption von Luft an poröses und unporöses Silica.

Die unterschiedlichen Verläufe der Kurven werden durch die Adsorption von Gasmolekülen an das Adsorptionsmittel (= Silica) gedeutet. Hierbei gilt eine einfache Struktur-Eigenschafts-Beziehung: Je größer die Oberfläche des Adsorptionsmittels im Verhältnis zum eigenen Volumen, desto mehr Moleküle können an dieser adsorbiert werden (LL4). Adsorbierte Gasmoleküle sind der Gasphase entzogen, so dass der Druck im Kolben herabgesetzt ist. Dieser Effekt ist stärker als im Falle des unporösen Materials, bei dem weniger Moleküle adsorbiert werden können (LL3). Die Auswertung erfolgt dabei mit Hilfe des in Abbildung 108 dargestellten Modells.

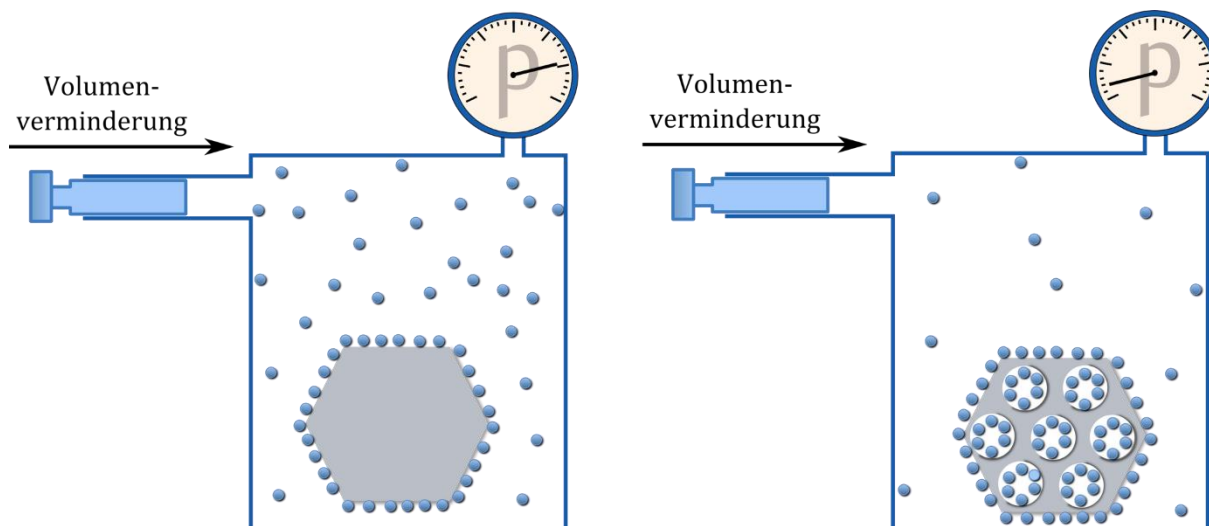


Abbildung 108 – Modell für die Adsorption von Gasen an unporöse (links) und poröse (rechts) Silica-Partikel.

### **Experiment 7.3: Mesoporöses Silica als Trägermaterial für Katalysatoren: Zersetzung von Wasserstoffperoxid**

*Geräte und Chemikalien:* Mangan(II)nitrat-hexahydrat, Wasserstoffperoxid (Lösung, 5 %), poröses Silica (aus Versuch 7.1), „Bulk“-Braunstein, Rundkolben, Manometer (z.B. PHYWE Cobra4 Sensor-Unit Thermodynamics), Spritze, Septum, Mörser mit Pistill, Tiegel, Gasbrenner, Magnetrührer mit Rührfisch.

*Versuchsdurchführung:*

- Die Herstellung des Katalysatormaterials Braunstein erfolgt durch thermische Zersetzung von Mangan(II)nitrat und wird analog zu Experiment 4.1 (siehe Kap. 7.1.4.3) durchgeführt.
- Für die Versuchsdurchführung wird eine Apparatur gemäß Abbildung 109 aufgebaut.

Die Suspension des Bulk-Braunsteins wird in den Rundkolben gegeben, die Apparatur verschlossen und die Messung des Drucks gestartet. Anschließend werden 5 mL Wasserstoffperoxid-Lösung mit Hilfe einer Spritze durch das Septum in den Reaktionskolben injiziert und der Druckanstieg beobachtet. Die Messung des Drucks wird beendet, sobald dieser konstant ist (max. 40 Sekunden). Der Versuch wird mit dem in Silica eingelagerten Braunstein wiederholt.

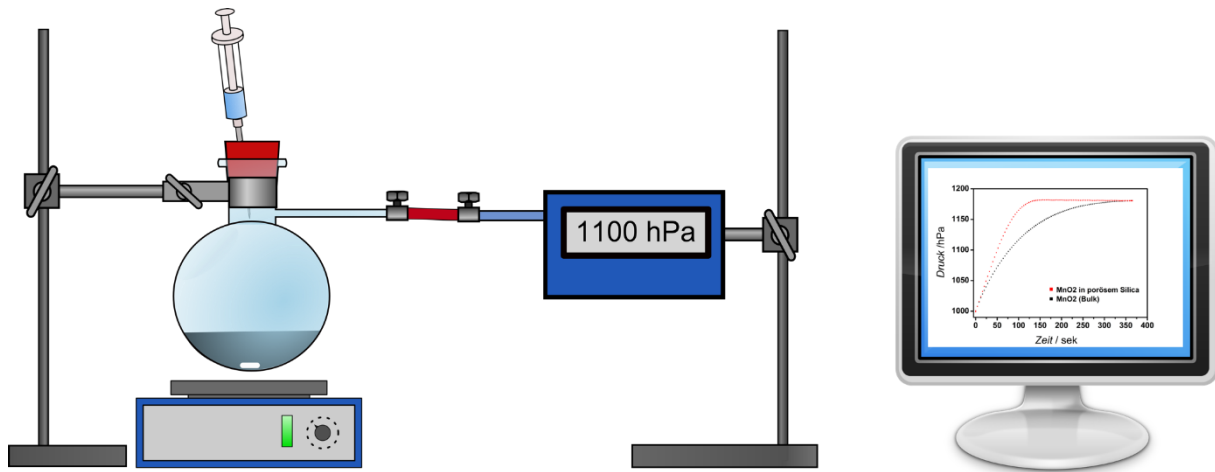
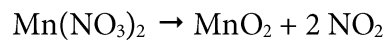


Abbildung 109 – Versuchsaufbau zur Messung der katalytischen Aktivität bei der Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit Braunstein („Bulk“) und Braunstein in porösem Silica-Trägermaterial.

*Auswertung:* Bei der thermischen Zersetzung von Mangannitrat entsteht Braunstein nach <sup>[311]</sup>:



Die Messwerte werden in einem *pt*-Diagramm (Druck-Zeit-Diagramm) aufgetragen und miteinander verglichen (siehe Abbildung 110).

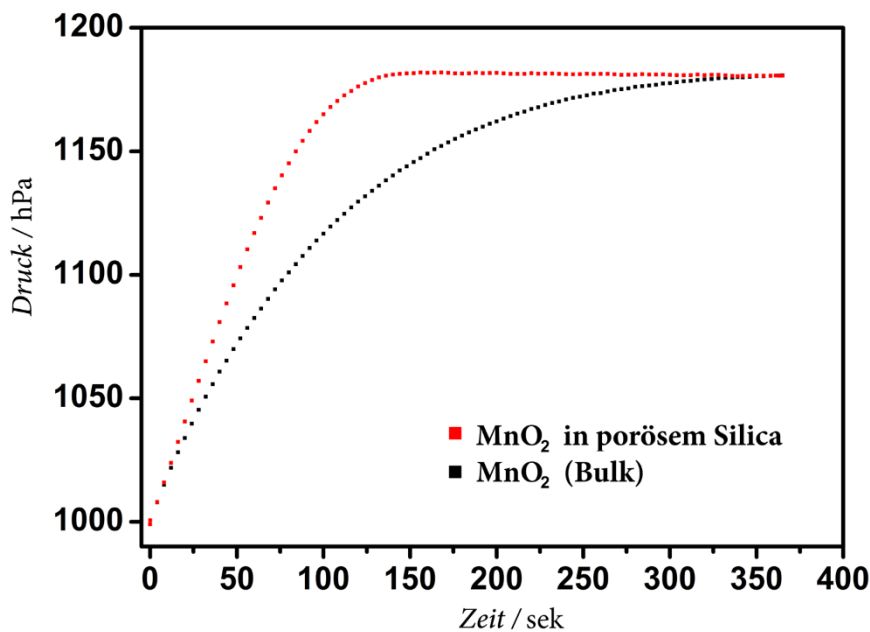


Abbildung 110 – *pt*-Diagramm der katalysierten Zersetzung von Wasserstoffperoxid an porösem und unporösem Silica.

Bei der Analyse der Druck-Zeit-Kurven wird deutlich, dass Braunstein in porösem Material die Zersetzung des Wasserstoffperoxids besser katalysiert als Braunstein in Bulk-Form, was am schnelleren Druckanstieg und der früheren Sättigung erkennbar ist. Zu beachten ist, dass die

eingesetzte Menge an Katalysator (Braunstein) in beiden Fällen gleich ist. Die höhere katalytische Aktivität kann mit dem Vorhandensein sehr kleiner und fein verteilter poröser Braunstein-Partikel in der porösen Matrix gedeutet werden (LL3, LL4). Diese haben im Vergleich zu den Bulk-Braunstein-Partikeln sehr große Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisse (LL5). Da die Zersetzung des Wasserstoffperoxids an der Oberfläche dieser Partikel stattfindet, sind die (vielen) kleineren Partikel katalytisch besonders aktiv.

### **Abschluss und Ergebnissicherung**

Im Anschluss an die vorgestellten Experimente werden im Unterrichtsgespräch die Beobachtungen und Messwerte der Lerngruppe gesammelt und verglichen. Zudem findet an dieser Stelle auch über die Diskussion der Auswertungen die Ergebnissicherung des Kurstages statt.

Über die Experimente hinaus werden die Möglichkeiten diskutiert, welche sich durch die Eigenschaften von mesoporösen Silica bieten, wobei Anwendungen in Alltag, Technik und Forschung gleichermaßen untersucht werden können. Mögliche Beispiele sind etwa die Anwendung von porösen Silica

- in Gewürzen oder Salz, wo es aufgrund der hygroskopischen Wirkung als Rieselhilfe dient (auch bezeichnet als Kieselgel oder Lebensmittelzusatzstoff E 551).
- in Katzenstreu zur Adsorption von geruchsbildenden Stoffen.
- als Füllstoff in Kunststoffen und Gummi, wo sie als Adsorbens dienen und zudem (etwa beireifen) den Rollwiderstand senken <sup>[379]</sup>.
- als Mittel zur Trocknung und Reinigung von Luft, Erd- und Biogas <sup>[380]</sup>.

### **Vorbereitung**

Zur Vorbereitung der nächsten Kurstage führen die SuS die ersten Schritte der Synthese von mesoporösem Metalloxiden (Experiment 7.4) und makroporösen Silikonen (Experiment 7.7) durch. Aus Gründen der Übersicht und zur besseren Darstellung des inhaltlichen Zusammenhangs werden die Versuchsbeschreibungen nicht an dieser Stelle, sondern innerhalb der jeweiligen Versuchstage aufgeführt.

### **Abschlussbetrachtung des Kurstages**

Poröse Funktionsmaterialien im Allgemeinen und mesoporöse Silica im Besonderen bieten vielfältige Lernmöglichkeiten und Chancen im Schülerlabor – die konzeptuellen Grundlagen der Herstellung lassen sich besonders gut visualisieren und können so zum Verständnis des in den Materialwissenschaften oftmals genutzten Synthesprinzips des „Templatings“ beitragen. SuS können anhand der Experimente die Adsorptionsfähigkeit hoch poröser Materialien auf deren großes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen zurückführen. Mit Hilfe des vorgestellten Adsorptionsversuchs können sie hierbei die Adsorptionsfähigkeit hochoberflächiger Materialien

untersuchen. Hierbei ergeben sich gute Anknüpfungspunkte an das Thema Energiespeicherung, wie beispielsweise die Rolle poröser Materialien bei der Gasdruckspeicherung für Autotanks.

Im Bereich der heterogenen Katalyse werden ebenfalls hochoberflächige poröse Trägermaterialien eingesetzt. Auch hier verwenden die SuS das (selbst hergestellte) Silica in einem einfachen Versuch als Trägermaterial für Braunstein-Partikel. Mit Hilfe des skizzierten Versuchsaufbaus können sie auf einfache Weise die katalytische Aktivität von Braunstein in einer porösen Matrix mit unporösem Material vergleichen. Abschließend bieten ihnen diese Versuchsergebnisse vielfältige Diskussionsmöglichkeiten über entsprechende Anwendungen in einer Vielzahl an Einsatzgebieten.

### 7.2.3.3 Tag 2: Nanostrukturierte Materialien<sup>35</sup>

Wie im vorherigen Kurstag bereits beschrieben, kommen mesoporöse Silica in einer Reihe von alltäglichen und industriellen Anwendungen vor. Diese Silica können dabei über ein einfaches Templatierungsverfahren hergestellt werden. Eine interessante Erweiterung dieses Konzepts wäre es nun, wenn neben Silica auch weitere meso- oder nanoporöse Materialien hergestellt werden könnten. Im Hinblick auf die im ersten Versuchstag durchgeführten Versuche ist hierbei die Erzeugung mesoporöser Katalysatoren (ohne Trägermaterial) eine besonders naheliegende Möglichkeit eines solchen Konzeptes.

Im zweiten Kurstag erarbeiten die SuS, wie mit einer einfachen Herstellung das bestehende Synthesekonzept des Soft-Matter-Templatings um das Hard-Matter-Templating („Nanocasting“) erweitert werden kann. Mit den hergestellten mesoporösen Materialien führen sie weitere Experimente zur Charakterisierung, Katalyse und Gassensorik durch und lernen somit entsprechende Anwendungsgebiete kennen.

Die Herstellung dieser Materialien ermöglicht die Verknüpfung einer Reihe chemischer Grundlagen, so zum Beispiel Redoxchemie, Hydrolyse und Kondensation, polare und unpolare Wechselwirkungen sowie Eigenschaften organischer und anorganischer Materialien. Darüber hinaus wird das Syntheseprinzip der Templatierung mit Hilfe von einfachen und visualisierbaren Modellen um das Nanocasting erweitert, welches viele weitere Möglichkeiten zur Herstellung von weiteren Materialklassen eröffnet.

### **Einführung und chemische Grundlagen zur Herstellung von mesoporösen Materialien**

Grundsätzlich lassen sich für die Herstellung poröser Materialien das Soft-Matter-Templating und das Nanocasting konzeptuell unterscheiden, wobei aus didaktisch-methodischen Gründen zunächst auf das Soft-Matter-Templating zur Herstellung von Silica im Unterricht eingegangen wurde (siehe vorheriger Kurstag). Die Anwendung dieses Verfahrens zur Herstellung anderer nanostrukturierter Festkörper als Silica über die Nutzung solcher weichen Template ist allerdings oft nicht möglich. Insbesondere bei anorganischen Materialien, wie Metalloxiden, findet bei der Bildung des Festkörpers eine Phasenseparation zwischen der organischen Phase und dem sich bildenden anorganischen Festkörper statt. Um solche Syntheseprobleme für die Herstellung weiterer nanoporöser Festkörper zu umgehen, können rigide Silica selbst als strukturgebende Matrizes für die Herstellung, beispielsweise von Metalloxiden, genutzt werden.

Bei diesem als Nanocasting bezeichneten Prozess werden die Poren einer Silica-Matrix mit einer Metalloxid-Vorläuferverbindung befüllt und anschließend *in situ* in das entsprechende Oxid

---

<sup>35</sup> Die Inhalte dieses Kurstages (Kap. 7.2.3.3) wurden vom Autor zusätzlich in der Fachzeitschrift JOURNAL OF NANO EDUCATION<sup>[135]</sup> veröffentlicht. Mit freundlicher Genehmigung des Verlags (siehe Anhang A4.2) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

umgesetzt. Im letzten Schritt wird die Silica-Matrix mit Natronlauge entfernt, wobei ein Negativabdruck des ursprünglichen Templates erhalten wird (siehe Abbildung 111).

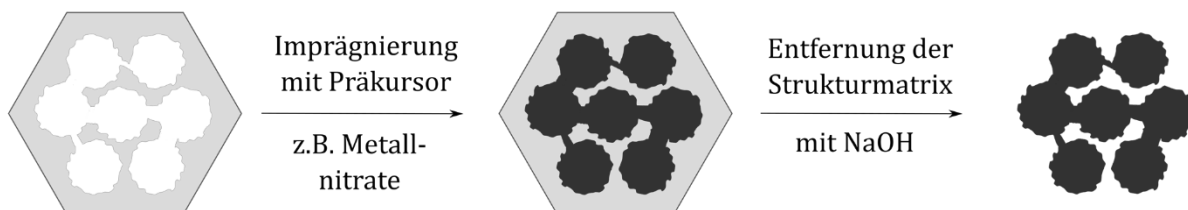


Abbildung 111 – Schematische Illustration des Nanocastings (Hard-Matter-Templating).

Besonders geeignet für die Herstellung dieser Materialien sind daher laugenresistente Metalloxide wie Indium-, Wolfram-, Eisen-, Mangan- und Zinnoxid, die unter anderem in der Katalyse und Gassensorik genutzt werden.

Die für das Nanocasting zu verwendende Silica-Matrix muss hierbei allerdings Verbindungen bzw. Kanäle zwischen den Poren aufweisen, welche dem nanoporösen Metalloxid Stabilität verleihen. Die oben vorgestellte Synthese von mesoporösem Silica (Experiment 7.1) wird mit dem sehr günstigen Tensid CTAB als Porogen durchgeführt, wodurch Mizellen und letztendlich durch die Strukturabformung Poren mit sehr glatten Oberflächen – aber ohne verbindende Kanäle – erhalten werden. Im Folgenden soll daher eine alternative Synthese mit dem Tensid Pluronic® P-123 vorgestellt werden, die bei der Strukturabformung mit TEOS Kanäle erzeugt, welche die Poren der Silica-Matrix verbinden und somit geeignete Matrices für das anschließende Nanocasting erzeugen. Aufgrund der inhaltlichen Überschneidung mit Experiment werden diese Materialien im Vorfeld durch die Kursleitung synthetisiert und den SuS zur Verfügung gestellt.

### Vorbereitungsexperiment: Synthese einer nanoporösen SBA-15 Silica-Matrix

In diesem Versuch wird eine Silica-Matrix mit besonders einfachen Strukturen und verbindenden (hexagonal angeordneten) Porenkanälen erzeugt.

*Geräte und Chemikalien:* Pluronic® P-123 (Sigma-Aldrich, 56 € / 250 mL), Salzsäure (32 %), Tetraethylorthosilicat, demin. Wasser, Aceton, Becherglas, Gasbrenner, Magnetrührer, Trockenofen (bspw. aus der Biologie), Laborglasflasche, Schmelztiigel.

*Versuchsdurchführung:* Die Synthese von SBA-15 wird nach einem modifizierten Verfahren nach ZHAO<sup>[381]</sup> durchgeführt (siehe Abbildung 112). 6 g des P-123 Blockcopolymers werden bei ca. 35 °C in einer Mischung aus 180 g demin. Wasser und 22 g Salzsäure (32 %) innerhalb von 24 Stunden gelöst (a). Nach Zugabe von 12 g TEOS wird die Lösung für weitere 24 Stunden bei 35 °C gerührt (b). Das resultierende Gel wird in eine Laborglasflasche gegeben und für 24 Stunden im Trockenofen bei 90 °C aufbewahrt (c). Der hieraus resultierende Feststoff wird abfiltriert und mit demin. Wasser gewaschen. Um schließlich das Templat (P-123) zu entfernen, wird das



Produkt in 200 mL Aceton dispergiert, für 30 Minuten gerührt und anschließend abfiltriert (d). Mit einem Gasbrenner werden schließlich organische Rückstände durch Kalzinierung entfernt (e). Das Produkt wird als weißes Pulver erhalten (f).

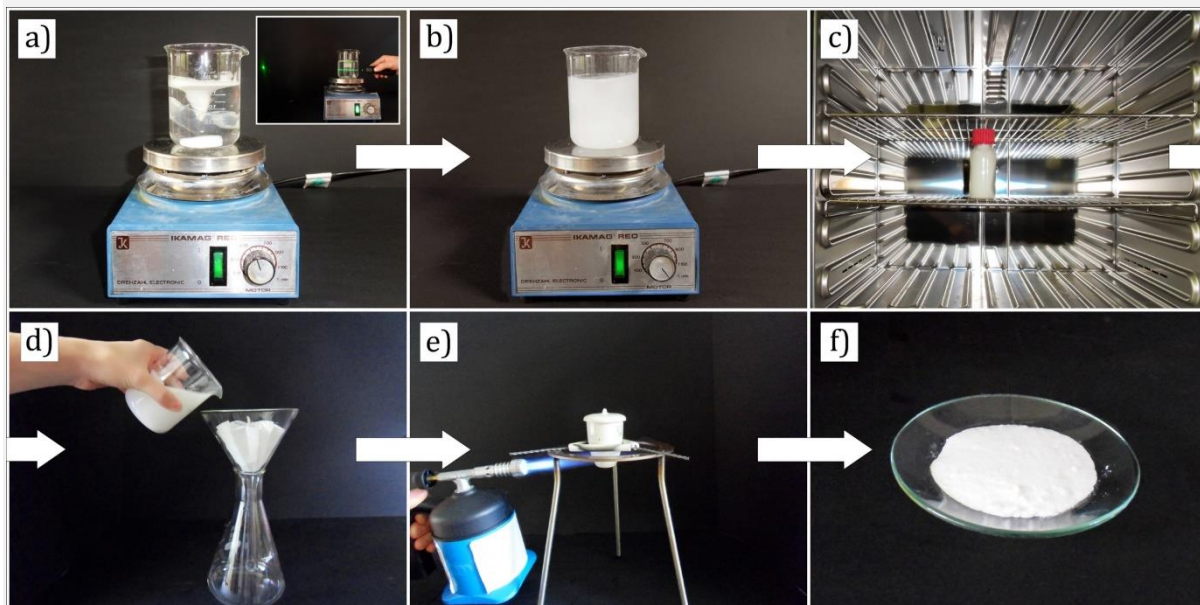


Abbildung 112 – Synthese von SBA-15-Silica; a) Lösen des P-123 Blockcopolymers (Inset: Tyndall-Effekt); b) nach Zugabe von TEOS; c) Hydrothermalbehandlung; d) Filtration; e) Kalzinierung; f) Produkt.

*Auswertung:* Analog zu Experiment 7.1 wird mesoporöses Silica mit einer geordnet-porösen Struktur erhalten; der Unterschied ist hierbei die Vernetzung der Poren bei dem Produkt dieses Experimentes (schematisch dargestellt in Abbildung 111 links).

Mit Hilfe dieser SBA-15 Silica-Matrix stellen die SuS nun über das Nanocasting-Verfahren mehrere mesoporöse Metalloxide her, die als Grundlage für weitere Experimente dienen.

#### Experiment 7.4: Synthese von mesoporösen Metalloxiden

*Geräte und Chemikalien:* Zinn(II)-chlorid-Dihydrat, Eisen(III)-nitrat-Nonahydrat, SBA-15 Silica (vorbereitet), Natriumhydroxid-Lösung (2 M), Mörser und Pistill, Trockenofen, Gasbrenner, Becherglas, Magnetrührer, Schmelztiegel.

*Versuchsdurchführung:* Für die Synthese von nanoporösen Metalloxiden (siehe Abbildung 113) werden 2 mL einer gesättigten wässrigen Zinn(II)-chlorid- bzw. Eisen(II)-nitrat-Lösung (Präkursor) zu 2 g SBA-15 Silica in einen Mörser gegeben (a) und gleichmäßig mit dem Pistill verteilt (sog. „Incipient Wetness“-Methode). b) Im Anschluss wird die Probe für mindestens einen Tag bei 60 °C im Trockenofen getrocknet (c) und danach vorsichtig mit einem Gasbrenner erhitzt (d). Die Prozedur wird mit einem 1 mL des Präkursors wiederholt, um eine ausreichende

Porenfüllung sicherzustellen. Schließlich wird die Silica-Matrix entfernt, indem das Kompositmaterial in Natronlauge (2 M) für 8 Stunden bei Raumtemperatur gerührt wird (e). Das Produkt wird zentrifugiert, abfiltriert, mit demin. Wasser gewaschen und bei Raumtemperatur getrocknet.

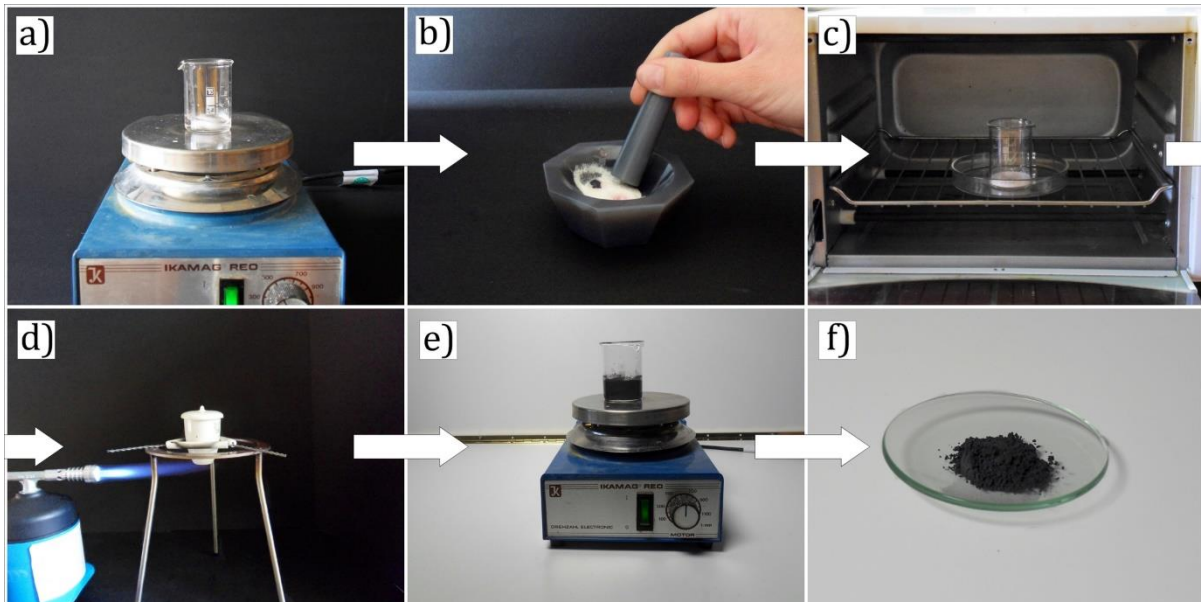


Abbildung 113 – Synthese des nanoporösen Metalloxides via Nanocasting; a) Dispergieren des Metalloxid-Präkursors; b) Imprägnieren des Präkursors in die SBA-15 Silica-Matrix; c) Trocknen; d) Kalzinierung; e) Entfernen der Silica-Matrix; f) Produkt.

*Auswertung:* Aufgrund der hohen Polarität der Silanolgruppen an der Silica-Porenwand können die gelösten Metallnitrate bzw. -chloride gut adsorbiert werden; des Weiteren fördern Kapillarkräfte ebenfalls die Benetzung der Poren. Durch die thermische Behandlung mit dem Gasbrenner wird das Metallnitrat in das entsprechende Metalloxid überführt. Durch die Zugabe von Natronlauge wird die Silica-Matrix (die dabei als Strukturgeber dient) aufgelöst und das mesoporöse Metalloxid als entsprechender Negativabdruck erhalten.

Tabelle 26 zeigt mit der Gesamtoberfläche (BET-Methode), Porenvolumen und -durchmesser charakteristische Eigenschaften von Eisen- bzw. Manganoxid, welches nach dieser Methode synthetisiert wurden. Zum Vergleich wurde ebenfalls entsprechende Werte von Aluminiumoxid<sup>36</sup> aufgeführt.

<sup>36</sup> Hergestellt in Kooperation mit Herrn MICHAEL TIEMANN, Universität Paderborn.

Tabelle 26 – Charakterisierung der via Nanocasting hergestellten Metalloxide.

Metalloxid	Masse [g]	BET Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	Totales Porenvolumen [mL/g]	Porendurchmesser [nm]
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,278	151	0,55	10,3
MnO <sub>2</sub>	0,15	62	0,18	4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,13	313	1,15	12,6

Abbildung 114 zeigt repräsentative transelektronenmikroskopische (TEM) Aufnahmen der porösen Metalloxide senkrecht zur (links) und entlang der Porenachse (Mitte & rechts), welche in Kooperation mit dem Institut für Materialphysik der Georg-August-Universität Göttingen erhalten wurden. Mit Hilfe der Scale bars ermitteln die SuS anschließend auf einfache Weise die Porengröße der hergestellten mesoporösen Materialien

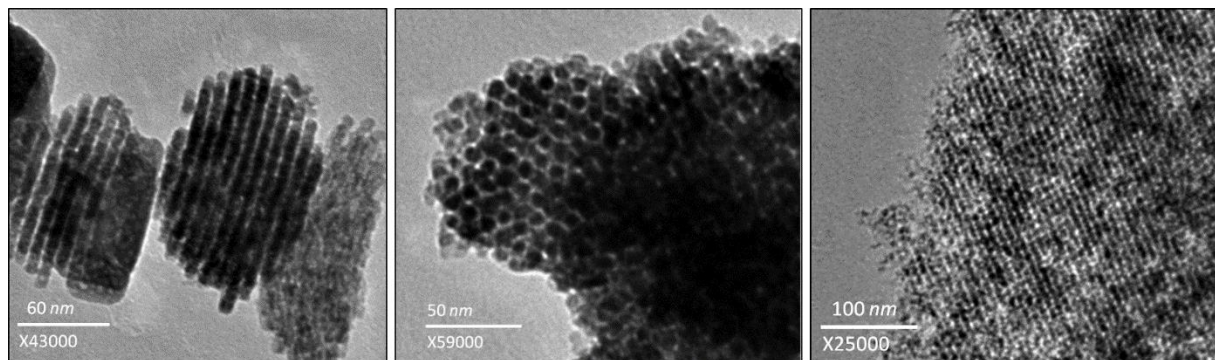


Abbildung 114 – Elektronenmikroskopische Aufnahmen von mesoporösem Eisenoxid (links), Manganoxid (Mitte) und Aluminiumoxid (rechts).

### Experiment 7.5: Katalyse mit nanoporösem Eisen(III)-oxid

Eisen(III)-oxid (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ist ein wirksamer Katalysator mit vielen Anwendungsgebieten. Ein Beispiel ist die selektive katalytische Reduktion von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) durch Ammoniak und Kohlenstoffmonoxid, welche industriell unter anderem bei der Verbrennung fossiler Rohstoffe entstehen <sup>[382]</sup>. Hier werden nanoporöse Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Stäbchen als vielversprechende Alternative zu den giftigen und flüchtigen Vanadiumoxiden (VO<sub>x</sub>) untersucht <sup>[383]</sup>.

In diesem Experiment untersuchen SuS die katalytische Aktivität von Nanocast-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bei der Zersetzung von Butan als Testreaktion und vergleichen diese mit „Bulk“-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dieser Versuch wird dabei von der gesamten Lerngruppe betreut und als Langzeitversuch durchgeführt.

**Geräte und Chemikalien:** Nanoporöses Eisen(III)-oxid (aus Experiment 7.4), Eisen(III)-oxid, Gasflasche (n-Butan), Dreihalskolben, 2 Blasenähler, Rohrofen (z.B. Carbolite MTF 12/25/400) CO<sub>2</sub>-Sensor (Phywe).

**Versuchsdurchführung:** Die Herstellung des Katalysators - nanoporöses Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - erfolgt mit SBA-15 Silica als Strukturmatrix gemäß Experiment 7.4. Als Referenzmaterial zum Vergleich der katalytischen Aktivität dient unporöses („Bulk“-)Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hierzu wird eine äquivalente Menge Eisennitrat in einem Tiegel thermisch (jedoch ohne Strukturmatrix) zersetzt. Für die Versuchsdurchführung zur Messung der katalytischen Aktivität wird eine Apparatur gemäß Abbildung 115 aufgebaut.

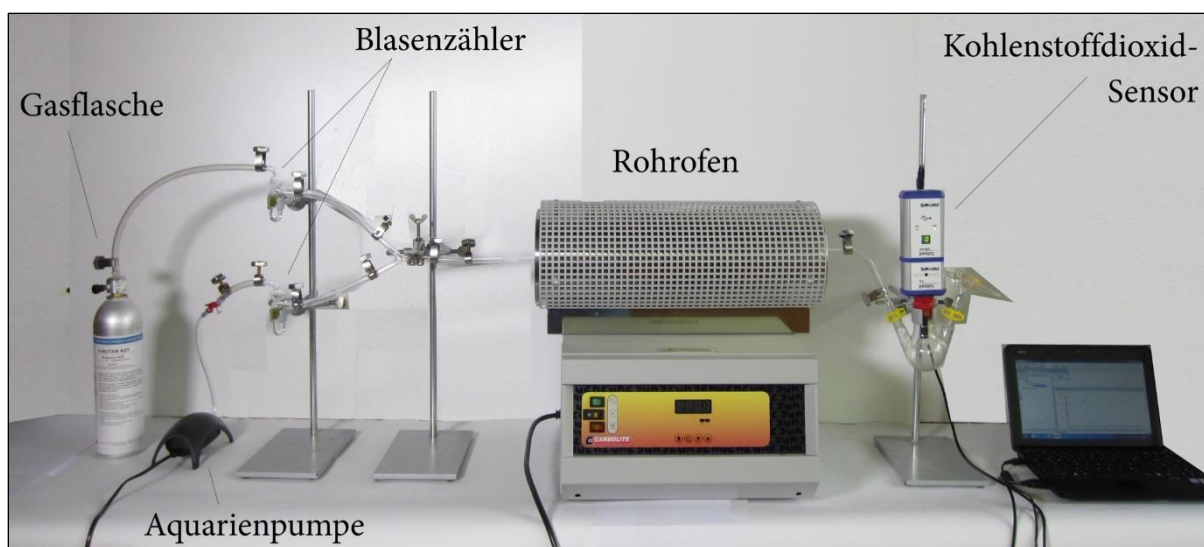
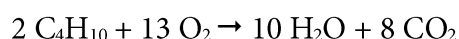


Abbildung 115 – Versuchsaufbau zur Messung der katalytischen Aktivität bei der Zersetzung von Butan mit nanoporösem Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Bulk-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Das Quarzrohr des Rohrofens wird mit dem jeweiligen Katalysator befüllt und von beiden Seiten mit Glaswolle verschlossen. Es ist darauf zu achten, dass der Gasdurchfluss durch die Befüllung nicht beeinträchtigt wird. Mithilfe der Blasenähler wird ein moderater Luft- und Butan-gasstrom erzeugt (ca. 60 Bläschen pro Minute). Die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration erfolgt in Intervallen von 100 °C zwischen Raumtemperatur und der Endtemperatur von 420 °C. Hierzu wird die Temperatur des Ofens auf jeder Stufe für jeweils etwa eine halbe Stunde gehalten und die sich einstellende CO<sub>2</sub>-Konzentration ermittelt.

**Auswertung:** Bei der thermischen Zersetzung von Butan durch nanoporöses Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> entstehen hauptsächlich Wasser und Kohlenstoffdioxid:



Die Messwerte werden in einem *cT*-Diagramm (Konzentration-Temperatur-Diagramm) aufgetragen und miteinander verglichen (siehe Abbildung 116).



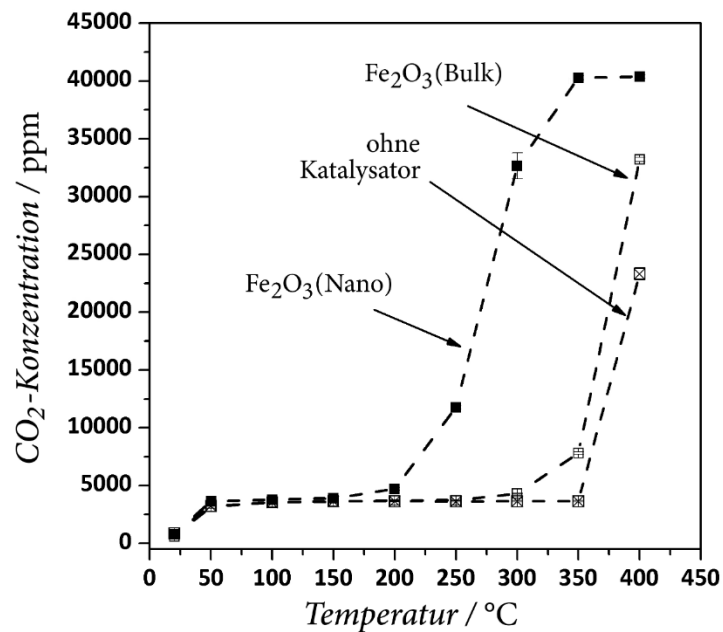


Abbildung 116 –  $cT$ -Diagramm der katalytischen Zersetzung von Butan durch nanoporöses  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  im Vergleich zu unporösem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Bulk) und der unkatalysierten Zersetzung.

Bei der Analyse der Konzentration-Temperatur-Kurven wird deutlich, dass nanoporöses  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  die Zersetzung von Butan besser katalysiert als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  in Bulk-Form, was an der stärkeren Bildung von  $\text{CO}_2$  bei einer niedrigeren Temperatur erkennbar ist. Zu beachten ist, dass die eingesetzte Menge an Katalysator in beiden Fällen gleich groß ist. Die höhere katalytische Aktivität kann mit dem Vorhandensein der porösen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Matrix gedeutet werden. Diese hat im Vergleich zu den Bulk- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Partikeln ein sehr großes Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis. Da die Zersetzung des Butans an der Oberfläche dieser Partikel stattfindet, ist nanoporöses  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  katalytisch besonders aktiv.

Die SuS können innerhalb dieses Experiments anhand der erhobenen Daten einfach erschließen, dass sich die Aktivität des Katalysators in Abhängigkeit des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses ändert (LL3, LL4) und damit ein wesentliches Charakteristikum von Nanomaterialien erarbeiten bzw. verdeutlichen.

*Hinweis:* Bei der Durchführung ist darauf zu achten, dass am Quarzrohr keine (ggf. katalytisch aktiven) eingebrannten Reste vorhanden sind, da diese das Ergebnis verfälschen könnten.

## Experiment 7.6: Gassensorik mit mesoporösen Metalloxiden

Halbleitende Metalloxide, wie Indium(III)-oxid ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) und Zinn(IV)-oxid ( $\text{SnO}_2$ ), werden häufig als Gassensoren für die Detektion von oxidierenden und reduzierenden Gasen wie beispielsweise Ozon,  $\text{NO}_x$  oder Methan eingesetzt, so zum Beispiel in der Medizin, zur Messung der Luftqualität sowie der Detektion von explosiven und toxischen Gasen<sup>[384–388]</sup>. Um möglichst hohe Sensitivitäten dieser Metalloxide zu erreichen, können diese als geordnet nanoporöse Materialien mit einem großen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis auf Sensorsubstraten eingesetzt werden. In diesem Experiment lernen die SuS die Präparation eines Halbleitersensors sowie Modellexperimente mit oxidierenden sowie reduzierenden Gasen zur Funktionsweise kennen. Ausgehend von diesen Kenntnissen können die hergestellten Gassensoren zur Detektion von Gasen im Alltag, wie etwa Feuerzeuggas, Ozon aus Laserdruckern oder Stickoxiden in Autoabgasen genutzt werden.

### Teil 1: Präparation des Sensorsubstrates

*Geräte und Chemikalien:* Poröses Zinnoxid aus Experiment 7.4, demin. Wasser, Sensorsubstrat (UST Umweltsensortechnik, ca. 10 € / Stück), Spannungsquelle, Pipette, Mörser und Pistill.

*Versuchsdurchführung:* Für die Herstellung des Gassensors (siehe Abbildung 117) werden 20 mg des mesoporösen Zinnoxides mit vorsichtig gemörtelt und in 2 mL demin. Wasser dispergiert (a). Die Dispersion wird mit einer Pasteurpipette auf das Sensorsubstrat gegeben (Drop Coating) (b), bei Raumtemperatur getrocknet und mit Hilfe der Spannungsquelle für 24 Stunden bei 350 °C getempert (siehe Abbildung 118 mit eingestellter Heizspannung von ca. 2,5 V).

Analog wird ein zweiter Sensor mit unporösem Zinnoxid präpariert.

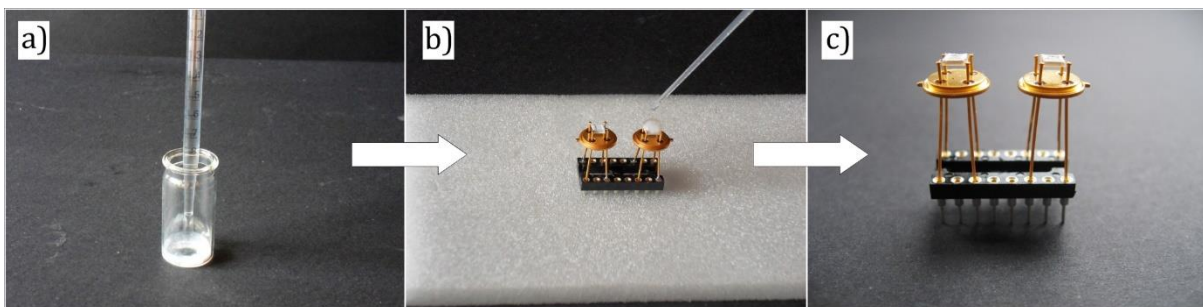


Abbildung 117 – Herstellung eines Gassensors; a) Dispergieren des nanoporösen Metalloxides; b) Drop Coating des Sensorsubstrates; c) Funktionsfähiger Sensor.

*Auswertung:* Das Sensorsubstrat (schematisch dargestellt in Abbildung 118 c) stellt dünne Platindrähte bereit, welche im Wesentlichen als Heizwiderstände und Messkontakte dienen. Mithilfe des sog. Drop Coatings wird das halbleitende Metalloxid als aktive, dünne Schicht auf dem

Sensorsubstrat aufgetragen. Durch das Sintern wird die Leistungsfähigkeit des Sensors verbessert<sup>[389]</sup> – konkret wird dabei die Metalloxid-Schicht geringfügig verdichtet, wodurch Leitfähigkeit und Stabilität zunehmen. Zudem werden dabei mögliche organische Reste entfernt.

### Teil 2: Gassensorische Messung von Ethanol und Ozon

**Geräte und Chemikalien:** Ethanol, Gassensor aus Versuchsteil 1, Spannungsquelle, Multimeter, Kabel mit Krokodilklemme, Spritze, optional Ozongenerator (z.B. Ozonisorator, Modell A300).

**Versuchsdurchführung:** Ein gemäß dem vorherigen Abschnitt mit Zinnoxid präparierter Gassensor wird, wie in Abbildung 118 abgebildet, angeschlossen und bei einer Heizspannung von etwa 1,1 V in Betrieb genommen. Für die Durchführung der Experimente muss so lange gewartet werden, bis sich ein konstanter Sensorwiderstand einstellt. Bei frisch präparierten Sensoren kann dies einige Zeit in Anspruch nehmen. Für die Durchführung der Experimente wird Ethanol aus einer gesättigten Gasphase mit einer Einwegspritze (50 mL) aufgezogen; hierfür eignen sich mit Ethanol gefüllte Glas- bzw. Lösungsmittelbehälter oder auch Flaschen mit hochprozentigen Spirituosen. Ozon kann entweder direkt neben (alten) Laserdruckern gemessen oder auch mit einem handelsüblichen Ozonisorator für Aquarien erzeugt und ebenfalls mit einer Spritze aufgefangen werden. Bei einer Betriebstemperatur des Sensors von 110 °C werden die Gase bei einem Abstand von ungefähr einem Meter auf den Sensor geleitet. Die Messungen werden vergleichend mit „Bulk“-Zinnoxid wiederholt.

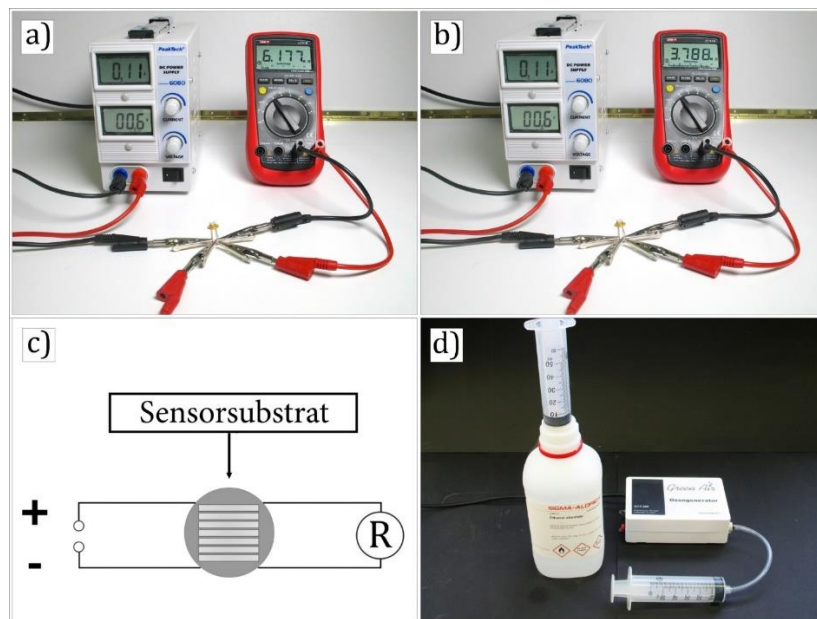
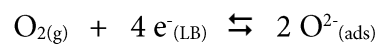


Abbildung 118 – Einfache Gassensorik-Messapparatur: a) Messung des Ausgangswiderstands; b) reduzierter Widerstand bei der Messung von Ethanol; c) Schaltkreis des Versuchsaufbaus; d) Sammeln von Ethanol und Ozon.

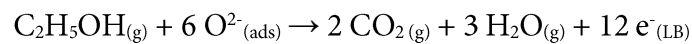
**Beobachtung:** Beim Aufleiten der Ethanoldämpfe auf den Gassensor verringert sich der Widerstand signifikant und stellt sich nach einigen Minuten wieder auf den Ausgangswert ein. Im

Falle von Ozon wird der Ausgangswiderstand erhöht und stellt sich ebenfalls nach einigen Minuten erneut auf den ursprünglichen Widerstand ein. Der mit mesoporösem Zinnoxid beschichtete Sensor zeigt dabei eine stärkere Widerstandsänderung, die sich auch weitaus schneller wieder auf den ursprünglichen Wert einstellt.

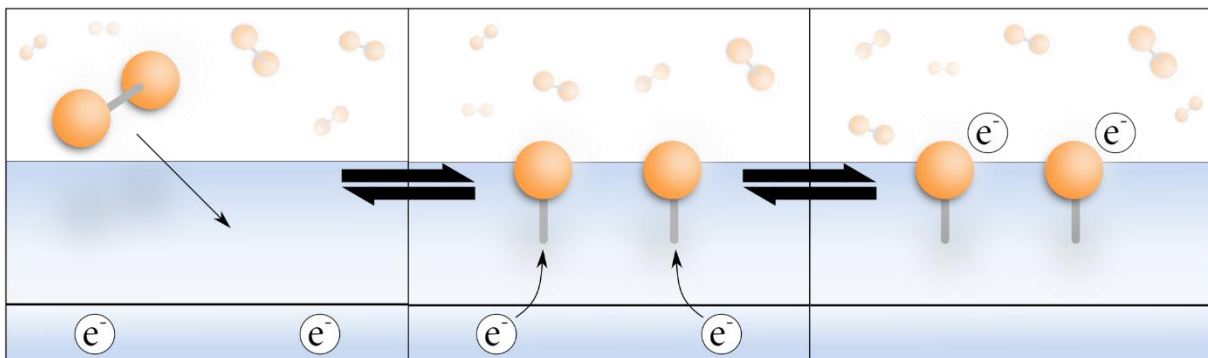
*Auswertung:* Für die Deutung der Widerstandsänderung wird das Ionosorptionsmodell in Kombination mit einem einfachen Festkörperbändermodell genutzt. Hierbei wird ein Gleichgewicht zwischen der Ionosorption von Sauerstoff auf der Oberfläche eines halbleitenden Metalloxids angenommen. Bei diesem Prozess werden Elektronen aus dem Valenzband des Halbleiters immobilisiert, sodass bei konstanter Temperatur und konstantem Sauerstoffpartialdruck ein konstanter Oberflächenwiderstand gemessen werden kann.



Die Widerstandsänderung des Sensors kann durch eine oberflächenchemische Reaktion der ionosorbierten Sauerstoffspezies mit Ethanolmolekülen gedeutet werden. In vereinfachter Weise findet hierbei eine Redoxreaktion statt, bei der die immobilisierten Elektronen in das Leitungsband des Halbleiters abgegeben werden. Ethanol wirkt somit als reduzierendes Gas gemäß:



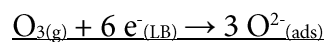
Der Erhöhung der Elektronendichte im Leitungsband folgt die gemessene Senkung des Widerstandes. Nach einiger Zeit stellt sich der Ausgangswiderstand durch Ionosorption von Sauerstoff-Molekülen auf der Halbleiteroberfläche ein (siehe Abbildung 119).



**Abbildung 119** – Vereinfachter Mechanismus des Ionosorptionsmodells für einen Halbleiter. Oxidierende Gase senken die Leitfähigkeit (links), reduzierende erhöhen sie (rechts).

Im Falle des Ozons reagiert der Sensor mit einer deutlichen Erhöhung des Widerstandes auf das angebotene Gas. Ozon wirkt oxidierend und erhöht somit den Widerstand der sensitiven Schicht des Gassensors, indem zusätzliche Sauerstoff-Ionen an der Oberfläche gebunden werden. Demzufolge werden weitere Leitungsbandelektronen der Oberflächenregion immobilisiert, formal etwa gemäß:





Im Anschluss an die Auswertung dieser grundlegenden Zusammenhänge erschließen die SuS eigenständig die Unterschiede zwischen den Sensoren mit mesoporöser sowie Bulk-Zinnoxid. Durch Verknüpfung der Erkenntnisse aus diesem und vorherigen Experimenten können sowohl die höhere Empfindlichkeit als auch die schnellere Regeneration des mesoporösen Zinnoxid-Sensors auf einfache Weise anhand der weitaus größeren Oberfläche des Sensors erklärt werden (Struktur-Eigenschafts-Zusammenhang).

### **Abschluss und Ergebnissicherung**

Wie bereits zum Ende des ersten Kurstages werden die gesammelten Messwerte, Beobachtungen und Auswertungen im abschließenden Unterrichtsgespräch gesammelt, verglichen und besprochen.

Durch die Erweiterung des Templatierungskonzeptes der SuS aus dem ersten Kurstag um das Nanocasting bzw. Hard-Matter-Templating können sehr viele weitere nanostrukturierte Materialien hergestellt werden. Dies eröffnet in der Folge eine umso größere Bandbreite an Möglichkeiten und Einsatzgebieten, über dessen gemeinsame Erarbeitung und Diskussion im Plenum gleichzeitig die Erkenntnisse des Kurstages gesichert werden. Der Kurstag endet mit der (kurzen) Syntheseschritten für die Herstellung der makroporösen Silikone.

### **Abschlussbetrachtung des Kurstages**

Nicht nur Silica, sondern auch weitere nanoporöse Materialien bieten vielfältige Berührungspunkte zur Lebenswelt von SuS. Mit Hilfe der durchgeführten Experimente können diese Verbindungen aufgezeigt und durch die Verknüpfung bekannter chemischen Grundlagen mit neuen, wissenschaftlich bedeutenden Inhalten, wie dem Templatverfahren, in Grundzügen erarbeitet werden. Die Experimente können von SuS mit einfach handhabbaren Chemikalien selbst durchgeführt werden und bieten somit einen Einblick in aktuelle Forschungsbereiche der Materialwissenschaften. Darüber hinaus können sie durch leichte Anpassungen - bspw. durch die Verwendung anderer Metalloxide - eine Vielzahl weiterer Anwendungsmöglichkeiten und alltagsbezogene Anschlusskontexte erschließen. Möglich sind neben den gezeigten Experimenten unter anderem diverse Gasuntersuchungen (Feuchtesensoren, Abgasuntersuchung, Röstprozesse, ...) oder auch klassische Schulversuche, wie etwa das katalytische Cracken von Paraffinöl mit eingelagertem Aluminium(III)oxid in der porösen Silica-Matrix oder die Dehydratisierung von Ethanol zu Ethen. Somit ergeben sich vielfältige weitere didaktische Perspektiven für diesen Kurstag.

#### 7.2.3.4 Tag 3: Makroporöse Silikone – Ein Alltagsmaterial mit erweiterten Funktionen<sup>37</sup>

In den ersten beiden Kurstagen wurde anhand der Synthese von mesoporösen Silica (Soft-Matter-Templating) und Metalloxiden (Hard-Matter-Templating) sowie vielfältige Experimenten zu ihren Eigenschaften vorgestellt, dass mit der Porosität eines Materials erhebliche Funktionserweiterungen einhergehen können. Im abschließenden Kurstag soll das hierbei erworbene Synthesekonzept der Templating erneut erweitert werden, indem über die Strukturabformung einer Mikroemulsion das aus dem Alltag bekannte Silikon in einer neuartigen Form synthetisiert und untersucht werden kann. Hierbei wird entsprechend auf anschauliche Weise illustriert, wie durch Veränderung der Struktur eines Materials neue Stoffeigenschaften erzeugt werden können, wie etwa eine höhere Gasspeicherfähigkeit und eine größere mechanische Flexibilität.

In dem vorliegenden Kurs können SuS makroporösen Silikone in einem Schülerversuch selbst herstellen und beschreiben. Darüber hinaus untersuchen sie in einfachen und anschaulichen Experimenten die zuvor genannten Eigenschaften der Silikone - hierzu zählen etwa Stofftrennung, Adsorption sowie zur thermischen Stabilität dieses Materials. Der Versuchstag bietet in diesem Zusammenhang dabei vielfältige Gelegenheiten, verschiedene klassische Inhalte des Chemieunterrichts wie etwa Hydrolyse- und Kondensationsreaktionen, Eigenschaften von Tensiden sowie Adsorption und Stofftrennung synergistisch mit dem Themengebiet „Nano“ zu vernetzen.

#### **Einführung und chemische Grundlagen zu Silikonen**

Silikone werden aufgrund ihrer hohen Lebensdauer und ihrer großen thermischen Beständigkeit vor allem in Bereichen verwendet, in denen hohe mechanische Anforderungen an Werkstoffe gestellt werden. In Form von Ölen, Elastomeren oder Harzen<sup>[391]</sup> finden sie im Alltag der SuS vielfältige Anwendungen (LL2) und Aufmerksamkeit, beispielsweise als Wärmeleitpasten, Backformen, Schmiermittel oder Dichtungsmassen. Aus fachdidaktischer Perspektive sind daher bereits einige Beiträge zum Thema Silikone erschienen; besonders zu erwähnen sind an dieser Stelle der Silikon- und Cyclodextrinkoffer CHEM<sub>2</sub>DO von ANTON, KREES und TAUSCH<sup>[392]</sup> sowie die Beiträge von EPPLE, SOKOLOVA<sup>[393]</sup> und VENZMER<sup>[394]</sup>.

In der Einführung des dritten Kurstages werden zunächst Verbindungen zu diesen Alltagsanwendungen hergestellt und die den SuS bekannten Eigenschaften von „herkömmlichem“ Silikon gesammelt. Auf der Teilchenebene werden diese Eigenschaften anschließend anhand des strukturellen Aufbaus von Silikonen gedeutet.

---

<sup>37</sup> Die Inhalte dieses Kurstages (Kap. 7.2.3.4) wurden vom Autor zusätzlich in der Fachzeitschrift CHEMIE KONKRET<sup>[390]</sup> veröffentlicht. Mit freundlicher Genehmigung des Verlags (siehe Anhang A4.5) wurden ausgewählte Inhalte und Abbildungen übernommen.

## Fachliche Hintergründe: Silikone

Chemisch betrachtet handelt es sich bei Silikonen um polymere siliziumorganische Verbindungen, sog. Polyorganosiloxane. Die das Silikon aufbauenden Moleküle sind aus einer alternierenden Abfolge von Silizium- und Sauerstoffatomen aufgebaut, wobei freie Valenzen des Siliziums durch organische Gruppen, meist Methylgruppen, abgesättigt sind (siehe auch Abbildung 120). Das anorganische Grundgerüst (-Si-O-Si-O) ist ebenso wie die Methylgruppen verhältnismäßig reaktionsträge, was in einer Beständigkeit gegen hohe Temperaturen, UV-Strahlung und Witterung resultiert. Die elastischen Eigenschaften des Silikons sind vor allem auf die hohe Flexibilität des Si-O-Si-Bindungswinkels im Bereich zwischen 120 – 150 °C zurückzuführen. Darüber hinaus existieren zwischen größeren Molekülen aufgrund der Abschirmung der polaren Si-O-Bindungen durch die Methylgruppen meist nur schwache intermolekulare Wechselwirkungen, was die Elastizität ebenfalls begünstigt <sup>[395]</sup>.

Ebenso wesentlich für die Eigenschaften des Silikons sind neben diesem Grundgerüst auch die Anzahl der Verknüpfungen – sog. Funktionalitäten – zwischen den einzelnen Monomeren. Diese bestimmt, ob die Produkte linear, verzweigt oder vernetzt polymerisieren, was wiederum Stoffeigenschaften, wie etwa die Viskosität oder Härte des Silikons beeinflusst. Beispielsweise sind Silikonöle meist kurzkettige Reaktionsprodukte mono- und difunktionaler Organosiloxane. Silikonkautschuk und Silikonelastomere hingegen bestehen meist aus stärker vernetzten Molekülen, die aus der Reaktion tri- oder tetrafunktionaler Organosiloxane entstehen. Abbildung 120 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Silikonwerkstoffe mit ihren Eigenschaften und typischen Anwendungen.

Monofunktionell	Difunktionell	Tri-/Tetrafunktionell
$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \\ \text{H}_3\text{C} - \text{Si} - \text{O} - \text{Si} - \text{CH}_3 \\   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$ <p><b>Eigenschaften</b> Dimere (bzw. kurzkettige Moleküle), geringe Viskosität</p> <p><b>Verwendung</b> Entschäumer, Hydraulikflüssigkeit, Schutzgruppen</p>	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \\   \quad   \quad   \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}- \\   \quad   \quad   \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array}$ <p><b>Eigenschaften</b> Wasserabweisend, elektrisch isolierend, hohe Substrataktivität (Haftung)</p> <p><b>Verwendung</b> Kosmetik, Behandlung von Textilien, Trenn-, Gleit- Dichtungsmittel</p>	$\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{R} \quad \text{O} \\   \quad   \quad   \\ -\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{R} \\   \quad   \quad   \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \\   \quad   \quad   \\ \text{R}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}- \end{array}$ <p><b>Eigenschaften</b> Gummielastische Feststoffe, Temperatur- und UV-Beständigkeit, Elastizität</p> <p><b>Verwendung</b> Dichtungs- / Dämpfungsmaterialien, Backformen, plastische Chirurgie</p>

Abbildung 120 – Übersicht von Aufbau und Eigenschaften mono-, di-, tri- und tetrafunktionaler Silikone. Die Funktionalitäten sind rot eingefärbt. Abbildung modifiziert in Anlehnung an SCHLIEBS ET AL. <sup>[396]</sup>.

Darüber hinaus kann der Werkstoff Silikon auch mit hochporösen Strukturen hergestellt werden, wodurch sich weitere Anwendungsbereiche für dieses Material eröffnen. Letzteres ist Gegenstand aktueller Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung und wird in diversen

fachwissenschaftlichen Übersichtsartikeln ausführlich beschrieben <sup>[397]</sup>. Aufgrund der porösen Struktur verfügen diese Materialien über hohe Oberflächen (bis etwa  $1000 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ), die das Material – kombiniert mit der bereits erwähnten thermischen Stabilität – zu vielversprechenden Kandidaten für Anwendungen in Bereichen der Stofftrennung, Katalyse und Sensorik machen <sup>[398, 399]</sup>.

### **Chemische Grundlagen zur Herstellung von makroporösen Silikonen**

In vorherigen Kurstagen haben sich die SuS bereits über die Herstellung mesoporöser Silica sowie Metalloxide ein grundlegendes Verständnis des Templatverfahrens als chemisches Synthesekonzept erarbeitet. Die Synthese des porösen Silikonschwammes verläuft in vielerlei Hinsicht ähnlich unter Verwendung von Tensiden und eines Soft-Matter-Templatierungsverfahrens und knüpft somit an die bereits erarbeiteten Grundlagen an.

Für die Synthese des porösen Silikonschwamms dienen die Phasengrenzen eines kontinuierlichen Zweiphasengebietes, welches auch Mikroemulsion genannt wird, als Templat. Diese Mikroemulsion, die den SuS modellhaft auf Teilchenebene in Abbildung 121 schematisch dargestellt wird, bildet sich durch Zugabe einer weiteren organischen Komponente zur Tensidlösung. Im Falle der Herstellung des hier beschriebenen porösen Silikonschwamms handelt es sich bei dieser Komponente um Silikonvorläuferverbindungen, sog. Alkoxysilane. Alkoxysilane sind Siliciumanaloga der Alkane, bei denen die Wasserstoff-Atome durch Alkylreste sowie Alkoxygruppen  $\equiv\text{Si}(\text{O}-\text{R})$  ersetzt sind (Strukturformel siehe Abbildung 124), weshalb sie sich aufgrund ihres unpolaren Charakters im organischen Phasengebiet lösen. Die resultierende Mikroemulsion ist auf makroskopischer Ebene optisch transparent und besteht auf mikroskopischer Ebene aus zwei verschiedenen, fein verteilten Phasen, welche die Form dünner Kanäle im Nanometerbereich ( $10^{-9} \text{ m}$ ) besitzen und ein willkürlich verzweigtes Netzwerk bilden. Letzteres dient nun als Strukturgeber für die Herstellung des Silikonschwamms, wie Abbildung 121 (links) zeigt <sup>[400, 401]</sup>.

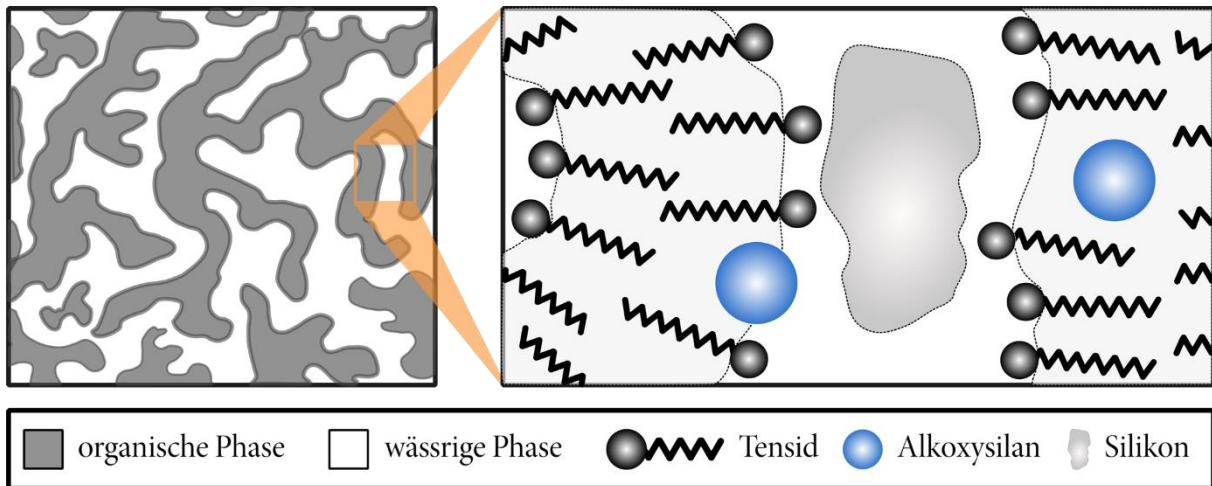


Abbildung 121 - Schematische Darstellung der zwei Phasen einer Mikroemulsion (links). Aufbau des Zweiphasengebiets auf Teilchenebene mit einfachem Modell zur Bildung des Silikons (rechts).

Die Bildung des Silikonschwamms erfolgt zunächst durch eine temperaturinduzierte Diffusion der Alkoxysilane aus der organischen Phase an die Phasengrenze. In diesem Grenzbereich bilden sie im Verlauf einer basenkatalysierten Hydrolyse mit anschließender Kondensation zunächst fein verteilte Partikel (Kolloide), die anschließend zu einem Festkörper polymerisieren [402, 403]. Um die Phasengrenzen bei der Entstehung des Festkörpers abzubilden, muss das entstehende Silikonmaterial im Verlauf dieses auch als Sol-Gel-Prozess bezeichneten Verfahrens ein dreidimensionales Netzwerk bilden, welches die Struktur der Phasen möglichst nicht beeinträchtigt. Letzteres wird durch die Verwendung einer Mischung von di- und trifunktionellen Alkoxysilanen ermöglicht, welche flexibel um die organische Phase herum kondensieren können. Die Porosität des Silikonschwamms wird schließlich erhalten, indem die Tenside durch Waschen mit einem organischen Lösungsmittel (Ethanol) entfernt werden.

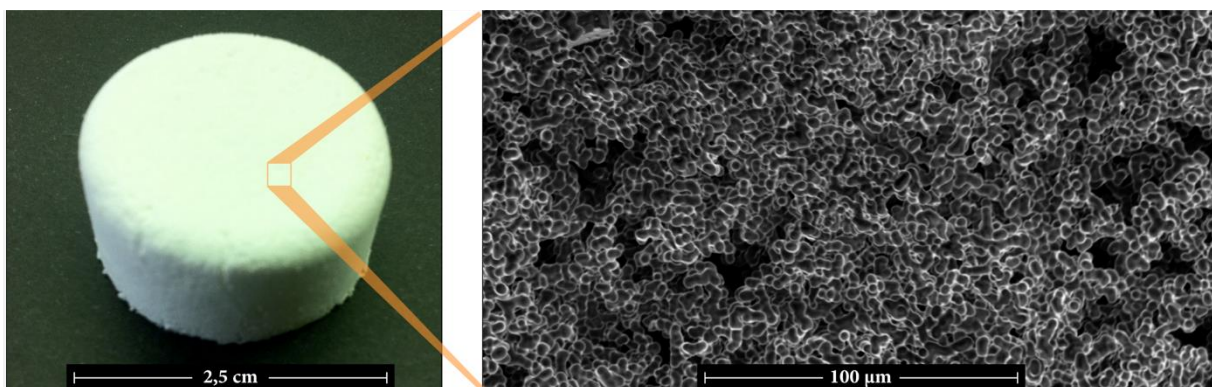


Abbildung 122 – Poröser Silikonschwamm (links) mit REM-Aufnahme des kanalartigen Netzwerkes (rechts). Die hellen Bereiche repräsentieren Poren mit einem Durchmesser im Bereich von ca. 100 – 200 nm.

In dem nachfolgenden Experiment 7.7 stellen SuS in einem Schülerversuch selbst Silikonschwämme her; dabei verwenden sie eine Mikroemulsion als Templat für die Erzeugung der

submikroskopischen Porenstruktur (LL6). Durch die Auswertung werden in vorherigen Versuchen erworbene Inhalte, wie etwa Hydrolyse- und Kondensationsreaktionen, gefestigt und weitere Themengebiete, wie nucleophile Substitution sowie Löslichkeit, am Beispiel eines modernen Funktionsmaterials eingeführt. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Schwämme werden anschließend weiteren Experimenten erschlossen.

### **Experiment 7.7: Herstellung eines makroporösen Silikonschwamms**

Für die Herstellung des makroporösen Silikonschwammes dient in dieser Versuchsvariante eine Mischung eines Di- und Trialkoxysilans als Silikonvorläuferverbindung, für die Erzeugung des Zweiphasengebietetes wird ein Tensid verwendet. Um dessen Funktion als sog. Porogen zu demonstrieren, wird zusätzlich eine vergleichende Synthese ohne diese Komponente durchgeführt.

*Geräte und Chemikalien:* Hexadecyltrimethylammoniumbromid (CTAB, Alfa Aesar) – alternativ: Hexadecyltrimethylammoniumchlorid (CTAC, Alfa Aesar, 21,60 € / 5 g), Trimethoxymethylsilan (TMMS, Sigma-Aldrich), Dimethoxydimethylsilan (Acros Organics, 20 € / 100 mL), Ethanol, Harnstoff, zwei Magnetrührer, zwei Weithalsdosen (15 mL, Material: PTFE, Bezugsquelle: bspw. Roth Laborbedarf), zwei Bechergläser (25 mL), Spatel, Messzylinder (10 mL), zwei Einwegspritzen (1 mL), Ofen mit Temperatureinstellung (beispielsweise Wärmeschrank aus der Biologie), Petrischale.

*Versuchsdurchführung:* Zunächst werden jeweils 4,5 mL demineralisiertes Wasser in die Bechergläser gegeben und darin je 1,5 g Harnstoff gelöst. In eines der beiden Gefäße werden anschließend 0,27 g des Tensides CTAB – alternativ 0,24 g CTAC – hinzugefügt und für 20 Minuten auf hoher Stufe gerührt; der zweite Ansatz, ohne Zugabe eines Tensids, dient als Referenz für den vergleichenden Versuch. Folgend wird in beide Bechergläser jeweils eine Mischung aus 0,9 mL Dimethoxydimethylsilan (DMDMS) und 0,6 mL Trimethoxymethylsilan (TMMS) hinzugegeben und für 60 Minuten gerührt. Zur Vermeidung von Hydrolyse und Kondensationsreaktionen durch Luftfeuchtigkeit sollte hier möglichst zügig gearbeitet oder die Mischung in eine Spritze aufgezogen werden, um den Kontakt mit Luftfeuchtigkeit zu minimieren. Abschließend werden die Lösungen in je eine Weithalsdose umgefüllt, beide Reaktionsgefäße fest verschlossen und für neun Stunden bei 80 °C in den Ofen gestellt.

Nach der Wärmebehandlung und einer Abkühlphase von mindestens drei Stunden wird die überschüssige Flüssigkeit abgegossen. Die Produkte werden vorsichtig mit einem Spatel aus den Behältern gelöst und in eine Petrischale gegeben. Das Produkt aus der Synthese mit Tensid wird folgend mit einem Wasser-Ethanol-Gemisch (1:1) übergossen und per Hand vorsichtig ausgedrückt (Handschuhe), um das Tensid zu entfernen. Dieser Waschvorgang wird mehrmals wiederholt und die Produkte dann über Nacht bei Zimmertemperatur an der Luft getrocknet. Sollte

der Silikonschwamm nach dem Trocknen noch von einer festen Kruste umgeben sein, wird der Wasch- und Trocknungsvorgang nochmals wiederholt.

*Beobachtung:* Die Probe im Reaktionsgefäß, welches das Tensid enthält, beginnt nach dem Rühren zu schäumen und zeigt eine leichte Trübung, in dem anderen Becherglas liegt dagegen eine klare Lösung vor. Unmittelbar nach der Zugabe der Vorläuferverbindungen (DMDMS und TMMS) lösen sich die Schaumblasen auf und das Gemisch wird klar. Nach der Wärmebehandlung im Ofen befindet sich am Boden der Weithalsdose ohne Tensid ein dünnes, weißes Plättchen, wohingegen der Reaktionsansatz mit Tensid zu einem weißen, voluminösen und geleeartigen Körper erstarrt ist. Nach dem Waschen und Trocknen wird ein Festkörper erhalten, der in Farbe und Gestalt einem Marshmallow oder Schwamm ähnelt (siehe Abbildung 123).

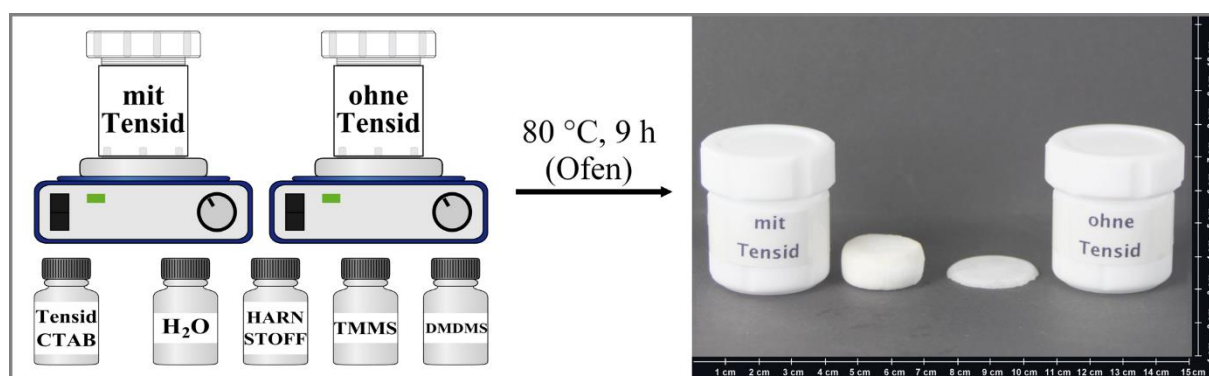


Abbildung 123 – Synthese eines Silikons mit und ohne Tensid (links) und den jeweils erhaltenen Produkten.

*Auswertung:* Die leichte Trübung der Tensidlösung wird durch größere Aggregate mizellarer Strukturen verursacht. Nach Zugabe der Alkoxysilane DMDMS und TMMS entsteht eine farblose transparente Lösung, die den Tyndalleffekt aufweist. Auf Teilchenebene werden diese Beobachtungen damit gedeutet, dass die zugegebenen Alkoxysilane mit dem Tensid ein kontinuierliches Phasengebiet bilden, welches kanalartig die wässrige Phase durchzieht (Mikroemulsion). Die Durchmesser dieser Kanäle (und damit der späteren Porenwände) liegen in einem Größenbereich bis etwa 100 – 200 nm, womit der auftretende Tyndall-Effekt gedeutet werden kann.

Die anschließende Bildung des Festkörpers wird durch eine temperaturinduzierte Diffusion ausgelöst. Durch die erhöhte Temperatur im Reaktionsgefäß gelangen (diffundieren) die Alkoxysilane in die wässrige Phase, werden dort hydrolysiert und kondensieren dann an der Phasengrenze zum Silikon. Abbildung 124 zeigt ein vereinfachtes Reaktionsschema der Hydrolyse und Kondensation von DMDMS und TMMS.



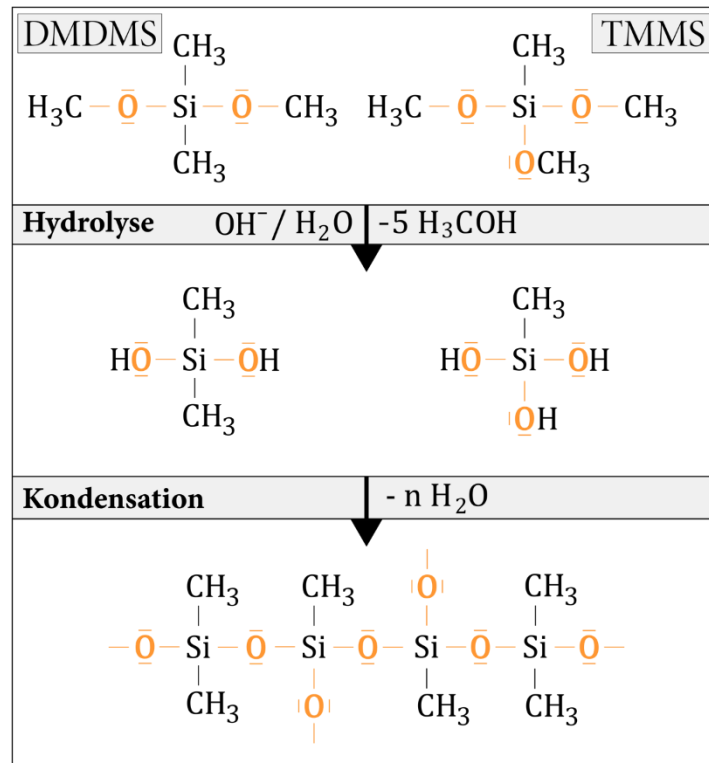
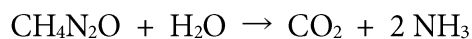


Abbildung 124 – Reaktionsschema der basenkatalysierten Hydrolyse und Kondensation der Alkoxysilane DMDMS und TMMS bei der Bildung eines (porösen) Silikonschwamms.

Die für die basenkatalysierte Hydrolyse bzw. nucleophile Substitution notwendigen Hydroxidionen entstehen durch den Zerfall von Harnstoff in Wasser in Kohlenstoffdioxid und Ammoniak.



Durch anschließendes Waschen mit dem Wasser-Ethanol-Gemisch wird das Tensid entfernt. Die Unterschiede zwischen dem voluminösen porösen Silikonschwamm und dem Plättchen ergeben sich durch die Ausbildung des kanalartigen dreidimensionalen Netzwerkes, dessen Struktur die Alkoxysilane im Verlauf der Kondensation in der wässrigen Phase abbilden (LL5).

*Hinweis:* Die erhaltenen Silikone werden in den nachfolgenden Experimenten auf ihre Eigenschaften untersucht; hierfür benötigen die SuS pro Gruppe vier Schwämme.

### Experiment 7.8: Hydrophobe und lipophile Eigenschaften (makroporöser) Silikone

Aufgrund der vorhandenen Methylgruppen im Molekülbau der Silikone (siehe Abbildung 124) ist deren Oberfläche vorwiegend unpolar (LL5). Im folgenden Experiment untersuchen die SuS die selektive Adsorption von unpolaren Flüssigkeiten und somit auch Anwendungen im Bereich der Stofftrennung. Ein mögliches Beispiel, an welches dieser Versuch angegliedert werden kann, ist die Verwendung von porösen Stoffen zur Entfernung von Ölteppichen nach Tankerunfällen



auf der Meeresoberfläche dar (LL8, LL9) <sup>[188]</sup>. Mit Wasser (polar) und n-Heptan (unpolar) soll dieser Sachverhalt im folgenden Versuch anhand des hergestellten porösen Silikonschwamms (Experiment 7.7) demonstriert werden.

*Geräte und Chemikalien:* Wasser, Methylenblau, n-Heptan, Karminrot, poröser Silikonschwamm, Petrischale, Bechergläser (25 mL).

*Versuchsdurchführung:* Zur besseren Unterscheidung der beiden farblosen Flüssigkeiten werden mit zwei Farbstoffen sowohl Wasser (Methylenblau) als auch n-Heptan (Karminrot) eingefärbt. Anschließend wird je ein poröser Silikonschwamm mit eingefärbtem Wasser (siehe Abbildung 125 links), einer mit eingefärbtem n-Heptan (siehe Abbildung 125 rechts) benetzt.

*Beobachtung:* Das Wasser perlt von der Oberfläche des Schwammes unter Tropfenbildung ab, wohingegen n-Heptan vollständig adsorbiert wird (siehe Abbildung 125).

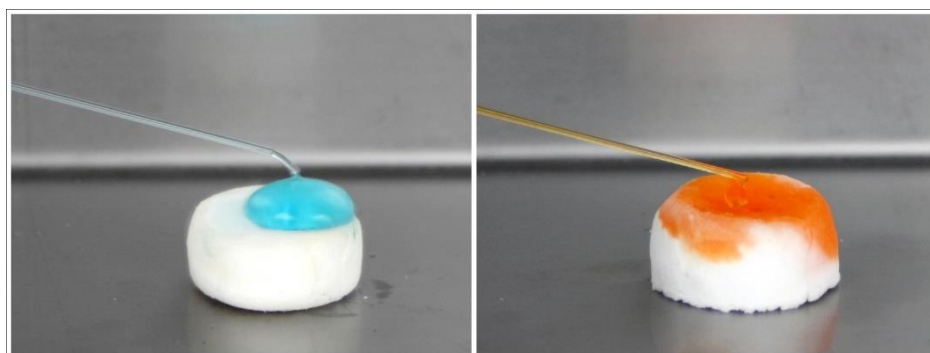


Abbildung 125 – Demonstration der hydrophoben Eigenschaften des Silikons am Beispiel von eingefärbtem Wasser (links) und n-Heptan (rechts).

*Auswertung:* Die Silikon-Moleküle bestehen dabei aus einem anorganischen Grundgerüst (-Si-O-Si-O), dessen Valenzen mit (organischen) Methylgruppen abgesättigt sind. Diese hydrophobe Abschirmung bewirkt, dass im obigen Versuch trotz der porösen Struktur und der großen Oberfläche nur das unpolare n-Heptan adsorbiert werden kann und Wasser als polarer Stoff hingegen abperlt.

### **Experiment 7.9: Vergleich der thermischen Beständigkeit mit herkömmlichen Schwämmen**

Silikone zeichnen sich allgemein durch eine große Beständigkeit gegen hohe und niedrige Temperaturen aus. Diese Beständigkeit von Silikon, die SuS aus dem Alltag bekannt ist, überprüfen sie anhand des hergestellten porösen Silikonschwamms.

#### ***Teil 1: Verhalten bei hohen Temperaturen***

In dem ersten Teilversuch wird die Stabilität und Elastizität bei starker Hitzezufuhr untersucht. Dies erfolgt im Vergleich mit einem handelsüblichen Haushaltsschwamm (Polyurethan).

*Geräte und Chemikalien:* Gasbrenner, Dreifuß, Drahtnetz, Haushaltsschwamm, Silikonchwamm aus Experiment 7.7.

*Versuchsdurchführung:* Jeweils ein kleines Stück des Silikonchwamms und eines Haushaltsschwamms werden entsprechend Abbildung 126 mittig auf einem Gitternetz platziert, das auf einem Dreifuß liegt. Anschließend wird ein Gasbrenner zentral unter den Dreifuß gestellt und entzündet.

*Beobachtung:* Wenige Sekunden nach dem Entzünden des Brenners schmilzt der Haushaltsschwamm zunächst und zersetzt sich anschließend innerhalb kurzer Zeit. Der Silikonchwamm hingegen behält seine Form und Farbe bei. Erst nach mehreren Minuten (bei höheren Temperaturen) beginnt dieser zu glühen und verliert seine Elastizität. Nach dem Abkühlen behält der Schwamm seine ursprüngliche Form bei, ist allerdings spröde und zerfällt bei Berührung.

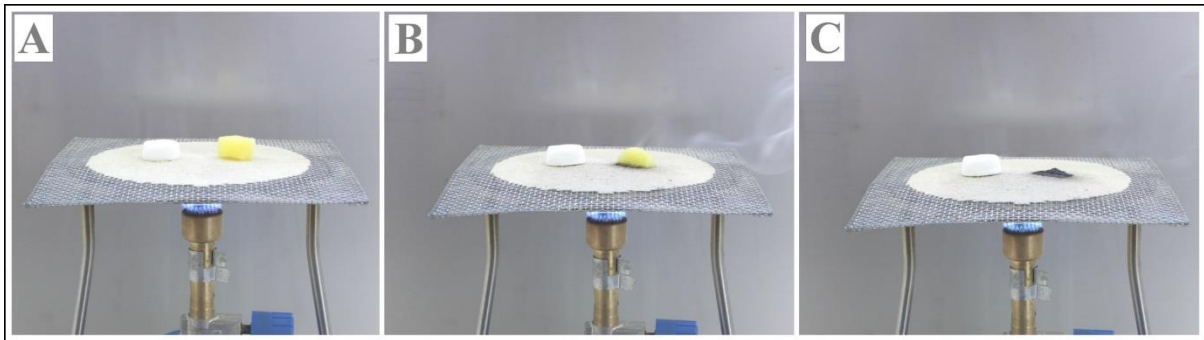


Abbildung 126 – Temperaturbeständigkeit des Silikons bei hohen Temperaturen im Vergleich zu einem Haushaltsschwamm nach einer Erhitzungsdauer von 5 (a), 15 (b) und 35 Sekunden (c).

*Auswertung:* Der aus Polyurethan bestehende Haushaltsschwamm zersetzt sich bei Temperaturen über  $180\text{ °C}$  <sup>[404]</sup>. Im Gegensatz dazu verleiht das stabile anorganische -Si-O-Gerüst des Silikons in Kombination mit den reaktionsträgen Methylgruppen dem Schwamm eine große Temperaturbeständigkeit, sodass dessen Struktur und Eigenschaften auch bei hohen Temperaturen erhalten bleiben. Erst bei hohen Temperaturen ( $> 400\text{ °C}$ ) verbrennen die organischen Bestandteile des Silikons; ein poröses und entsprechend sprödes  $\text{SiO}_2$ -Gerüst bleibt zurück.

### **Teil 2: Verhalten bei niedrigen Temperaturen**

In Anlehnung an den vorherigen Versuch soll im Folgenden die Wirkung sehr niedriger Temperaturen ( $-196\text{ °C}$ ) auf Stabilität und Elastizität des porösen Silikonchwamms demonstriert werden.

**Sicherheitshinweis:** Das Arbeiten mit flüssigem Stickstoff birgt Gefahren – je nach experimentellem Geschick der Lerngruppe kann der dieser Versuch als Schüler-, Schülerdemonstrations- oder Lehrerdemonstrationsversuch durchgeführt werden.

**Geräte und Chemikalien:** Dewar-Gefäß mit flüssigem Stickstoff, Pinzette, Silikonschwamm, Haushaltsschwamm.

**Versuchsdurchführung:** Mit einer Pinzette wird der Silikonschwamm für einige Sekunden in den flüssigen Stickstoff getaucht, dann wieder entnommen und durch Zusammenpressen hinsichtlich seiner Elastizität untersucht. Selbiges wird mit einem handelsüblichen Haushaltsschwamm wiederholt.

**Beobachtung:** Mit einer Pinzette lässt sich selbst nach längerer Zeit im flüssigen Stickstoff der poröse Silikonschwamm problemlos zusammendrücken und nimmt anschließend auch wieder seine ursprüngliche Form an (siehe Abbildung 127); zudem entweichen dem Schwamm bei dem Zusammendrücken wenige Tropfen der kühlen Flüssigkeit. Der Haushaltsschwamm hingegen verliert unter diesen Bedingungen seine Elastizität und zerbricht bei Druckausübung.



Abbildung 127 – Silikonschwamm in Flüssigstickstoff (links) und anschließender Flexibilitätstest (rechts).

**Auswertung:** Die Porenstruktur ermöglicht den Erhalt der Flexibilität des Silikonschwamms auch unter sehr kalten Bedingungen, wie im Falle der Adsorption von flüssigem Stickstoff (LL5). Zusätzlich wirkt dabei auch der flexible -Si-O-Si-Bindungswinkel, der sich ähnlich wie eine Schere in einem Bereich von 120 - 150 ° leicht öffnen und schließen lässt (siehe Abbildung 128). Darüber hinaus wird die Flexibilität durch eine niedrige Rotationsbarriere um die -Si-O-Kette begünstigt <sup>[405–407]</sup>.

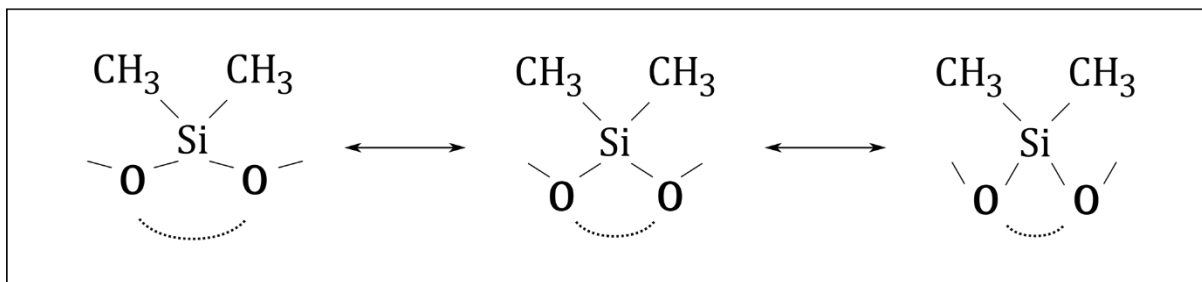


Abbildung 128 – Öffnung und Schließung des Si-O-Winkels bei Silikonpolymeren.

### Experiment 7.10: Gasadsorption und –speicherung

Zusätzlich zu Flüssigkeiten können auch Gase an der großen Oberfläche des porösen Silikonschwamms adsorbieren. Mit einem einfachen Versuchsaufbau untersuchen SuS in diesem Experiment zum einen die zugrundeliegende Struktur-Eigenschafts-Beziehung der porösen Struktur (LL5), zum anderen wird eine mögliche Anwendung als Gasspeicher am Beispiel niederer Alkane (Feuerzeuggas, LL8) qualitativ demonstriert. Darüber hinaus untersuchen sie mit einer einfachen gravimetrischen Methode, wie lange die adsorbierten Gase im Vergleich zu anderen Materialien gespeichert werden können.

*Hinweis:* Da die Messgenauigkeit mit zunehmender Anzahl an Silikon-Schwämmen steigt, arbeiten in diesem Versuch zwei Schülergruppen zusammen.

*Geräte und Chemikalien:* Zwei Einwegspritzen (50 mL), Zweiwegehahn, Feuerzeuggas, je vier poröse und unporöse Silikon Schwämme aus Experiment 7.7, Haushaltsschwamm, Feuerzeug, Analysenwaage, Petrischale.

*Versuchsdurchführung, Variante A*<sup>38</sup>: Eine Einwegspritze wird durch Aufsetzen der Kartusche vollständig mit Feuerzeuggas befüllt, welches anschließend behutsam auf die Silikon Schwämme aufgeleitet wird. Letztere werden nun in eine weitere leere Einwegspritze gegeben, der Stempel wird bis auf das Eigenvolumen der Silikone herabgesenkt (ohne diese zusammenzupressen) und mit der Hand fixiert. Eine zweite Spritze wird über einen Zweiwegehahn mit ersterer verbunden und nun deren Stempel herausgezogen. Lässt sich der Stempel aufgrund des entstehenden Vakuums nicht weiterbewegen, wird der Hahn zugedreht und die zweite Spritze abgeschraubt. Danach wird eine stumpfe Kanüle als Flammenfalle aufgesetzt und der Spritzeninhalt bei vorgehaltener Feuerzeugflamme herausgedrückt und entzündet (siehe Abbildung 129). Der Versuch wird anschließend mit vier Haushaltsschwämmen gleichen Volumens wiederholt.

<sup>38</sup> Die Spritzentechnik der Variante A des Versuches zur Gasadsorption und –speicherung basiert auf einem Demonstrationsexperiment von ALFRED FLINT auf dem GDCh Wissenschaftsforum Chemie 2013 in Darmstadt.

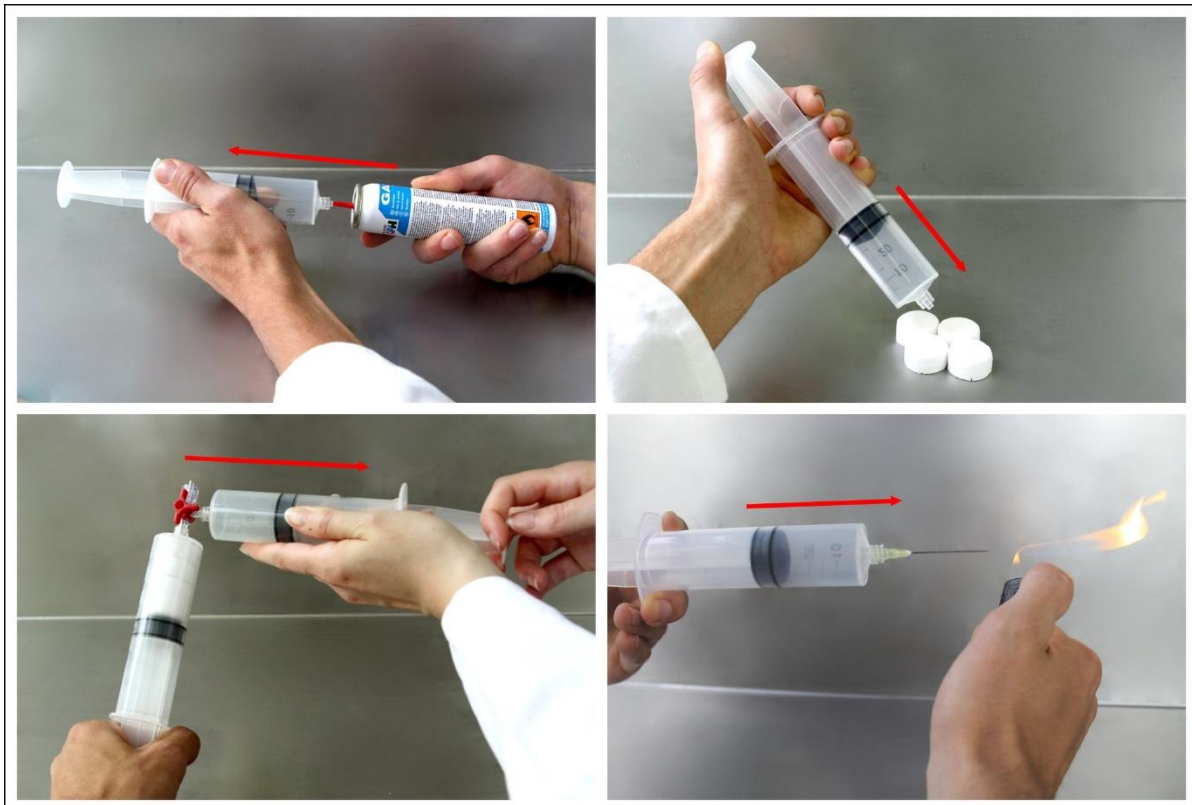


Abbildung 129 – Untersuchung der Gasadsorption poröser Silikonschwämme. Abfüllen des Gases (oben links), Aufleiten des Gases auf die porösen Schwämme (oben rechts), Entnahme des gespeicherten Gases durch Erzeugung eines Unterdrucks (unten links), Nachweis des Gases über die Brennbarkeit (unten rechts).

*Versuchsdurchführung, Variante B:* Für die Messung der Speicherfähigkeit von Feuerzeuggas werden die Silikonschwämme auf die Waage gelegt und diese tariert. Im Anschluss werden Ersterer an einem gut belüfteten Ort in einer Petrischale mit dem Feuerzeuggas in Kontakt gebracht, indem die Düse der Kartusche auf den Boden der Petrischale aufgesetzt wird. Die vier Schwämme werden mittig auf der Waage platziert, die angezeigte Masse alle 30 Sekunden notiert (siehe Abbildung 130). Vergleichend zur Gasspeicherfähigkeit des porösen Silikonschwamms können verschiedene Materialien ebenfalls analog dazu untersucht werden, wie beispielsweise ein Haushaltsschwamm oder auch das unporöse Silikonplättchen aus Versuch 7.7. Die Daten werden in einem Masse-Zeit-Diagramm aufgetragen und verglichen.

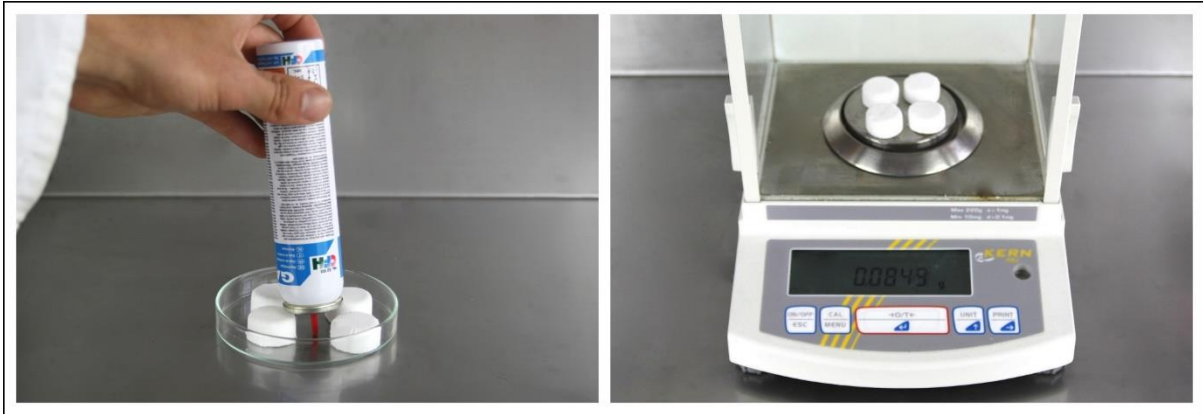


Abbildung 130 – Aufleiten des Gases auf die Silikonschwämme (links), gravimetrische Bestimmung der Gasspeicherung (rechts).

*Beobachtung:* Wird der Inhalt der Spritze, die zuvor den Silikonschwämmen das Gas entzogen hat, in eine Flamme geleitet, entsteht eine Stichflamme. Diese ist im Vergleich zu dem zweiten Teilversuch mit Haushaltsschwämmen deutlich größer.

Im zweiten Teilversuch (Variante B) können zu Beginn von dem porösen Silikon mehr als 80 mg Gas adsorbiert werden. Die Werte für die Masse des adsorbierten Gases sinken in den ersten zwei Minuten stark bis auf etwa 21 mg ab. Danach zeigt die Kurve einen Verlauf mit einer nur noch geringfügig abfallenden Steigung. Dabei halbiert sich die Masse des adsorbierten Gases etwa alle 12 Minuten. Bei dem Haushaltsschwamm fällt die Kurve bereits in der ersten Minute sehr stark ab und beträgt nach einer Minute nur noch etwa 7 mg. An unporösem Silikon adsorbiert nahezu gar kein Feuerzeuggas (siehe Abbildung 131).



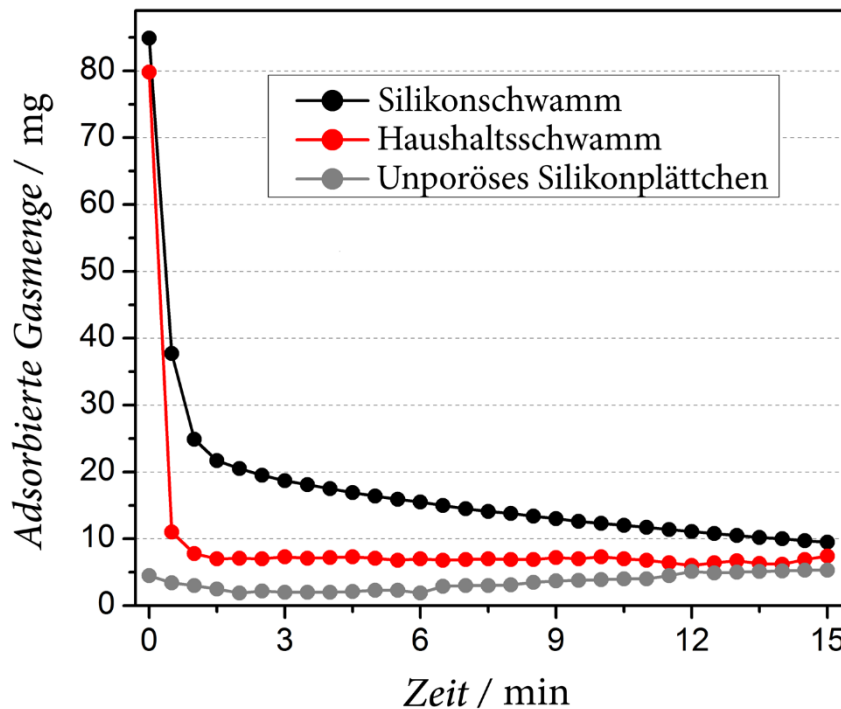


Abbildung 131 – Zeitlicher Verlauf der in den Silikonschwämmen gespeicherten Masse an Feuerzeuggas im Vergleich zu unporösem Silikon und einem Haushaltsschwamm. Es wurden jeweils vier Schwämme mit einem Gesamtvolumen von insgesamt etwa  $100 \text{ cm}^3$  verwendet.

*Auswertung:* Beide Versuche zeigen, dass das poröse Silikon in der Lage ist, eine relativ hohe Menge Feuerzeuggas an der inneren Porenoberfläche der Schwämme zu adsorbieren – die Menge entspricht einem Gasvolumen von etwa  $31 \text{ cm}^3$  oder 125 % des Eigenvolumens jedes Schwamms. Zudem kann das Gas im Vergleich zu den anderen beiden Materialien über einen längeren Zeitraum gespeichert werden. Schon nach 30 Sekunden sind knapp 90 % des am Haushaltsschwamm adsorbierten Gasgemisches wieder desorbiert (zum Vergleich poröses Silikon: 56 %). Weiterhin beträgt die gespeicherte Gasmenge nach drei Minuten noch das Dreifache, nach acht Minuten noch das Doppelte der im Haushaltsschwamm adsorbierten Menge (siehe Abbildung 131).

Die hohe Adsorption des porösen Silikonschwamms ist sowohl auf die im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialien sehr große Oberfläche als auch auf den unpolaren Charakter der Porenwände (Methylgruppen) zurückzuführen, mit dem das unpolare Feuerzeuggas (unter anderem Ethan, Propan, Butan) anziehend wechselwirkt (LL5, LL8).

### Abschluss und Ergebnissicherung

Im Unterrichtsgespräch zum Abschluss des Kurstages werden erneut die Messwerte, Beobachtungen und Auswertungen gesammelt und verglichen; hierüber findet gleichzeitig die Ergebnissicherung des Kurstages statt.

Über die Grenzen der einzelnen Versuchstage hinaus sollen abschließend die gewonnenen Erkenntnisse des gesamten Kurses miteinander verknüpft werden. Hierzu erhalten die SuS die Aufgabe, das während des Kurses erworbene Wissen zu den Materialien und Synthesekonzepten in einer ConceptMap zu sichern. Die Methode der ConceptMap bietet dabei im Vergleich zu einer MindMap einen höheren Grad der Strukturiertheit – dies verlangt von den SuS entsprechend eine trennschärfere Unterscheidung zwischen den behandelten Synthesekonzepten und bietet ihnen dennoch die Möglichkeit, verbindende Elemente aufzuzeigen. Abbildung 132 zeigt eine mögliche Lösung.

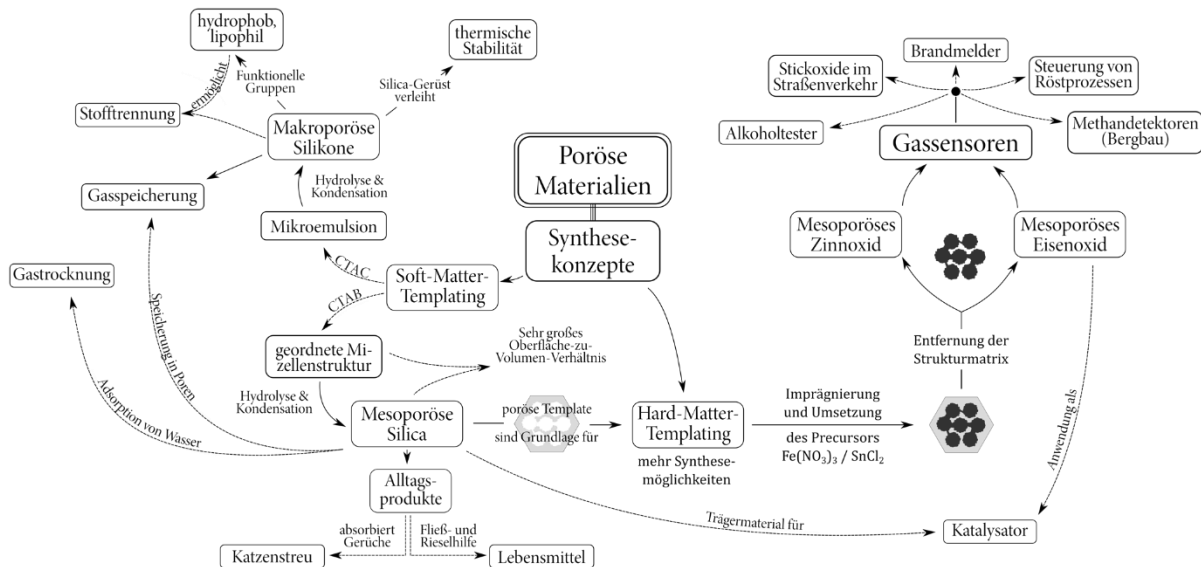


Abbildung 132 - Beispiel einer Recherche-Map zu porösen Materialien und ihren Synthesekonzepten.

### Abschlussbetrachtung des Kurstages

In dem abschließenden Kurstag untersuchen SuS am Beispiel der alltagsbekannten Stoffklasse Silikone, wie mit Hilfe moderner Synthesemethoden Materialien durch Veränderung ihrer Struktur zusätzliche Stoffeigenschaften verliehen werden können. Durch Erzeugung von Poren mit nanoskaliger Größe zeigt der hier beschriebene Silikonschwamm trotz eines vergleichbaren molekularen Aufbaus eine höhere Elastizität und ein größeres Adsorptionsvermögen als das entsprechende unporöse Analogon, was die Teilnehmenden in einfachen Experimenten erarbeiten können.

Anhand der Experimente werden bereit in den ersten Kurstagen erarbeitete Inhalte Hydrolyse, Kondensation gefestigt sowie Stofftrennung und –speicherung – je nach Lerngruppe – eingeführt oder vertieft. Dabei ergeben sich auch gute Möglichkeiten, diese und weitere Inhalte, wie etwa Löslichkeit oder Mizellenbildung auf einfache Weise miteinander zu vernetzen, womit sich das Thema Funktionserweiterung durch Porosität beispielsweise zur Vorbereitung auf das Abi-



tur eignet. Zudem bestehen gute Möglichkeiten, mithilfe der porösen Silikonschwämme umweltrelevante Fragestellungen zur Stoffspeicherung oder -trennung zu erschließen. Dabei können etwa Öltankerunfälle oder Wasseraufbereitung als Kontext für eine unterrichtliche Behandlung dienen.

### 7.3 Angebote für die Lehrerbildung

Lehrkräfte spielen bei der Implementierung neuer Themengebiete in den Chemieunterricht eine zentrale Rolle – sie entscheiden zwischen „make it“ und „brake it“<sup>[95,96]</sup>. Für eine erfolgreiche Implementierung sind hierbei mehrere Faktoren von großer Bedeutung – ein wichtiger ist das Fachwissen. Die eingangs präsentierte Studie zu Perspektiven der Lehrkräfte in Kap. 6.2 hat dargelegt, dass viele aktuell unterrichtende Lehrkräften ihre Fachkenntnisse zum Thema „Nano“ als eher gering einschätzen. Der Mangel an Fachwissen – eng verknüpft mit dem eigenen Zutrauen, entsprechende Themengebiete zu unterrichten – stellt in vielen Fällen und über Fachgrenzen hinweg eine signifikante Barriere für die unterrichtliche Umsetzung von Unterrichtsfächern und –themen dar, wie Studien von KÄHKÖHNEN<sup>[231]</sup>, BINGIMLAS<sup>[232]</sup> und NEWHOUSE<sup>[233]</sup> belegen. CHACHIBAIA bringt es auf den Punkt:

*“Before students can learn, their teachers must gain mastery at working with these concepts, or at least achieve a threshold comfort level.”<sup>[234]</sup>*

Aus diesen Aussagen lässt sich auch ableiten, dass die Erstellung von didaktisch strukturierten Unterrichtsmaterialien allein nicht ausreicht – damit sie Eingang in die unterrichtliche Praxis finden, müssen vielmehr parallel zu den erstellten Unterrichtsinhalten auch entsprechende Ausbildungs- und Fortbildungsmöglichkeiten für Lehrkräfte angeboten werden. In der vorliegenden Arbeit werden daher entsprechende Projekte für Phase I (Universitäre Lehramtsausbildung) als auch Phase II (Fortbildungen) der Lehrerbildung entwickelt.

#### 7.3.1 Projekt 8: Integration in die grundständige Lehramtsausbildung

##### 7.3.1.1 Ziele und Beschreibung des Projekts

Die eingangs präsentierte Untersuchung der Curricula und Modulbeschreibungen von deutschen lehrerbildenden Hochschulen (Kap. 3.3.1) hat gezeigt, dass „Nano“ in der universitären Lehramtsausbildung bislang noch kaum Einzug gehalten hat. Zwar existieren an den Hochschulen inzwischen vielfältige Angebote zu Nanotechnologie, diese fokussieren allerdings in den meisten Fällen Studierende der Fachwissenschaften und nicht des Lehramts; aus den Ergebnissen der Studie von KULINOWSKI wird deutlich, dass dieser Trend im amerikanischen Raum ebenfalls zu beobachten ist<sup>[408]</sup>.

Um nun Lehramtsstudierenden an der Georg-August-Universität Göttingen ein spezifisches Angebot zur Behandlung dieses Themengebietes in Vermittlungszusammenhängen zu ermöglichen, bieten sich mehrere Optionen. Idealerweise würde ein solches Lehrangebot den interdisziplinären Charakter der Nanowissenschaften reflektieren und entsprechend fächerverbindend in Kooperation mit anderen naturwissenschaftlichen Disziplinen aufgreifen. Leider existiert

hierzu an der Georg-August-Universität für die Lehramtsausbildung bislang kein entsprechendes Modul, welches eine geeignete Möglichkeit zur Integration bietet – die Erstellung eines solchen stellt allerdings eine interessante Perspektive für zukünftige Arbeiten dar.

Für das vorliegende Projekt wurde im Rahmen der verfügbaren Zeit und Möglichkeiten die Integration in bestehende Strukturen angestrebt. In Absprache mit den Lehrverantwortlichen wurde an der Georg-August-Universität Göttingen das Anorganisch-Chemische Grundpraktikum für Lehramtskandidaten <sup>[409]</sup> ausgewählt. Bei diesem Modul handelt es sich um das erste Laborpraktikum für Studierende des Lehramts; es ist für das dritte Fachsemester vorgesehen und besteht aus Theorieseminar und Laborpraktikum. Vorteilhaft ist, dass durch diese Wahl die Studierenden frühzeitig in ihrer Ausbildung erreicht werden können und insbesondere, dass viele geeignete und einfach durchzuführende Experimente zum Themengebiet „Nano“ der anorganischen Chemie zuzuordnen sind.

Im vorliegenden Projekt wurde daher ein Konzept für einen Praktikumstag mit Theorieseminar im Rahmen dieses Moduls entworfen, woraus nachfolgend ausgewählte Inhalte vorgestellt werden sollen. Das konkrete Ziel dieses Projekt ist es, Lehramtsstudierenden einen ersten theoretischen und experimentellen Einblick in das Themengebiet „Nano“ zu ermöglichen, um somit Barrieren für dessen unterrichtliche Implementierung bei künftigen Lehrkräften zu reduzieren.

### 7.3.1.2 *Inhalte und didaktisch-methodische Überlegungen*

Eigene Umfragen unter Lehramtsstudierenden mit Fach Chemie (drittes und fünftes Fachsemester) mit dem in Kap. 6.1 präsentierten Fragebogen zeigen fachlich elaboriertere Antworten und auch differenziertere Bewertungen des Einsatzes junger Technologien – dennoch können die Studierenden in vielen Fällen nicht mehr Anwendungen oder Einsatzgebiete von Nanotechnologie nennen, als SuS. Dies kann etwa darauf zurückgeführt werden, dass das Themengebiet im Grundstudium an der Georg-August-Universität Göttingen bei Lehramtskandidaten keine hervorgehobene Rolle spielt. Unabhängig von der Ursache muss für die Konzeption jedenfalls davon ausgegangen werden, dass wenige bis keine fachlichen Vorkenntnisse zu „Nano“ bei den Lernenden vorhanden sind.

Im Hinblick auf die Lernziele kann im Rahmen eines Tages nicht erwartet werden, dass Studierende *“mastery at working with these concepts”* oder auch einen *“threshold comfort level”* <sup>[234]</sup> (siehe oben) erlangen können – die in diesem Rahmen vermittelten Inhalte und Erfahrungen sollen vielmehr als Ausgangspunkt dienen, um im späteren Berufsleben einfacher ein solches Level zu erreichen. Auf diese Weise sollen die oben aufgeführten Barrieren für die unterrichtliche Implementierung von „Nano“ bei künftigen Lehrkräften reduziert werden.

Die Konzeption des Theorieseminars erfolgte unter den drei zentralen Fragestellungen „Was ist Nanotechnologie und welche Bedeutung wird ihr zugemessen?“, „Warum soll Nanotechnologie unterrichtet werden?“ und „Wie soll es unterrichtet werden?“. Diese drei Fragen sollen gleich

zum Einstieg der Veranstaltung offengelegt werden, da sie mit hoher Wahrscheinlichkeit die Fragen und auch Erwartungen der Teilnehmenden reflektieren.

Anknüpfend an die erste Fragestellung zielt der **erste Abschnitt** „Was ist Nanotechnologie und welche Bedeutung wird ihr zugemessen“ darauf ab, Studierenden ein die elementaren Grundlagen der Nanotechnologie zu vermitteln; diese umfassen

- Die Bedeutung und den interdisziplinären Charakter der Nanowissenschaften (LL1, LL2),
- eine geeignete (Arbeits-)Definition,
- die nanoskalige Größendimension (LL3),
- Morphologien von Nanomaterialien und nanostrukturierten Materialien (LL4),
- das Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis (LL5),
- Quanteneffekte und Quantum Dots (LL6),
- Synthesestrategien (Top-Down und Bottom-Up, LL6) sowie
- Alltagsanwendungen und –anschlüsse (LL8).

Begleitende Aufgabenstellungen erhöhen hierbei die Lerneraktivität und dienen zudem der Ergebnissicherung. Da nur vergleichsweise wenig Zeit zur Verfügung steht, kann an dieser Stelle nur ein erster thematischer Überblick vermittelt werden. Im anschließenden Laborpraktikum soll dieses Wissen über experimentelle Zugänge veranschaulicht und gefestigt werden. Zudem werden interessierten Teilnehmenden weitere Informationen zur eigenen Erarbeitung zur Verfügung gestellt.

Nachdem die fachlichen Grundlagen behandelt wurden, fokussiert der **zweite Abschnitt** Fragen zur schulischen Umsetzung. Handelt es sich um ein geeignetes Thema für den Chemieunterricht? Wie kann man das Thema vermitteln? Ist es nicht besser für die Universität geeignet? Hierbei soll nicht nur verdeutlicht werden, welche Anknüpfungspunkte „Nano“ an klassische Inhalte des Chemieunterrichts bietet, sondern auch multiperspektivisch auf das didaktische Potenzial dieses Themengebiets eingegangen werden. Hierbei werden den Studierenden auch ausgewählte didaktische Elemente präsentiert, wie etwa die ermittelten Schüler- und Lehrerperspektiven (Kap. 6.1.4 und 6.2.4) sowie in aller Kürze der Status Quo einer Nanoscience Education in Deutschland (Kap. 3). Das Ziel ist es hierbei, den dort dargestellten Bedarf nach einer Implementierung von „Nano“ in den Chemieunterricht und auch die Kerncurricula zu diskutieren.

Aufbauend auf fachlichen Grundlagen und fachdidaktischer Betrachtung werden im **dritten Abschnitt** experimentelle Zugänge für die unterrichtliche Behandlung von „Nano“ in Schule und Schülerlabor vorgestellt. Um die Vielfalt an Möglichkeiten zu illustrieren, wird auch hier einer breiteren Übersicht an Themen Vorzug gegeben vor einer detaillierteren Betrachtung eines einzelnen Sachverhaltes. Die vorgestellten Themenschwerpunkte (etwa Nanoporöse Materialien, Zinkoxid-, Titandioxid-Nanopartikel, Gassensoren, Silica) decken sich hierbei mit den

Experimenten des anschließenden Laborpraktikums. Es handelt sich dabei größtenteils um die (schulisch erprobten) Versuche, welche in den Projekten 1-4 dieser Arbeit vorgestellt wurden, ergänzt durch einige illustrative Experimente aus der fachdidaktischen Literatur (Synthese und Magnetismus von Ferrofluiden <sup>[410]</sup>, Herstellung einer superhydrophoben Schicht durch Beru-  
ßen eines Objektträgers <sup>[61]</sup>).

Darüber hinaus werden den Studierenden entsprechende Materialien für den Unterrichtsein-  
satz zur Verfügung gestellt; dabei handelt es sich sowohl um einzelne Experimente und Unter-  
richtsmaterialien als auch um Unterrichtseinheiten. Auch wenn diese Materialien nicht mehr in  
der Präsenzzeit behandelt werden können, bieten sie interessierten Studierenden einen Einblick  
in eine Möglichkeit der schulischen Umsetzung und allen Teilnehmenden Materialien für die  
Zukunft.

Die vollständigen Materialien zum Theorieseminar und auch zum Laborpraktikum (Prakti-  
kumsskript mit Versuchsvorschriften und Musterlösungen) finden sich im Anhang (A3.17,  
A3.18).

### 7.3.1.3 Evaluation und Fazit

Analog zu den bisher beschriebenen Projekten wurde das vorliegende Konzept ebenfalls quali-  
tativ-explorativ evaluiert, um mit dem Feedback die Basis für eine zukünftige Optimierung des  
Angebotes zu erhalten. Es gelten analog die in Kap. 7.1.1.4 beschriebenen Einschränkungen zur  
Aussagekraft einer Umfrage unter diesen Voraussetzungen und mit einer entsprechend kleinen  
Stichprobe. In sechs offenen Fragen wurde erhoben, (1) was die Studierenden an Seminar und  
Praktikum positiv oder kritisch bewerten, (2) was sie ggf. noch von Seminar und Praktikum  
erhofft haben, (3) was sie als wichtigsten Lerninhalt bewerten und (4) worüber sie gerne mehr  
erfahren hätten. Darüber hinaus wurden zwei Multiple-Choice-Fragen gestellt, ob die Studie-  
renden in ihrem weiteren Studium gerne mehr zum Themengebiet „Nano“ erfahren möchten  
und wie hilfreich sie Theorieseminar und Praktikum für ihren späteren Beruf einschätzen.

---

#### Aufbau des Fragebogens

---

1. Was hat dir an dem Seminar zum „Nano“-Tag ... gut gefallen? / ... nicht so gut gefallen?

---

2. Was hättest du dir ggf. noch von dem Seminar erhofft?

---

3. Was hat dir an dem Praktikum zum „Nano“-Tag ... gut gefallen? / ... nicht so gut gefallen?

---

4. Was hättest du dir ggf. noch von dem Praktikum erhofft?

---

5. Das Wichtigste, was ich zum Thema „Nano“ gelernt habe, ist ...

---

6. Ich hätte gerne mehr erfahren über ...

---

7. Würdest du in deinem Studium gerne mehr zum Thema „Nano“ erfahren? (Antwortmöglich-  
keiten: Ja, viel mehr / Ja, etwas mehr / Nein, nichts mehr).

- 
8. Insgesamt bewerte ich den „Nano“-Tag für meinen späteren Beruf als ... (Antwortmöglichkeiten: sehr hilfreich / hilfreich / wenig hilfreich / nicht hilfreich).
- 

Eine Kopie des gesamten Fragebogens befindet sich im Anhang (A3.18). Tabelle 27 gibt einen Überblick über die wichtigsten Antworten und zugehörige Zitate.

Tabelle 27 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.

Ergebnis / Auswertung	Zitate
<ul style="list-style-type: none"> <li>Zum Theorie-seminar wurden Aktualität, Relevant des Themas positiv bewertet; insbesondere die Alltagsanbindungen und auch der Bezug zum Lehramt wurden hervorgehoben. Kritisch wurde oftmals die knappe verfügbare Zeit angemerkt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Der Bezug zum Profil Lehramt“ / „Interessanter Vortrag: Viel neues Wissen, gute Beispiele zu Alltagsbezügen“ / „Mehr Zeit für ein so großes Thema.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Hinsichtlich des Praktikums wurden von sehr vielen Teilnehmenden die einfachen und anschaulichen Experimente positiv bewertet. Gleichzeitig wurde auch hier angemerkt, dass die Auswertung ausführlicher sein sollte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Interessante und einfache Versuche, Ergebnisse waren deutlich zu erkennen“ / „Besprechung der Ergebnisse, da es sonst in’s Leere läuft“ / „Die Ferrofluide haben mir gut gefallen, auch wenn sie nicht so gut geklappt haben.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Am wichtigsten wurden oftmals die Erkenntnisse betrachtet, dass „Nano“ eine sehr große Bedeutung in Gegenwart und Zukunft besitzt und dessen ungeachtet bislang nur selten in Schulen reflektiert wird.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„... dass es in vielen Bereichen eine entscheidende Rolle spielt (Biologie, Chemie, Wirtschaft etc.) und dass dieses Thema gar nicht in der Schule angesprochen wird (bei mir jedenfalls war es so), obwohl es auch sehr interessant ist.“</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Von den Studierenden wurden breit gefächerte Wünsche nach weiteren Inhalten bzw. Themen zu „Nano“ angegeben. Diese umfassen oftmals Fragen nach weiteren Anwendungen bzw. Lösungen, welche Nanotechnologie in Alltag und Industrie bieten kann.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>„Mehr zum chemischen Hintergrund“ / „Alltagsanwendungen“ / „Wie Nanotechnologie uns helfen kann, Probleme zu beheben („wie das Beispiel mit dem eingesparten CO<sub>2</sub> im Theorie-seminar)“ / „... die Risiken von Nano und ihre Einsatzbereiche“</li> </ul>
<hr/> <ul style="list-style-type: none"> <li>8 / 15 Teilnehmenden würde im weiteren Studium gerne „viel mehr“ zu „Nano“ erfahren, 7 / 15 „etwas mehr“.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>4 / 15 Teilnehmenden bewerten den „Nano“-Tag für ihr späteres Berufsleben als „sehr hilfreich“, 11 / 15 als „hilfreich“.</li> </ul> <hr/>	

Größter Kritikpunkt seitens der Studierenden, der sich in mehreren Fragen wiederfindet, ist der Zeitmangel. Da im Rahmen des Moduls leider nicht mehr Zeit für diese Thematik eingeräumt werden kann, mussten die Inhalte des Theorieseminars und des Praktikums in der anschließenden Überarbeitung des Konzeptes stärker fokussiert und teilweise gekürzt werden, um genügend Zeit für die Auswertung der restlichen Inhalte bereitstellen zu können. Um gleichzeitig dem Wunsch anderer Studierender nach weiteren Inhalten nachzukommen, wurden diese Inhalte aber nicht gestrichen, sondern in die zusätzlich bereitgestellten Materialien aufgenommen. Weiterhin wurde auf das spezifische Feedback zu dem Versuch mit Ferrofluiden eingegangen, indem stärkere Neodym-Magnete verwendet wurden.

Insgesamt wurde somit ein sehr positives Feedback von den Studierenden erhalten. Dieses bezog sich sowohl auf die Thematik im Allgemeinen als auch auf die Experimente und Praxisrelevanz im Besonderen. Am stärksten hervorgehoben wurde die (vorher nicht wahrgenommene) Bedeutung des Themengebietes für die spätere Berufspraxis, oftmals unter Verweis auf die anschaulichen und einfach durchzuführenden Experimente. Besonders erfreulich war in diesem Hinblick der klar geäußerte Wunsch seitens der Studierenden, mehr über dieses Themengebiet erfahren zu wollen.

### **7.3.2 Projekt 9: Konzeption von Lehrerfortbildungen**

#### **7.3.2.1 Beschreibungen und übergreifende Ziele des Projekts**

Dem lebenslangen Lernen wird in fast jedem Beruf eine besondere Bedeutung zugeschrieben – für Lehrkräfte ist die Weiterentwicklung ihrer pädagogischen Professionalität in Sinne eines lebenslangen Lernens nach TERHART allerdings von besonderer Relevanz <sup>[411]</sup>. Da an weiterführenden Schulen in Deutschland gegenwärtig etwa 750.000 Lehrkräfte (ca. 150.000 mit MINT-Fächern)<sup>39</sup> arbeiten, wird die Bedeutung eines entsprechenden Fortbildungsangebotes ersichtlich. Schulen, Lehrkräfte und entsprechend auch das Fortbildungssystem stehen somit vor der Aufgabe, gesellschaftliche und politische Entwicklungen sowie Erkenntnisse der Forschung aufzugreifen und in den Schulen umzusetzen <sup>[414]</sup>.

Insbesondere hierzulande erhalten Fortbildungen in Verbindung mit ihrer Wirksamkeit eine besondere Beachtung, nachdem im Zuge des „PISA-Schocks“ diesbezüglich von der OECD ein signifikantes Defizit attestiert wurde <sup>[415]</sup>. Dass Fortbildungsmaßnahmen grundsätzlich einen positiven Effekt auf Professionalität, Expertise, Qualifikationserhaltung und –erweiterung der Lehrkräfte ausüben, wurde in der Vergangenheit in mehreren Metaanalysen von YOON ET AL. <sup>[416]</sup>, TIMPERLEY ET AL. <sup>[417]</sup>, der HATTIE-Studie <sup>[418]</sup> sowie aktuell durch Projekt EVALUNA (Evaluation der Nachhaltigkeit der Lehrerfortbildung) der PH Freiburg bestätigt <sup>[419, 420]</sup>. Welche konkreten Faktoren allerdings ausschlaggebend für diese Wirksamkeit sind, wird gegenwärtig in

---

<sup>39</sup> Eigene Schätzung basierend auf aktuellen Angaben der KULTUSMINISTERKONFERENZ <sup>[412]</sup> und einer Befragung des VEREINS MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHER EXCELLENCE-CENTER AN SCHULEN E.V. <sup>[413]</sup>.

der Literatur diskutiert <sup>[421]</sup>. Somit stellt sich die Frage: Welche Merkmale weisen wirksame Lehrerfortbildungen auf?

LIPOWSKY und RZEJAK <sup>[421]</sup> nennen als Antwort auf diese Frage (unter Berücksichtigung mehrerer nationaler und internationaler Studien) mehrere Kriterien, die als Indikatoren für wirksame Lehrerfortbildung betrachtet werden können. Nachfolgend sollen diese Kriterien aufgeführt werden – zusätzlich sollen hieraus konkrete Gestaltungsleitlinien für die Konzeption eigener Lehrerfortbildungen abgeleitet und ebenfalls aufgeführt werden.

**Dauer einer Fortbildung:** Bei längeren Fortbildungen können sich die Teilnehmenden über einen längeren Zeitraum mit dem Lerngegenstand beschäftigen; dies kann dazu beitragen, alte Routinen und Handlungsmuster aufzubrechen. Zudem bewerten Teilnehmende längere Fortbildungen tendenziell häufiger als positive Herausforderung und seltener als Überforderung <sup>[422]</sup>.

→ Nach Möglichkeit sollen zum Themengebiet „Nano“ mindestens halbtägige Fortbildungsformate entwickelt werden; ist dies aus organisatorischen Gründen nicht möglich (bspw. durch formale Vorgaben des Rahmenprogramms), soll durch fachliche Fokussierung der beklagten Überforderung entgegengewirkt werden.

**Vertiefung des fachdidaktischen und diagnostischen Lehrerwissens und Fokus auf die Lernprozesse der SuS:** Wirksame Lehrerfortbildungen vertiefen nicht nur das Wissen, sondern vermitteln den Teilnehmenden darüber hinaus auch Einblicke in typische Denkweisen, Interessen und Präkonzepte der SuS. Diese Fokussierung der fachdidaktischen und diagnostischen Aspekte regten einer Studie von CARPENTER ET AL. die Lehrkräfte gezielt dazu an, mögliche Lösungswege und Lernschwierigkeiten der SuS zu antizipieren <sup>[421, 423]</sup>.

→ Insbesondere zu dem Themengebiet „Nano“ besitzen SuS eine Vielzahl an Präkonzepten und Fehlvorstellungen, oftmals auch vermittelt durch die Medien. Die in Kap. 6.1.4 dargelegten Lernerperspektiven (L1 – L3) sowie eigene Erfahrungen bei der unterrichtlichen Vermittlung sollen in die Fortbildungskonzeption einbezogen werden, da sie typische Denkweisen der SuS reflektieren und die Identifizierung sowie Vermeidung von Lernschwierigkeiten ermöglichen.

**Die Wirkung des eigenen Handelns erfahrbar machen:** Nach TIMPERLEY ist es ein wichtiges Merkmal, den Teilnehmenden die Folgen veränderten unterrichtlichen Handelns zu verdeutlichen <sup>[417]</sup>. Dies entspringt unter anderem dem Wunsch vieler Lehrkräfte, aus der Fortbildung etwas Konkretes für den Einsatz in dem eigenen Unterricht mitzunehmen <sup>[424]</sup>.



→ Die in Kap. 6.2.3 dargestellten Perspektiven von Lehrkräften legen nahe, dass Lehrkräfte in vielen Fällen ihr fachliches Wissen als zu gering für eine unterrichtliche Vermittlung des Themengebietes „Nano“ einschätzen; gemeinsam mit der wahrgenommenen Stofffülle des Kerncurriculums wird dies als wichtigste Barriere dargestellt. Aus diesem Grund sollen fachliche Grundlagen fokussiert vermittelt werden, sodass ein solider Ausgangspunkt bzw. „*threshold comfort level*“<sup>[234]</sup> für den eigenen Unterricht erreicht werden kann. Durch Anknüpfung an Vorkenntnisse sowie eigene Erprobungsphasen (siehe nächster Punkt) soll dabei die spezifische Selbstwirksamkeitserwartung für dieses Thema positiv beeinflusst werden.

**Verschränkung von Input-, Erprobungs- und Reflexionsphasen:** Um das Wissen der Lehrkräfte zu erweitern bzw. vertiefen, neue Inhalte anzuwenden und zu reflektieren, ist die Gestaltung und Verknüpfung entsprechender Phasen während Fortbildungen von großer Bedeutung<sup>[425]</sup>.

→ Nicht nur die Vermittlung von fachliche Grundlagen spielt eine wichtige Rolle bei dem Abbau von Barrieren der unterrichtlichen Vermittlung von „Nano“ – hierauf aufbauende (experimentelle) Erprobungsphasen können ebenso essentiell für die Selbstwirksamkeitserwartung sein wie das Fachwissen. Darüber hinaus wurden in Kap. 6.2.3 trotz des hohen Interesses an „Nano“ seitens der Lehrkräfte vielfältige kritische Einwände bezüglich der Thematisierung in der Schule geäußert. Diese sollen in einer Reflexions- und Diskussionsphase aufgegriffen werden.

**Orientierung an Merkmalen lernwirksamen Unterrichts:** Wirksame Fortbildungen fokussieren weniger die Oberflächenmerkmale von Unterricht (wie bspw. methodische Vorgaben, Unterrichtsformen, ...), sondern fokussieren stattdessen Tiefenstrukturen (Verstehensaufbau, Verstehensprozesse, Verständnisschwierigkeiten, ...). Besonders zielführend ist ein enger fachlicher Fokus in Kombination mit einer Erweiterung des relevanten fachdidaktischen Lehrerwissens für den betreffenden Unterrichtsgegenstand<sup>[421]</sup>.

→ Im Rahmen der Fortbildungskonzeption sollen neben den oben erwähnten Lernerperspektiven stärker auf kognitionspsychologische Aspekte eingegangen werden wie bspw. auf die Aktivierung von Vorwissen oder eine fördernde Strukturierung der Inhalte.

Zuletzt soll noch das bereits vorhandene Angebot an Fortbildungen zum Themengebiet „Nano“ illustriert werden; in den letzten Jahren wurden an einigen Standorten entsprechende Veranstaltungen angeboten, insbesondere von WOLDT, BUSCH und WLOTZKA (TU Dortmund)<sup>[426]</sup>,

PÖPPING und MELLE <sup>[427]</sup> (ebd.) sowie von SCHWARZER, HICKMANN und PARCHMANN (IPN Kiel) <sup>[428]</sup>. Darüber hinaus wurden bzw. werden etwa von dem NANOBIO LAB (Universität des Saarlandes) <sup>[429]</sup>, der TUMÜNCHEN (School of Education) <sup>[430]</sup> sowie der Initiative WISSENSCHAFT IN DIE SCHULEN! <sup>[431]</sup> ebenfalls Fortbildungen mit unterschiedlichen Schwerpunkten angeboten. Dabei handelt es sich allerdings in den meisten Fällen um einmalig stattfindende Veranstaltungen. Dazu kommt, dass in einigen Regionen sehr wenige bis gar keine Veranstaltungen zu finden sind – in Niedersachsen beispielsweise existiert in der entsprechenden Veranstaltungsdatenbank des Landes bislang kein Angebot zum Themengebiet „Nano“ <sup>[432]</sup>.

Als Ausgangslage kann folglich festgehalten werden, dass – auch im Hinblick auf die der Ergebnisse der durchgeführten Studie – weitere Angebote für die Lehrerfortbildung sinnvoll erscheinen. Die dort aufgeführten Lehrerperspektiven bzw. –wünsche sowie die identifizierten Barrieren für die unterrichtliche Implementierung wurden der Entwicklung der Fortbildungen zugrunde gelegt. Die übergreifenden Ziele aller Fortbildungskonzepte sind daher:

- Lehrkräften soll eine grundlegende und für eine unterrichtliche Vermittlung ausreichend belastbare Wissensbasis zum Thema „Nano“ vermittelt werden, damit sie sich „innerhalb des jeweiligen Kontexts sicher, aktiv gestaltend und selbstbewusst ‚bewegen‘“ <sup>[433]</sup> können .
- Über die curriculare Anbindung der Unterrichtsgegenstände soll demonstriert werden, dass klassische Inhalte des Chemieunterrichts ohne Zeitverlust anhand des modernen Kontextes „Nano“ unterrichtet und vernetzt werden können – selbst im eA-Kurs.
- Anhand von einfachen (Schüler-)Experimenten soll illustriert werden, dass das Thema „Nano“ mit gängigen Geräten und Chemikalien auch für die Schule vielfältige experimentelle Zugänge und Möglichkeiten bietet.
- Zuletzt sollen Lehrkräften praxiserprobte Unterrichtsmaterialien und -einheiten vor- und zur Verfügung gestellt werden.

Ausgehend von diesen übergeordneten Zielen wurden mehrere Fortbildungen in verschiedenen Formaten entwickelt und durchgeführt. Die Gewinnung von Kooperationspartnern aus Schule, Schülerlabor und Hochschule war dabei von Beginn an ein zentrales Anliegen, um die unterrichtspraktische Anbindung sowie die inhaltliche Breite und Qualität weiter zu steigern. Um darüber hinaus einen möglichst starken und authentischen Praxisbezug herzustellen, wurden auf inhaltlicher Ebene insbesondere schulisch erprobte Unterrichtsmaterialien und –einheiten (siehe Kap. 7.1) fokussiert.

Nachfolgend werden entwickelte und durchgeführte Lehrerfortbildungen aufgeführt sowie ausgewählte Inhalte mit einer kurzen Beschreibung des Konzeptes aufgeführt. Zur Vermeidung von Redundanzen sollen die eben angesprochenen Inhalte aus Kap. 7.1 nicht erneut aufgeführt, sondern stattdessen auf sie verwiesen werden.



werden, die sich durch dieses Themengebiet eröffnen. Tabelle 28 zeigt übersichtsartig die Abschnitte und Inhalte der Fortbildung.

**Tabelle 28 – Überblick über die Lehrerfortbildung zum Thema „Nano – Eine Dimension mit hohem didaktischen Potenzial für den Chemieunterricht“.**

### Nano – Eine Dimension mit hohem didaktischen Potenzial für den Chemieunterricht <sup>[434]</sup>

<i>Inhalte</i>	<i>Kooperationspartner</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Einstieg:</b> ZnO-Nanopartikel – Ein Thema für den Chemieunterricht? Aufzeigen von Anbindungen an Alltag, Wissenschaft und Industrie sowie an klassische Inhalte des Kerncurriculums und Chemieunterrichts.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Unterrichtsbeispiel und Experimente:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Ausgewählte Schlüsselemente aus dem Einführungsseminar (Größen-dimension, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, Kap. 7.1.1.3)</li> <li>b) Experimentierstationen: Synthese und UV-Lichtdetektion von ZnO-Nanopartikeln, Photokatalytische Zersetzung von Methylenblau und Wirkung auf pflanzliche Zellen (Experimente 2.1, 2.3, 2.5, 2.6, Kap. 7.1.2.3).</li> <li>c) Ein WebQuest zu Nanomaterialien als strukturierte Internetrecherche und Grundlage für die Bewertung des Einsatzes von Nanotechnologie.</li> </ul> </li> </ul>	<p>C. MATHES (Otto-Hahn-Gymnasium),</p> <p>A. SDUNEK (Georg-Christoph-Lichtenberg-Gesamtschule), Göttingen</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Abschließende Diskussion:</b> Chancen der Nanochemie für den Unterricht und Barrieren für deren Umsetzung</li> </ul>	

Abschließend erhalten die Lehrkräfte sämtliche Unterrichtsmaterialien sowie weiterführendes, fachliches Informationsmaterial. Die vollständigen Materialien finden sich im Anhang (A3.20).

### Ergebnisse, Feedback und Fazit

Im Rahmen der Fortbildung wurde für eine Evaluation und weitere Optimierung dieses Angebotes Feedback im Rahmen des Eingangsgesprächs, der Abschlussdiskussion sowie innerhalb unstrukturierter Auswertungsgespräche mit den Teilnehmenden erhoben. Das gewählte Format, d.h. die gemeinsame experimentelle Arbeit an Stationen ermöglichte es dabei in besonderem Maße, viele praxisorientierte und konkrete Fragestellungen bezüglich der unterrichtlichen Implementierung zu fokussieren.

Bereits während des Eingangsgesprächs wurde deutlich, dass viele Lehrkräfte ihre themenspezifischen Vorkenntnisse als „höchstens gering“ einschätzen und die Studienergebnisse (siehe Kap. 6.2.3) somit in diesem Punkt zutreffen. Gleichzeitig wurde oftmals ein großes Interesse an dem Themengebiet „Nano“ angemerkt und dass ihnen die Relevanz dieses Forschungsgebietes – auch für die unterrichtliche Vermittlung – durchaus bewusst ist. Letzteres wurde oft als wichtigster Grund für den Besuch dieser Fortbildung. Darüber hinaus äußerten die Lehrkräfte auf

Nachfrage zu diesem Zeitpunkt viele der in Kap. 6.2.3 identifizierten Barrieren für die unterrichtliche Vermittlung des Themas „Nano“. Diese umfassten etwa die mangelnde Ausstattung der eigenen Laborsammlung, der Mangel an verfügbarem Unterrichtsmaterial sowie der wahrgenommene Mangel an Zeit in Verbindung mit der wahrgenommenen fehlenden Anschlussfähigkeit des Themas „Nano“ an das Kerncurriculum.

Wie erwähnt, war es das vorrangige Ziel dieser Veranstaltung, auf diese wahrgenommenen Barrieren der Lehrkräfte einzugehen und diese zu diskutieren. Dieser Austausch fand insbesondere während der experimentellen Arbeit an den Stationen statt, wobei ein Großteil der Teilnehmenden positives Feedback zu den zuvor genannten Barrieren gab. Im Besonderen trugen die praktische Erprobung der Unterrichtseinheit im regulären Chemieunterricht (mit den entsprechenden gesammelten Erfahrungen) und die ausschließliche Verwendung von schuleigener Ausstattung zu einer gesteigerten Authentizität und auch Akzeptanz der vorgestellten Inhalte bei. Zuletzt wurde in der abschließenden Reflexion mit den Teilnehmenden deutlich, dass viele Lehrkräfte „Nano“ als Kontext für klassische Inhalte des Chemieunterrichts erkannten und bereits mit weiteren Inhalten verknüpfen konnte.

Insgesamt kann auf dieser Basis somit ein positives Fazit der Fortbildungsveranstaltung gezogen werden – die Auswertung des Feedbacks und die Eindrücke während der Veranstaltung lassen legen den Schluss nahe, dass die eingangs formulierten Ziele erreicht werden konnten. Zu großen Teilen verantwortlich für diesen Erfolg zeichnen sich sowohl die Praxisorientierung der Fortbildung (bzw. der Workshop-Charakter), die vorangehende unterrichtliche Erprobung des Materials sowie die Bereitschaft, den Bedenken der Lehrkräfte angemessenen Diskussionsraum einzuräumen. Diese Erfahrungen werden entsprechend für die Konzeption der folgenden Fortbildungen übernommen.

### **7.3.2.3 Nanochemie und Katalyse – eine Unterrichtseinheit im eA-Kurs Chemie**

Eine vergleichbare Struktur wurde entsprechend für die Konzeption der Fortbildung „Nanochemie und Katalyse“ verwendet (siehe Tabelle 29). Hierbei wurden Inhalte und Erfahrungen des Unterrichtsprojektes „Nanochemie und Katalyse“ (Projekt 4, Kap. 7.1.4) fokussiert, welche aus den Blickwinkeln der Fachdidaktik und der Unterrichtspraxis vorgestellt wurden.

Da die Unterrichtseinheit für einen Kurs auf erhöhtem Anforderungsniveau (eA-Kurs) konzipiert wurde, fiel innerhalb der Fortbildung ein besonderer Schwerpunkt auf die Anschlussfähigkeit an die Vorgaben und Inhalte des Kerncurriculums. Zudem sollten die neuen Möglichkeiten des Projektes über einen Vergleich mit der „klassischen“ Behandlung des Themengebietes illustriert werden, um einerseits Bezüge zu dem beruflichen Alltag der Teilnehmenden herzustellen und andererseits hieran anknüpfend Diskussionsmöglichkeiten zu eröffnen.

Die Fortbildungsveranstaltung wurde im Rahmen des Fortbildungsprogramms des VERBANDS ZUR FÖRDERUNG DES MINT-UNTERRICHTS (MNU) während des Göttinger MNU-Tages 2015 durchgeführt. Die vollständigen Materialien finden sich im Anhang (A3.21).

Tabelle 29 – Überblick über die Lehrerfortbildung zum Thema „Nanochemie und Katalyse“.

### Nanochemie und Katalyse – eine Unterrichtseinheit im eA-Kurs Chemie <sup>[435]</sup>

<i>Inhalte</i>	<i>Kooperationspartner</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Einstieg:</b> Vergleich: Wie wird das Thema Katalyse klassisch vermittelt und wie kann es am Kontext „Nano“ geschehen? Aufzeigen von Möglichkeiten und Kontexten zur Einbindung in den Unterricht, hier: eA-Kurs.</li> <li>• <b>Unterrichtsbeispiel und Experimente:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ausgewählte Schlüsselemente aus der Einführung (Problemexperiment, Größendimension, Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis, Kap. 7.1.4.3)</li> <li>○ Experimentierstationen: Katalytische Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit Braunstein@Silica, Synthese von ZnO-Nanopartikeln, Modellexperiment zur photokatalytischen Abwasserreinigung und Wirkung von ZnO-Nanopartikeln auf pflanzliche Zellen (Experimente 4.1, 2.1, 2.5, 2.6, Kap. 7.1.2.3 und 7.1.4.3).</li> <li>○ Informationsmaterialien zu Nanomaterialien als strukturierte (Internet-)Recherche und Grundlage für die Bewertung des Einsatzes von Nanotechnologie; Ergebnisse der Podiumsdiskussion.</li> </ul> </li> <li>• <b>Abschließende Diskussion:</b> Chancen der Nanochemie für den Unterricht und Barrieren für deren Umsetzung.</li> </ul>	<p>E. IRMER (Otto-Hahn-Gymnasium, Göttingen)</p>

### Ergebnisse, Feedback und Fazit

Wie in der vorherigen Fortbildung (siehe oben) wurden auch hier zum Zweck der Evaluation und Optimierung Feedback im Rahmen des Eingangsgespräches, der Abschlussdiskussion sowie innerhalb unstrukturierter Auswertungsgespräche mit den Teilnehmenden erhoben. Innerhalb des Eingangsgespräches wurden von den Teilnehmenden im Hinblick auf Vorkenntnisse und Perspektiven vergleichbare Wünsche geäußert. Der gravierendste Unterschied bestand darin, dass der curricularen Anschlussfähigkeit des vorgestellten Unterrichtsmaterials verstärkte Aufmerksamkeit entgegengebracht wurde, was der Durchführung des Projektes in einem eA-Kurs zugeordnet werden kann. Dies äußerte sich etwa durch die Art und Anzahl an Rückfragen, welche schon nach der Vorstellung des „Nano“-Unterrichtsprojektes geäußert wurden. Hierbei wurde zum einen ein hohes Interesse an einer solchen Möglichkeit deutlich, zum anderen aber auch Rückfragen bezüglich der Durchführung geäußert. Letztere betrafen erneut die oben beschriebenen Barrieren (bspw. Sammlungsausstattung, mangelnde Zeit) angeführt wurden.

Diese Rückfragen wurden, wenn möglich, für die Stationenarbeit oder die Abschlussdiskussion zurückgestellt.

Während experimentellen Arbeit wurden viele konkrete Rückfragen bezüglich der Experimente gestellt; kritisch angemerkt wurde zunächst, dass poröse Silica für die Durchführung dieser Unterrichtseinheit eigens beschafft werden müssen. Gleichzeitig wurden jedoch die „beeindruckende“ Effektstärke des Experimentes im Vergleich zur „klassischen“ Durchführung hervorgehoben. Für den gesamten experimentellen Teil ergab sich insgesamt aufgrund der einfachen unterrichtlichen Durchführbarkeit, den geringen Anforderungen an die Ausstattung und der didaktischen Eignung positive Rückmeldungen seitens der Teilnehmenden.

Im Gespräch an den Stationen konnten nun die zurückgestellten Aspekte mit konkretem Bezug zu den Experimenten und damit zusammenhängenden Inhalten der Unterrichtseinheit aufgegriffen werden – in fast allen Fällen konnten auf dieser Basis die zuvor geäußerten Bedenken relativiert werden. Dieser Haltungswandel wurde auch in der Abschlussdiskussion deutlicher gezeigt, zu der nur noch wenige offene Fragestellungen geäußert wurden, etwa zu der Beschaffung der verwendeten mesoporöse Silica-Materialien. Hierbei wurde auf entsprechende Veröffentlichungen verwiesen, welche eine einfache und vor allem kostengünstige Synthese dieser oder vergleichbarer (Zeolith-)Materialien beschreiben <sup>[136, 436]</sup>. Ein weitaus höheres Interesse wurde den unterrichtspraktischen Erfahrungen zu der Durchführung dieser Einheit und der präsentierten Evaluation des Kurses entgegengebracht. Auch in dieser Fortbildung wurden diese beiden Faktoren als sehr förderlich für die Authentizität und auch Akzeptanz der vorgestellten Inhalte wahrgenommen. In der abschließenden Diskussionsrunde wurde die Unterrichtseinheit vielfach als für den Chemieunterricht geeignet, praxis- sowie alltagsnah beschrieben, sodass insgesamt ein positives Fazit für die Unterrichtseinheit und Fortbildungsveranstaltung gezogen werden konnte.

#### **7.3.2.4 Nanotechnologie in der Schule: Innovative Ansätze für den Chemieunterricht**

Wie oben bereits beschrieben, erfährt die unterrichtliche Behandlung des Themas „Nano“ in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit, insbesondere im Zusammenhang mit der verstärkten curricularen Implementierung in einigen Bundesländern (bspw. Nordrhein-Westfalen). Als Konsequenz wurden in den letzten Jahren auch an mehreren Standorten interessante Inhalte für eine schulische Umsetzung entwickelt – mit Göttingen sind hierbei insbesondere das IPN Kiel (S. SCHWARZER, I. PARCHMANN) sowie die Universitäten Hildesheim (J. MENTHE) und Oldenburg (V. PIETZNER) zu erwähnen. Um Ressourcen zu bündeln und Lehrkräften ein besonders breites Angebot zu ermöglichen, wurde demzufolge in Kooperation mit diesen Standorten Fortbildungen entwickelt, die einen Überblick über vielfältige Ansätze zur unterrichtlichen Betrachtung bieten sollen. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Fortbildungsveranstaltungen, welche beide jeweils eine Unterrichtseinheit fokussieren, beschreibt das vorliegende Konzept

ausgewählte Inhalte mehrerer Bildungsangebote im Überblick, sodass für die Konzeption dieser Veranstaltung eine entsprechend andere Struktur gewählt wurde.

Als Einstieg sollen jedoch erneut zunächst etwaige Bedenken, Vorstellungen und wahrgenommene Barrieren der Teilnehmenden aufgegriffen und thematisiert werden, indem die Eignung von Nanotechnologie für die Vermittlung in Schule oder Schülerlabor kritisch hinterfragt wird. Darüber hinaus wird auf allgemeinerer Ebene beleuchtet, welche diesbezüglichen Perspektiven, entsprechenden Interessen sowie Präkonzepte bei SuS zu diesem Themengebiet vorliegen. Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden die zentralen Erkenntnisse aus den entsprechenden Untersuchungen präsentiert (siehe Kap. 6.1). Zuletzt wurde eine kurze Übersicht der vorgestellten Inhalte der verschiedenen Universitäten gegeben.

Auf dieser Basis wurden in dem experimentellen Abschnitt die Angebote der entsprechenden Standorte in verschiedenen Stationen vorgestellt. Die übergreifenden Ziele über die Standorte hinweg waren es, experimentelle Zugänge zu (1) den Eigenschaften von Nanomaterialien, (2) ihrem Einsatz im Alltag, (3) ihrer Herstellung sowie (4) der Nanodimension aufzuzeigen. Die entsprechenden Stationen bzw. Inhalte werden in Tabelle 30 aufgeführt. Abschließend wurden im Plenum offene Fragen, Erkenntnisse, Vorschläge sowie Bedenken diskutiert.

Die Fortbildungsveranstaltung wurde anlässlich der 31. GDCH FORTBILDUNGS- UND VORTRAGSTAGUNG DER FACHGRUPPE CHEMIEUNTERRICHT 2014 in Kiel durchgeführt. Die vom Autor entwickelten Materialien finden sich im Anhang (A3.22).

Tabelle 30 – Überblick über die Lehrerfortbildung zum Thema „Nanotechnologie in der Schule: Innovative Ansätze für den Chemieunterricht“.

### Nanotechnologie in der Schule: Innovative Ansätze für den Chemieunterricht <sup>[437]</sup>

Inhalte	Kooperationspartner
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Einstieg:</b> Nanotechnologie – ein Thema für den Chemieunterricht? Aufzeigen von Anbindungen an Alltag, Wissenschaft und Industrie sowie an klassische Inhalte des Kerncurriculums und Chemieunterrichts. Einblick in Lernerperspektiven sowie Interesse und Prädispositionen.</li> </ul>	T. WAITZ (Universität Göttingen)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Unterrichtsbeispiele und Experimente:</b></li> </ul>	J. MENTHE (ehem. Universität Hamburg)
	L. KAMPSCHULTE, S. SCHWARZER (IPN Kiel)



- 
- Silberfraktale und deren Wachstum auf dem USB-Mikroskop (MENTHE)
  - Zoomen in die Nanodimension als Brücke von der Stoff- zur Teilchenebene (MENTHE)
  - Biozide Wirkung von Nanosilber-Lösungen (MENTHE)
  - Unterrichtseinheit „Alles sauber und frisch dank Nano?!“ – Entscheidungsplanspiel zur Technikfolgenabschätzung am Beispiel der *Nanosilverwash*-Technologie (MENTHE)
  - Seifenblasen als alltagsnaher Zugang zur Nanodimension (Schichtdicke und Interferenz) (SCHWARZER)
  - „Nano“ sichtbar machen: Ein Schüler-AFM (SCHWARZER)
  - Charakterisierung von Nanomaterialien mittels Kontaktwinkelmessung (SCHWARZER)
  - „Nanotechnologie im Alltag“: Eine einführende und vorbereitende Stationsarbeit (KAMPSCHULTE, SCHWARZER)
  - „Nano“ mal anders: Ein Leidenfrost-Tropfen als Miniaturreaktor (SCHWARZER, WILKE, siehe Kap. 7.2.2)
  - Erschließen der Nanodimension über sphärische Silica-Partikel (WILKE, WAITZ, siehe Kap. 7.2.3.2)
  - Experimente mit fluoreszierenden ZnO-Nanopartikeln (WILKE, WAITZ, siehe Kap. 7.1.2.3)
  - Eine Unterrichtseinheit zum Thema nanoskalige TiO<sub>2</sub> Partikel (WILKE, WAITZ, siehe Kap. 7.1.1)
  - **Abschließende Diskussion:** Chancen der Nanochemie für den Unterricht und Barrieren für deren Umsetzung.
- 

## Ergebnisse, Feedback und Fazit

Wie in den bisherigen Fortbildungen äußerten die Teilnehmenden in der Einstiegsdiskussion einerseits Rückfragen bzw. Bedenken hinsichtlich der unterrichtlichen Durchführbarkeit sowie der curricularen Anschlussfähigkeit, andererseits jedoch gleichzeitig ein hohes Interesse an entsprechenden Lösungen zu dieser Problematik. Von den Teilnehmenden als „hilfreich“ bewertet wurden die Erkenntnisse bezüglich der Schülerperspektiven, welche jedoch vorerst diffus blieben. Eine konkrete und zielführende Diskussion, wie den dort vorgestellten Präkonzepten begegnet werden kann, fand erst an den jeweiligen Stationen statt, wo auch entsprechende Rückfragen beantwortet wurden.

Aufgrund der positiven Erfahrungen der vorherigen Fortbildungen wurde erneut der Schwerpunkt auf die experimentelle Arbeit gelegt. Hierbei zeigten sich die deutlichsten Unterschiede

im Vergleich zu den bisherigen Veranstaltungen. In Letzteren bauten etwa die einzelnen Stationen (dem Unterrichtsgang folgend) aufeinander auf, sodass für einen vollständigen Einblick in die Unterrichtseinheit alle Stationen besucht werden mussten. Das breitere Angebot an eigenständigen Stationen und Themen ermöglichte es den Lehrkräften in dieser Veranstaltung, eigene Schwerpunkte zu setzen. Entsprechend wurde beobachtet, dass einige Teilnehmende alle Stationen besuchten, um einen breiten Einblick zu erhalten, und anderer wiederum eine Station vertieft bearbeiteten. In anschließenden Gesprächen mit den Lehrkräften wurde diese Möglichkeit, eigene Interessen zu vertiefen, von den Lehrkräften als sehr positiv und zielführend bewertet, sodass hiervon positive Effekte für einen verstärkten Transfer der entwickelten Inhalte in die unterrichtliche Praxis erhofft wird.

In der Abschlussdiskussion wurde das Ziel verfolgt, eine übergreifende Diskussion zu der Vermittlung von „Nano“ im Chemieunterricht (losgelöst von den Inhalten der einzelnen Stationen) zu führen. Hielten sich Bedenken und Chancen in der Eingangsdiskussion noch die Waage, so überwogen hier klar die Nennung von Chancen und Anknüpfungsmöglichkeiten an den eigenen Unterricht. Erneut besonders hervorgehoben wurden schulerprobte Experimente, welche mit geringen Anforderungen an die schuleigene Sammlung durchgeführt werden können – hieraus kann erneut abgeleitet werden, dass die Fortbildung zumindest einen Beitrag zum Abbau der entsprechenden Barriere geleistet hat. Auch im Hinblick die curricularen Anbindungen ist Ähnliches zu beobachten; in der Diskussion wurden entsprechende Vernetzungen von „Nano“ mit klassischen Themen des Chemieunterrichts von viele Lehrkräften reflektiert und aufgeführt. Insgesamt konnten somit die Ziele der Fortbildungsveranstaltung erreicht werden.

#### **7.3.2.5 Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung**

Diese erfolgreiche Kooperation wurde 2016 aufgrund eines hohen Teilnehmerinteresses erneuert – für die Entwicklung der folgend aufgeführten Fortbildung wurde die aktuelle Thematik des gemeinsamen NANOBINE-Forschungsprojektes<sup>[19]</sup>, die Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE)<sup>40</sup> gewählt. Auf diese Weise ergeben sich zahlreiche Vernetzungsmöglichkeiten für den Chemieunterricht und vielfältige (fächerverbindende) Bezüge zu Alltags- und Umweltkontexten<sup>[445]</sup>; darüber hinaus kann auf diese Weise auf umfangreiche schulpraktische Erfahrungen und erprobte Materialien zurückgegriffen werden, was in vergangenen Fortbildungsveranstaltungen als sehr positiv im Hinblick auf Authentizität bewertet wurde (siehe oben).

Die bewährte Struktur der Veranstaltung wurde aufgrund des positiven Feedbacks beibehalten; auf inhaltlicher Ebene wurden in der Einführung Möglichkeiten aufgezeigt, die „Nano“ für die Lösung großer gesellschaftlich relevanter Problematiken bieten kann (wie etwa die Bereitstellung von Nahrungsmittel und sauberer Energie für über 7 Milliarden Menschen). Darüber hinaus wurden Ideen vorgestellt, wie der Kontext „Nano“ in diesem Zusammenhang mit einer BNE

---

<sup>40</sup> Detailliertere Informationen zu einer BNE finden sich insbesondere bei BORMANN & DE HAAN<sup>[438, 439]</sup>, EILKS & MENTHE<sup>[440–442]</sup> sowie weiteren Quellen<sup>[443, 444]</sup>.

vernetzt werden kann. Tabelle 31 stellt das Konzept sowie die entsprechenden Inhalte dar. Die Fortbildungsveranstaltung wurde anlässlich der 33. GDCh FORTBILDUNGS- UND VORTRAGSTAGUNG DER FACHGRUPPE CHEMIEUNTERRICHT 2016 in Hannover durchgeführt.

**Tabelle 31 – Überblick die geplante Lehrerfortbildung zum Thema „Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung - Experimentelle Zugänge für Schule und Schülerlabor“.**

### **Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung - Experimentelle Zugänge für Schule und Schülerlabor** <sup>[446]</sup>

<i>Inhalte</i>	<i>Kooperationspartner</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Einstieg:</b> Aufzeigen der heutigen sowie zukünftigen Möglichkeiten von „Nano“ für die Lösung gesellschaftlich relevanter Problematiken (Energiebedarf, Umwelt, Klimawandel, ...). Vernetzungsmöglichkeiten von „Nano“ und BNE sowie hieraus resultierende Chancen für den Chemieunterricht. Zudem Einblick in Perspektiven, Interesse und Prädispositionen der Lernenden.</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Unterrichtsbeispiel und Experimente:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Biozide Wirkung von Nanosilber-Lösungen (MENTHE)</li> <li>○ Silberfraktale und deren Wachstum auf dem USB-Mikroskop (MENTHE)</li> <li>○ Unterrichtseinheit „Alles sauber und frisch dank Nano?!“ – Entscheidungsplanspiel zur Technikfolgenabschätzung am Beispiel der Nanosilverwash-Technologie (MENTHE)</li> <li>○ Reinigung ohne Putzmittel: Erzeugung selbstreinigender Oberflächen (SCHWARZER)</li> <li>○ Green Chemistry im Leidenfrost-Reaktor: Umweltfreundliche Synthese von Nanopartikeln (SCHWARZER, PARCHMANN, WILKE, siehe Kap. 7.2.2)</li> <li>○ Unterrichtseinheit „Von der Sonnencreme zur Solarzelle“ verbindet Schule und Hochschule. Isolation und Charakterisierung von Titandioxid-Nanopartikeln mit Anwendungen in der Photokatalyse und Farbstoff-Solarzellen (DEGE, WAITZ, WILKE, siehe Kap. 7.1.3)</li> <li>○ Bisphenol A: Abwasserreinigung mit (fluoreszierenden) Zinkoxid-Nanopartikeln (WILKE, WAITZ, siehe Kap. 7.1.4)</li> <li>○ Toxizität von Zinkoxid-Nanopartikeln gegenüber Mikroorganismen (DEGE, WILKE, WAITZ <sup>[447]</sup>)</li> </ul> </li> </ul>	<p style="text-align: right;">J. DEGE, T. WAITZ (Universität Göttingen)</p> <p style="text-align: right;">J. MENTHE (Universität Hildesheim)</p> <p style="text-align: right;">S. SCHWARZER, I. PARCHMANN (IPN Kiel)</p> <p style="text-align: right;">V. PIETZNER, (Universität Oldenburg)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Abschließende Diskussion:</b> Chancen der Nanochemie für den Unterricht und Barrieren für deren Umsetzung.</li> </ul>	

## Ergebnisse, Feedback und Fazit

Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit ergaben sich im Hinblick auf die Rückmeldungen und die Auswertung in vielerlei Hinsicht vergleichbare Resultate und Rückmeldungen. Auf inhaltlicher Ebene wurde im Unterschied zu der vorherigen Fortbildungsveranstaltung mit der Bildung für Nachhaltige Entwicklung hier ein übergeordnetes Themengebiet gewählt. Diese Wahl eines verbindenden Elementes der angebotenen Inhalte spiegelte sich auch in einer stärkeren Vernetzung der erworbenen Kenntnisse wider; innerhalb der Diskussionen an den einzelnen Stationen sowie auch in der abschließenden Diskussion wurden entsprechend sehr häufig Elemente miteinander verknüpft und ihre gemeinsame unterrichtliche Umsetzung diskutiert. Auch explizit wurde von den Teilnehmenden die Vielfalt an Möglichkeiten zu diesem Themengebiet positiv hervorgehoben, sodass für die Vernetzung von „Nano“ und einer BNE im Allgemeinen und für diese Fortbildung im Besonderen ein positives Fazit gezogen werden kann.

### 7.3.2.6 Abschlussbetrachtung

Im beschriebenen Projekt wurden vier Fortbildungen bzw. Workshops zum Thema „Nano“ beschrieben, welche einen Beitrag zum Transfer der in den vorherigen Projekten beschriebenen Erkenntnissen und Materialien aus der Forschung in die Unterrichtspraxis leisten sollen. Durch die unterschiedlichen Formate und insbesondere durch die Kooperationen konnte den Teilnehmenden dabei ein breiter Fundus an Möglichkeiten präsentiert werden, wie dieses Themengebiet in Schule, Schülerlabor und sogar Hochschule umgesetzt werden kann. Aus diesem Grund sollen auch in Zukunft weitere Fortbildungen in diesem Themengebiet durchgeführt werden.

Perspektivisch interessant ist die Entwicklung eines Konzeptes für schulinterne Lehrerfortbildungen („SCHILF“). Da (unter anderem) der entsprechende Aufwand für die Teilnahme deutlich gesenkt werden kann, können auf diese Weise deutlich mehr Lehrkräfte direkt an den Schulen erreicht werden. Als Leiterinnen bzw. Leiter könnten dabei Lehrkräfte fungieren, welche sich entsprechende Grundlagen über entsprechend gestaltete und beigefügte Materialien angeeignet haben. Viel sinnvoller wäre es aber, hierzu Lehrkräfte aus den durchgeführten Fortbildungen zu gewinnen, welche somit als Multiplikatoren ihre von Experten erlernte Kenntnisse in die Kollegien weitertragen können.

Wird die eingangs dargelegte Situation der Fortbildungslage erneut betrachtet, stellen diese Impulse wohl einen Schritt in die richtige Richtung dar – insgesamt wird aber nur umso deutlicher, wie viel auf diesem Feld noch zu tun verbleibt.

## 7.4 Fazit

In dem Hauptteil dieser Arbeit wurden mit einer Integration der bisherigen Erkenntnisse begonnen; aus Konzepten und Lernerperspektiven wurden Leitlinien für die didaktische Strukturierung abgeleitet, welche eine Grundlage für die didaktische Strukturierung und somit letztendlich die Gestaltung von Unterrichtsmaterialien darstellt.

Basierend auf dieser Grundlage wurden

... vier Projekte für Schulen entwickelt. Diese umfassen sowohl Unterrichtseinheiten für freiere Settings (wie etwa Projektwochen oder WPU-Kursen) als auch für den regulären Oberstufenunterricht in gA und eA-Kursen. Thematisch werden dabei aufgrund der leichten Verfügbarkeit, der starken Alltagsanbindung sowie der besonderen Lerngelegenheiten in fachübergreifenden Kontexten die halbleitenden Metalloxid-Nanopartikel Titandioxid und Zinkoxid in ihrer Funktion erschlossen und mit entsprechenden Bulk-Materialien verglichen.

... drei Projekte für Schülerlabore entwickelt. Schülerlabore bieten besondere Gestaltungsfreiheiten hinsichtlich der Inhalte und Ausstattungen sowie anders gelagerte Zielsetzungen. Aus diesem Grund wurde bei der Entwicklung eines Ganz- bzw. Halbtageskurses verstärkt ein breiter thematischer Ein- und Überblick zu „Nano“ fokussiert, der sich diese Freiheiten so weit wie möglich zunutze macht. In einem weiteren Kursangebot wurde mit der Green-Chemistry-Synthese von Zinkoxid- und Gold-Nanomaterialien das didaktische Potenzial des Leidenfrost-Reaktors zur Synthese von Nanopartikeln beschrieben. Zuletzt wurde ein mehrtägiger Kurs über poröse Materialien entwickelt – dieser fokussiert mit nanostrukturierten Materialien eine Materialklasse, welche ebenfalls bedeutende alltägliche und technische Anwendungen besitzt. Insbesondere über die modernen Funktionsmaterialien der porösen Silica und Silikone kann gezeigt werden, welche beeindruckenden Funktionserweiterungen durch Porosität erhalten werden können.

... zwei Projekte für die Lehrerbildung entwickelt. Einerseits wurde für die universitäre Ausbildung von Studierenden im Profil Lehramt ein Tageskurs mit Laborpraktikum entwickelt, welche eine erste Annäherung an dieses Themenfeld bieten und Barrieren durch einfache und illustrative Experimente abbauen sollen. Andererseits wurden vier Fortbildungen mit unterschiedlichen Kooperationspartnern und unterschiedlichen Zielsetzungen entwickelt mit der Zielsetzung, praxiserprobte und evaluierte Unterrichtsmaterialien weiter zu disseminieren und so einen Transfer von der fachdidaktischen Forschung in die unterrichtliche Praxis zu fördern.

Diese Projekte unterscheiden sich somit grundlegend hinsichtlich Ausrichtung, Umfang, Zielsetzung und Format. Verbunden werden sie durch die gemeinsame Zielsetzung, „Nano“ immer stärker in Lehre und Lehramtsausbildung zu verankern.

## 8 Abschlussbetrachtung und Ausblick

In der heutigen Zeit wie auch in der Zukunft steht die Menschheit vor dem Hintergrund einer rapide steigenden Weltbevölkerung vor vielfältigen gesellschaftlichen Herausforderungen. Die Nanowissenschaften bzw. -technologie stellen ein Forschungsfeld dar, dem ein signifikanter Beitrag zur Bewältigung dieser Problemstellungen zugeschrieben wird (Kap. 1). Eine multiperspektivische Betrachtung aus den Blickwinkeln Schule, Wirt- und Wissenschaft sowie Gesellschaft stellen ein großes Potenzial für eine schulische Betrachtung dieser Thematik und somit den Bedarf nach einer Nanoscience Education heraus.

Als Status Quo einer Nanoscience Education wurde ermittelt, dass „Nano“ in der non-formalen Bildung bereits eine Rolle spielt; außerschulische Lernorte sind in der Lage, neue Themengebiete wie „Nano“ schnell aufzugreifen und zu reflektieren. Folglich existieren seit einiger Zeit Bildungsangebote, insbesondere in Schülerlaboren oder als Materialkoffer. Ein Transfer dieser Erkenntnisse in formale Bildungseinrichtungen hat bislang allerdings noch nicht großflächig stattgefunden – eigene Untersuchungen von Schulbüchern, Kerncurricula sowie Modulbeschreibungen der lehrerbildenden Universitäten heben hervor, dass „Nano“ in der schulischen Bildung wie auch in der Lehrerbildung bislang noch kaum Einzug gehalten hat (Kap. 3).

Anknüpfend an diesen ermittelten Bedarf soll in dieser Arbeit ein Beitrag zur fachdidaktischen Konzeptualisierung des Themengebietes „Nano“ für den Chemieunterricht, Schülerlabore, Hochschulen und die Lehrer(fort)bildung geleistet werden. Als theoretischer Rahmen wurde hierbei das Modell der Didaktischen Rekonstruktion gewählt, welches in die *Klärung der Sachstruktur*, das *Erfassen von Lernerperspektiven* sowie die *Didaktische Strukturierung* gegliedert ist (Kap. 4).

In der *Fachlichen Klärung* wurden gesicherte fachwissenschaftliche Inhalte hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Vermittlung des Themengebietes „Nano“ untersucht. Aus der fachwissenschaftlichen Struktur wurden die zentralen Inhalte und eine entsprechende Struktur identifiziert, welche für ein grundlegendes Verständnis von „Nano“ benötigt werden – diese umfassen (1) vier Konzepte zu den inhaltlichen Grundlagen, (2) zwei Konzepte betreffend die Herstellung, Eigenschaften, Stabilisierung und Charakterisierungsmethoden sowie (3) zwei Konzepte zu den Anwendungen und der Bewertung des Einsatzes im Hinblick auf Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt (Kap. 5).

Gleichzeitig zu den fachlichen Konzepten wurden in einer empirischen Studie die *Lernerperspektiven erfasst*; insbesondere für die Vermittlung eines fachlich anspruchsvollen Themengebietes, welches sich zudem in nahezu unvorstellbar kleinen Größendimensionen bewegt, ist dies von großer Bedeutung. Die Studie fokussierte insbesondere das Vorwissen und Präkonzepte zu diesem Themengebiet, umfasste aber auch affektive Komponenten. Neben einem hohen Interesse der SuS an einer unterrichtlichen Umsetzung der Thematik wurden aus den Resultaten

drei Lernerperspektiven abgeleitet, welche an die Prädispositionen der Lernenden anknüpfen und Schwierigkeiten bei der Vermittlung vermeiden sollen (Kap. 6).

Neben den Perspektiven der Lernenden wurden auch die Perspektiven der Lehrenden untersucht, da letztere für eine erfolgreiche unterrichtliche Implementierung eine entscheidende Rolle einnehmen („make it or break it“). In einer zweiten durchgeführten Studie konnten diverse hierzu intrinsische und extrinsische Barrieren ermittelt werden, welche in die folgende Entwicklung von Unterrichtsmaterialien und Lehrerfortbildungen ebenso einbezogen wurden, wie die geäußerten Interessen und Wünsche bezüglich der Vermittlung (Kap. 6).

Aufbauend auf den bisherigen Betrachtungen wurden die ermittelten fachlichen Konzepte sowie die Perspektiven der Lernenden und Lehrenden im Rahmen der *didaktischen Strukturierung* miteinander für die Konstruktion von Unterrichtsmaterialien verknüpft. Hieraus wurden neun Leitlinien ermittelt, welche die zentrale Grundlage für das weitere Vorgehen darstellten (Kap. 7).

Aufbauend auf dieser didaktischen Grundlage gehen als wichtigster Ertrag dieser Arbeit diverse Angebote für die Vermittlung von „Nano“ hervor. Unter der Zielstellung, hierbei möglichst viele Akteure im Bildungswesen einzubeziehen, wurden hierbei neben Schulen auch Schülerlabore, die universitäre Lehramtsausbildung sowie die Entwicklung von Lehrerfortbildungen fokussiert. Diese Angebote umfassen gleichermaßen Konzepte wie Unterrichtsmaterialien und –einheiten zu unterschiedlichen Nanomaterialien sowie Themengebieten. Eine Erprobung erfolgte in Kooperation mit erfahrenen Lehrkräften an den Partnerschulen der Universität Göttingen und dem XLAB-Schülerlabor in Göttingen; die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden im Rahmen des zyklischen Designs für eine kontinuierliche Optimierung der Angebote genutzt. Zuletzt stellte über den gesamten Zeitraum der Transfer dieser unterrichtspraktisch erprobten Erkenntnisse in Phase I und II der Lehrerbildung einen integralen Bestandteil dieser Arbeit dar.

Über diesen Beitrag zur fachdidaktischen Konzeptualisierung des Themas „Nano“ hinaus verbleiben noch viele offene Fragestellungen und Forschungsmöglichkeiten. So eröffnet die vorgestellte qualitative Erhebung zu Lernerperspektiven zum Thema „Nano“ erste explorative Einblicke in Präkonzepte, Vorwissen und Interesse – die logische Fortführung ist eine Untersuchung dieser Ergebnisse mittels quantitativer Methoden. Gleiches gilt auch für die Evaluation der vorgestellten Projekte – entsprechende Lernstandserhebungen mit größeren Stichproben können weitere Erkenntnisse und Möglichkeiten der Optimierung bieten.

Auf der inhaltlichen Ebene wurde in dieser Arbeit nur ein sehr kleiner, ausgewählter Ausschnitt des großen Themenfeldes der Nanowissenschaften fachdidaktisch betrachtet. Für weitere anschließende Arbeiten verbleiben zahlreiche weitere Kontexte und auch Nanomaterialien. Mög-

liche Beispiele hierfür sind etwa die besonderen Eigenschaften von Carbon Nanotubes (Ultralichtbauten, Fahr- und Flugzeuge) oder Graphen (ultradünne leitfähige Schichten, Nobelpreis 2010), aber auch weitere Stoffklassen wie Aerogele (Isolatoren, Stoffspeicher) oder Themen wie Functional Food (drug delivery, Haltbarkeit) bieten spannende experimentelle Zugänge und Vernetzungsmöglichkeiten mit klassischen Inhalten des Chemieunterrichts. Insbesondere für Schülerlabore bieten auch Experimente mit Münzmetallen (Kupfer- und Silber-Nanopartikel) weitere Chancen, über ihre antimikrobiellen Eigenschaften umweltrelevante Fragestellungen und Toxizitäten für weitere Mikroorganismen qualitativ und quantitativ zu untersuchen. Entsprechende Synthesen können mit einfachen Reduktionsmitteln (Glucose) in einer Mikrowelle durchgeführt werden.

Von ebenso großer Bedeutung wie die Entwicklung von weiteren Inhalten und Materialien ist der Transfer in die unterrichtliche Praxis. Entsprechende Strukturen für eine systematische Dissemination der entwickelten Inhalte in die Schule oder allgemeine Konzepte für die Implementierung in die grundständige Lehramtsausbildung befinden sich gegenwärtig erst im Aufbau. Auch sind die bislang angebotenen Fortbildungen auf zu wenige Standorte konzentriert.

Ein Lösungsvorschlag kann hier die Gewinnung weiterer Kooperationspartner aus Schule, Studienseminar und Hochschule sein, kombiniert mit der entsprechenden Entwicklung und Bereitstellung von (kostenlosen) Kursmaterialien. Aus diesem Grund werden weitere Kooperationen angestrebt, etwa mit dem NETZWERK LEHRERFORTBILDUNGEN der Universität Göttingen, dem OLDENBURGER FORTBILDUNGSZENTRUM, dem IPN Kiel und dem CHEMIELEHRERFORTBILDUNGSZENTRUM der Universität Braunschweig.

Die Zielsetzung dieser Arbeit bestand in der fachdidaktischen Konzeptualisierung von „Nano“ für den Chemieunterricht. Ob diese Arbeit einen Beitrag dazu leisten wird – und sei dieser noch so klein –, dass das Themenfeld der Nanowissenschaften und Nanotechnologie an Bedeutung gewinnen oder sogar nachhaltig in den Chemieunterricht implementiert werden kann, bleibt offen. Unbestreitbar ist allerdings, dass „Nano“ für SuS und Lehrkräfte mit seinen innovativen Anwendungen attraktive Einblicke und Lerngelegenheiten mit vielfältigen experimentellen Zugängen in ein modernes und spannendes Themengebiet der Chemie ermöglicht.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] R. Nonninger, J. Dege, T. Wilke, T. Waitz, in *Global Perspectives of Nanoscience and Engineering Education* (Eds: K. Winkelmann, B. Bhushan), Springer International Publishing. Cham **2016**.
- [2] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables.: Working Paper No. ESA/P/WP.241.*, New York **2015**.
- [3] S. Y. Stevens, Sutherland L. M., J. S. Krajcik, *The Big Ideas of Nanoscale Science and Engineering: A Guidebook for Secondary Teachers*, National Science Teachers Association, Arlington, Virginia **2009**.
- [4] H. Paschen et al., *Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2004**.
- [5] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, *Risk assessment of Products of Nanotechnologies: modified Opinion (after public consultation) on the appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies.* **2006**.
- [6] K. Bowles, in *Nanoscale Science and Engineering Education* (Eds: A. E. Sweeney, S. Seal). Florida, USA **2008**.
- [7] R. M. Yawson, *Journal of Vocational Education and Training* **2010**, 62 (3), 285.
- [8] M. G. Jones, R. Blonder, G. E. Gardner, V. Albe, M. Falvo, J. Chevrier, *International Journal of Science Education* **2013**, 35 (9), 1490.
- [9] G. de Haan, *Impulse zur Umsetzung des Weltaktionsprogramms Bildung für nachhaltige Entwicklung in Thüringen*, 1st ed., Arnstadt **2015**.
- [10] J. Baumert et al., *Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht im internationalen Vergleich: Deskriptive Befunde.*, Leske + Budrich, Opladen **1997**.
- [11] A. Laherto, *NorDiNa - Nordic Studies in Science Education* **2011**, 7 (2), 126.
- [12] J. Osborne, J. Dillon, *Science Education in Europe: Critical Reflections: A Report to the Nuffield Foundation*, London, <http://www.fisica.unina.it/traces/attachments/article/149/Nuffield-Foundation-Osborne-Dillon-Science-Education-in-Europe.pdf> **2008**.
- [13] T. R. Tretter, in *Nanoscale Science and Engineering Education* (Eds: A. E. Sweeney, S. Seal). Florida, USA **2008**.
- [14] G. Latzel, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2002**, 4 (51), 12.

- [15] F. Rutherford, A. Ahlgren, *Science for all Americans: AAAS Project 2061*, Oxford, USA, <http://www.project2061.org/publications/sfaa/online/sfaatoc.htm> **1991**.
- [16] Niedersächsisches Kultusministerium, *Kerncurriculum Naturwissenschaften für das Gymnasium Schuljahrgänge 5 -10 des Landes Niedersachsens*, Hannover, [http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc\\_gym\\_nws\\_07\\_nib.pdf](http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc_gym_nws_07_nib.pdf) **2007**.
- [17] P. D. Hurd, *Educational Leadership* **1991**, 49 (2), 33.
- [18] S. Stevens, L. Sutherland, J. S. Krajcik, *The big ideas of nanoscale science & engineering: A guidebook for secondary teachers*, NSTA Press, Arlington, VA **2009**.
- [19] J. Menthe et al., *Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung (NanoBinE)*, <https://www.uni-goettingen.de/de/nanotechnologie-im-kontext-einer-bildung-fuumlr-nachhaltige-entwicklung-nanobine/529168.html> **2016**.
- [20] K. Deppert, R. Kullberg, L. Samuelson, in *Nanoscale Science and Engineering Education* (Eds: A. E. Sweeney, S. Seal). Florida, USA **2008**.
- [21] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Ausgaben des Bundes für Wissenschaft, Forschung und Entwicklung nach Förderbereichen und Förderschwerpunkten: Tabelle 1.1.5 BuFI 5. Datenlizenz Deutschland – Namensnennung – Version 2.0* **2015**.
- [22] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *nano.DE-Report 2011: Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland*, Bonn, [http://www.bmbf.de/pub/nanoDE-Report\\_2011.pdf](http://www.bmbf.de/pub/nanoDE-Report_2011.pdf) **2011**.
- [23] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *nano.DE-Report 2013: Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland*, Bonn, [https://www.bmbf.de/pub/nano.DE-Report\\_2013\\_bf.pdf](https://www.bmbf.de/pub/nano.DE-Report_2013_bf.pdf) **2013**.
- [24] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Nano-Initiative - Aktionsplan 2010: Hightech-Strategie - Ideen zünden!*, BMBF Referat "Schlüsseltechnologien Strategie und Grundsatzfragen", Bonn, Berlin **2006**.
- [25] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Aktionsplan Nanotechnologie 2015: Hightech-Strategie - Ideen zünden!*, BMBF Referat "Schlüsseltechnologien Strategie und Grundsatzfragen", Bonn, Berlin **2011**.
- [26] *nano.DE-Report 2009: Hightech-Strategie - Ideen zünden!* (Eds: Bundesministerium für Bildung und Forschung) **2009**.
- [27] P. B. Della Parolo, R. K. Pan, R. Ghosh, B. A. Huberman, K. Kaski, S. Fortunato, *Journal of Informetrics* **2015**, 9 (4), 734.
- [28] *nano.DE-Report 2011: Hightech-Strategie - Ideen zünden!* (Eds: Bundesministerium für Bildung und Forschung) **2011**.

- [29] R. Compañó, A. Hullmann, *Nanotechnology* **2002** (13), 243.
- [30] C. Palmberg, H. Dernis, C. Miguet, *Nanotechnology: An overview based on indicators and statistics*, STI working papers, 2009/7, OECD Dir. for Science Techn. and Industry, Paris **2009**.
- [31] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Vom Material zur Innovation: Rahmenprogramm zur Förderung der Materialforschung*, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn **2015**.
- [32] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *Nano-Map: Kompetenzatlas Nanotechnologie in Deutschland*, [http://www.nano-map.de/#hide\\_2](http://www.nano-map.de/#hide_2) **2016**.
- [33] J. Bradley, *The Recession's Impact on Nanotechnology*, Lux Research **2010**.
- [34] NanoBioNet & cc-NanoChem, *Regionales Branchenbarometer 2010* **2010**.
- [35] M. C. Roco, *Nat Biotechnol* **2003**, 21 (10), 1247.
- [36] M. Roco, C. Mirkin, M. Hersam, *Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020: Retrospective and Outlook*, Bosten, Berlin **2011**.
- [37] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *nano.DE-Report 2011: Hightech-Strategie - Ideen zünden!*, [http://www.bmbf.de/pub/nanoDE-Report\\_2011.pdf](http://www.bmbf.de/pub/nanoDE-Report_2011.pdf) **2011**.
- [38] *Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien: Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung* (Eds: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit), Wiss. Verl.-Ges, Stuttgart **2012**.
- [39] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, *Risk assessment of Products of Nanotechnologies* **2009**.
- [40] J. Filser, *NanoCompetence in der Gesellschaft: Forschung - Vermittlung - Gestaltung*, Bremen **2013**.
- [41] A. Grobe, *Nanotechnologien: Was Verbraucher wissen wollen*, Verbraucherzentrale Bundesverband e.V, Berlin **2008**.
- [42] A. Grobe, *Nanotechnologien aus der Sicht von Konsumenten: Was Verbraucher wissen und was sie wissen wollen*, Stiftung Risiko-Dialog, St. Gallen **2012**.
- [43] G. Gaskell, *Europeans and biotechnology in 2010: Winds of change? a report to the European Commission's Directorate-General for Research*, EUR, 24537 EN, European Commission, Brussels **2010**.
- [44] Niedersächsisches Kultusministerium, *Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg: Chemie*, Hannover **2009**.

- [45] Bundesministerium für Bildung und Forschung, *nanoTruck: Background Information*, Berlin, [http://www.nanotruck.de/fileadmin/user\\_upload/Pressemitteilungen/Hintergrundinformationen/nanoTruck\\_portrait.pdf](http://www.nanotruck.de/fileadmin/user_upload/Pressemitteilungen/Hintergrundinformationen/nanoTruck_portrait.pdf) **2011**.
- [46] nanoTruck, *Initiative nanoTruck*, <https://www.nanotruck.de/initiative-nanotruck.html>.
- [47] Initiative junge Forscherinnen und Forscher e.V., *Nanotechnologie*, <http://www.initiative-junge-forscher.de/mint-angebote/schulbesuche/nanotechnologie.html> **2015**.
- [48] Cluster Nanotechnologie, *Nanoinitiative Bayern*, <http://www.nanoinitiative-bayern.de/> **2009**.
- [49] K. Dunkhorst, *Winzige Welten*, <https://www.uni-due.de/nano-schuelerlabor/tageskurse> **2015**.
- [50] Kieler Forschungswerkstatt, *klick!:labor*, <http://www.forschungs-werkstatt.de/labor/klicklabor/> **2016**.
- [51] J. Menthe, *NanoBiNE - Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung: Broschüre*, Hildesheim **2016**.
- [52] H. Luxenburger-Becker, *NanoBioLab*, <http://nanobiolab.de/> **2016**.
- [53] U. Hartmann, *Centrum für Nanoanalytik - Schülerpraktikum*, <http://cfn.physik.uni-saarland.de/schuelerpraktikum.php> **2016**.
- [54] R. Bernhardt, *Das Mach-Mit Labor*, <http://bernhardt.biochem.uni-sb.de/mach-mit/mml.html> **2016**.
- [55] A. Schütze, *SinnTec Schülerlabor*, <http://www.sinntec.uni-saarland.de/> **2016**.
- [56] T. Weil, *EMU-Lab: Emulsionen und Makromoleküle Ulm*, <https://www.uni-ulm.de/nawi/institut-fuer-organische-chemie-iii/schuelerlabor-emu-lab.html> **2016**.
- [57] Fonds der Chemischen Industrie, *Schulpartnerschaft Chemie*, 2015th ed., Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e.V, Frankfurt am Main **2015**.
- [58] Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI), *Chemie Report* **2014**, 6 (8), 8.
- [59] Advanced Materials Science rano GmbH, *NanoSchoolBox*, <http://www.nanoschoolbox.de/en/nutzungsbedingungen/nanoschoolbox.html>.
- [60] Fonds der Chemischen Industrie, *Unterrichtsmaterial Nanotechnologie*, 4th ed., Frankfurt am Main **2015**.
- [61] C. Benzing, A. Vielfort, *NanoBox: Wunderwelt der Nanomaterialien*, Nürnberg **2009**.
- [62] R. W. Bybee, in *Freechoice education: How we learn science outside of school* (Eds: J. H. Falk), TCP. New York **2001**.

- [63] J. H. Falk, M. Storksdieck, L. D. Dierking, *Public Understanding of Science* **2007**, 16 (4), 455.
- [64] VDI Technologiezentrum GmbH, *TechPortal - Nanotechnologie - Bildungslandschaft Nanostudiengänge*; [http://www.techportal.de/de/1171/2/training\\_public\\_training\\_public\\_nanost/2/](http://www.techportal.de/de/1171/2/training_public_training_public_nanost/2/).
- [65] VDI - Technologiezentrum, *Nano-Bildungslandschaften*, <http://www.nano-bildungslandschaften.de/> **2008**.
- [66] I. Baraton, R. Monk, R. Tomellini, in *Nanoscale Science and Engineering Education* (Eds: A. E. Sweeney, S. Seal). Florida, USA **2008**.
- [67] E. Cebulla, N. Malanowski, A. Zweck, *Innovationsbegleitung Nanotechnologie: Hochschulangebote im Bereich Nanotechnologie*, Düsseldorf, <http://www.techportal.de/docs/training/hochschulangebote.pdf> **2006**.
- [68] A.-M. Bach, Internationale Ansätze zur Implementierung des Bildungsbereiches "Nano" in Schule und Hochschule, *Masterarbeit*, Georg-August-Universität Göttingen **2013**.
- [69] *Bildungsplan 2016: Gemeinschaftskunde ; Allgemein bildende Schulen; Gymnasium (G8)*, 3rd ed. (Eds: Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg), Stuttgart **2014**.
- [70] *Rahmenlehrplan für die Sekundarstufe I - Deutsch: Jahrgangsstufe 7 - 10 ; Hauptschule, Realschule, Gesamtschule, Gymnasium*, 1st ed. (Eds: Berliner Landesinstitut für Schule und Medien), Oktoberdr, Berlin **2006**.
- [71] Senator für Bildung und Wissenschaft, *Naturwissenschaften Biologie - Chemie - Physik: Bildungsplan für das Gymnasium, Jahrgangsstufe 5 - 10*, Bremen **2006**.
- [72] Senator für Bildung und Wissenschaft, *Naturwissenschaften Biologie - Chemie - Physik: Bildungsplan für die Sekundarschule, Jahrgangsstufe 5 - 10*, Bremen **2006**.
- [73] Senatorin für Bildung und Wissenschaft, *Naturwissenschaften Biologie - Chemie - Physik: Bildungsplan für die Oberschule*, Bremen **2010**.
- [74] *Bildungsplan Stadtteilschule Chemie, Jahrgangsstufen 7-11* (Eds: Freie und Hansestadt Hamburg), Behörde für Schule und Berufsbildung, Hamburg **2014**.
- [75] *Kernlehrplan für die Realschule in Nordrhein-Westfalen - Chemie* (Eds: Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen), Ritterbach, Frechen **2011**.

- [76] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, *Kernlehrplan für die Gesamtschule - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen - Naturwissenschaften, Biologie, Chemie, Physik*, Ritterbach, Frechen **2011**.
- [77] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen: Chemie*, Düsseldorf, [http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp\\_SII/ch/KLP\\_GOSt\\_Chemie.pdf](http://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SII/ch/KLP_GOSt_Chemie.pdf) **2014**.
- [78] *Lehrpläne für die Naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz: Klassenstufen 7 bis 9/10* (Eds: Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur), Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur, Mainz **2014**.
- [79] *Fachlehrplan Sekundarschule Chemie* (Eds: Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt), Kultusministerium des Landes Sachsen-Anhalt, Magdeburg **2012**.
- [80] *Fachanforderungen Chemie: allgemein bildende Schulen Sekundarstufe I Gymnasien, Sekundarstufe II* (Eds: Ministerium für Schule und Berufsbildung Schleswig-Holstein), Ministerium für Schule und Berufsbildung Schleswig-Holstein, Kiel **2016**.
- [81] T. Wilke, "Weil... Nano ist besser?!": Entwicklung von Experimenten zum Thema Nanotechnologie für den Chemieunterricht, *Masterarbeit*, Georg-August-Universität Göttingen **2012**.
- [82] W. Klafki, in *Auswahl, Didaktische Analyse* (Eds: H. Roth, A. Blumental), Schroedel, Hannover **1969**.
- [83] P. Heimann, G. Otto, W. Schulz, *Unterricht: Analyse und Planung*, 4th ed., Auswahl Reihe B, 1/2, Schroedel, Hannover **1969**.
- [84] G. Posner, K. Strike, P. Hewson, W. Gertzog, *European Journal of Science Education* **1982**, 4 (3), 231.
- [85] K. Strike, G. Posner, in *Philosophy of science, cognitive psychology and educational theory and practice* (Eds: R. A. Duschl, R. J. Hamilton), State University of New York, New York **1992**.
- [86] H. Gropengießer, *Didaktische Rekonstruktion des "Sehens": Wissenschaftliche Theorien und die Sicht der Schüler in der Perspektive der Vermittlung*, Carl-von-Ossietzky- Univ. Oldenburg Zentrum für Pädag. Berufspraxis, Oldenburg **1997**.
- [87] U. Kattmann, R. Duit, H. Gropengießer, M. Komorek, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* **1997**, 3 (3), 3.
- [88] R. Duit, *Plus Lucis* 2 **1995**, 11.

- [89] D. Treagust, R. Duit, M. Nieswandt, *Educación Química* **2000**, 11 (2), 228.
- [90] A. Beerenwinkel, I. Parchmann, C. Gräsel, *Chemkon* **2007**, 14 (1), 7.
- [91] H.-D. Barke, *Chemiedidaktik: Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg **2006**.
- [92] S. Reinfried, C. Mathis, U. Kattmann, *Beiträge zur Lehrerbildung* **2009**, 27 (3), 404.
- [93] U. Kattmann, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* **2005**, 11 (165-174).
- [94] R. Duit, H. Gropengießer, U. Kattmann, M. Komorek, I. Parchmann, in *Science education research and practice in Europe retrospective and prospective*, Sense Publ. Rotterdam [u.a.] **2012**.
- [95] A. V. Kelly, *The curriculum: Theory and practice*, 5th ed., Paul Chapman Pub; Sage, London, Thousand Oaks, Calif **2004**.
- [96] R. D. Anderson, J. V. Helms, *Journal of Research in Science Teaching* **2001**, 38 (1), 3.
- [97] U. Kattmann, H. Gropengießer, *Schulnahe fachdidaktische Lehr-/Lernforschung: Das Modell der didaktischen Rekonstruktion*, Lehren fürs Leben, Vol. 364, Carl-von-Ossietzky-Univ., Zentrum für Pädagogische Berufspraxis, Oldenburg **1998**.
- [98] *Empfehlung der Kommission vom 18. Oktober 2011 zur Definition von Nanomaterialien Text von Bedeutung für den EWR: L 275/38* **2011**.
- [99] K. Wegner, S. E. Pratsinis, in *Chemische Technik: Prozesse und Produkte* (Eds: K. Winnacker, L. Küchler), Wiley-VCH, Weinheim **2004-2006**.
- [100] E. L. Wolf, *Nanophysik und Nanotechnologie: Eine Einführung in Moderne Konzepte der Nanowissenschaft*, 1st ed., Verdammt clever!, Wiley-VCH, s.l. **2015**.
- [101] G. Beck, *Nano- und Materialkompass* **2011** (2), 11.
- [102] A. Huczko, *Applied Physics A: Materials Science & Processing* **2000**, 70 (4), 365.
- [103] Y. Zhang, W. Chu, A. Foroushani, H. Wang, D. Li, J. Liu, C. Barrow, X. Wang, W. Yang, *Materials* **2014**, 7 (7), 5169.
- [104] F. Chang, J. Zhou, P. Chen, Y. Chen, H. Jia, S. M. I. Saad, Y. Gao, X. Cao, T. Zheng, *Asia-Pac. J. Chem. Eng.* **2013**, 8 (4), 618.
- [105] E. Serrano, G. Rus, J. García-Martínez, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2009**, 13 (9), 2373.
- [106] A. Rössler, G. Skillas, S. E. Pratsinis, *Chemie in unserer Zeit* **2001**, 35 (1), 32.
- [107] L. Puppe, *Chem. Unserer Zeit* **1986**, 20 (4), 117.
- [108] C. Steinbach, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, 64 (4), 9.

- [109] D. Bertram, H. Weller, *Physik Journal* **2002**, 1 (2), 47.
- [110] D. von Kerssenbrock-Krosigk, I. Horn, *Rubinglas des ausgehenden 17. und des 18. Jahrhunderts*, von Zabern, Mainz am Rhein **2001**.
- [111] M. Faraday, *The Bakerian lecture: Experimental relations of gold (and other metals) to light*, [Royal Society of London], [London] **1857**.
- [112] A. Müller, *Die Theorie der Kolloide: Übersicht über die Forschungen, betreffend die Natur des Kolloidalzustandes*, F. Deuticke **1903**.
- [113] G. Mie, *Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen*, [S.l.] **1908**.
- [114] E. Schrödinger, *Science and humanism: Physics in our time*, Cambridge university press, Cambridge **1952**.
- [115] W. Ostwald, *Die Welt der vernachlässigten Dimensionen: Eine Einführung in die moderne Kolloidchemie ; mit besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendungen*, Steinkopf, Dresden, Leipzig **1915**.
- [116] R. P. Feynman, *Engineering and Science* **1960**, 22.
- [117] S. Reuss, Nanotechnologie im Schulunterricht am Beispiel Rastertunnelmikroskop und Ferrofluid, *Schriftliche Hausarbeit für die erste Staatsprüfung Lehramt an Gymnasien*, Julius-Maximilians-Universität **2011**.
- [118] S. Block, *What is Nanotechnology?*, National Institutes of Health symposium on Nanotechnology, Bethesda, Maryland **2000**.
- [119] R. Ahrens, *Nanopartikel: Industrie kritisiert EU-Definition*, <http://www.ingenieur.de/Politik-Wirtschaft/Energie-Umweltpolitik/Streit-um-Nanopartikel-Industrie-kritisiert-EU-Definition> **2011**.
- [120] U. Fiedeler, M. Simkó, A. Gaszó, M. Nentwich, *Zur Definition der Nanotechnologie*, Wien **2008**.
- [121] Food and Environmental Hygiene Department Hong Kong, *Nanotechnology and Food Safety: Risk Assessment Studies*, Hong Kong **2010**.
- [122] U. Juschkus, *Informationen Bau-Rationalisierung* **2008**, 37 (1), 17.
- [123] International Organization for Standardization, *Nanotechnologies - Vocabulary: Part 1: Core definitions*, ISO/TS 80004-2:2015(E), Geneva, Switzerland **2015**.
- [124] A. Eckardt, C. M. Ziegeler, *Nanotechnologie und Life Sciences*, Zürich **2002**.
- [125] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, *"Aus dem Labor auf dem Teller": Die Nutzung der Nanotechnologien im Lebensmittelsektor*.



- [126] T. Wilke, K. Wolf, A. Steinkuhle, T. Waitz, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, 64 (4), 28.
- [127] S. Schwarzer, T. Wilke, R. Abdelaziz, M. Elbahri, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2015**, 64 (4), 28.
- [128] A. Asok, M. N. Gandhi, A. R. Kulkarni, *Nanoscale* **2012**, 4 (16), 4943.
- [129] P. Heinzerling, N. Boymans, J. Schneider, *Chemkon* **2012**, 19 (4), 163.
- [130] M. Vonlanthen, *Goldrubinglas aus der Mikrowelle*, [http://www.nanofor-schools.ch/app/download/1225799150/Goldrubinglas\\_aus\\_der\\_Mikrowelle.pdf?t=1231764648](http://www.nanofor-schools.ch/app/download/1225799150/Goldrubinglas_aus_der_Mikrowelle.pdf?t=1231764648) **2007**.
- [131] M. Brust, J. Fink, D. Bethell, D. J. Schiffrin, C. Kiely, *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **1995** (16), 1655.
- [132] S. K. Boda, J. Broda, F. Schiefer, J. Weber-Heynemann, M. Hoss, U. Simon, B. Basu, W. Jahnen-Dechent, *Small* **2015**, 11 (26), 3183.
- [133] S. Huang, X. Cai, J. Liu, *J. Am. Chem. Soc.* **2003**, 125 (19), 5636.
- [134] J. Menthe, H. Heller, *J Nano Educ* **2015**, 7 (1), 73.
- [135] T. Wilke, S. Haffer, C. Weinberger, M. Tiemann, T. Wagner, T. Waitz, *J Nano Educ* **2014**, 6 (2), 117.
- [136] T. Wilke, S. Haffer, M. Tiemann, T. Waitz, *Chemkon* **2012** (19), 67.
- [137] T. Wagner, S. Haffer, C. Weinberger, D. Klaus, M. Tiemann, *Chem. Soc. Rev.* **2013**.
- [138] T. Waitz, M. Tiemann, *Chemkon* **2009**, 16 (4), 183.
- [139] T. Wagner, C.-D. Kohl, S. Morandi, C. Malagù, N. Donato, M. Latino, G. Neri, M. Tiemann, *Chem. Eur. J.* **2012**, 18 (26), 8216.
- [140] J. C. Slater, *J. Chem. Phys.* **1964**, 41 (10), 3199.
- [141] H. Goesmann, C. Feldmann, *Angewandte Chemie* **2010**, 122 (8), 1402.
- [142] K. Mishra, N. Basavegowda, Y. R. Lee, *RSC Adv* **2016**, 6 (33), 27974.
- [143] L. Xu, X.-C. Wu, J.-J. Zhu, *Nanotechnology* **2008**, 19 (30), 305603.
- [144] J. Dege, T. Waitz, S. Haffer, V. Pietzner, R. Abu-Much, M. Hugerat, T. Wilke, *J Nano Educ* **2016**, 8 (1), im Druck.
- [145] D. K. Ross, *Vacuum* **2006**, 80 (10), 1084.
- [146] M. Grüne et al., *Nanotechnologie - Teilstudie wissenschaftlich-technische Grundlagen*, Düsseldorf/Euskirchen **2002**.

- [147] B. Niesing, *Fraunhofer Magazin* **2006** (4), 8.
- [148] G. Schmid, *Nanoparticles: From theory to application*, Wiley-VCH, Weinheim **2004**.
- [149] M. Quinten, *Optical Properties of Nanoparticle Systems: Mie and Beyond*, John Wiley & Sons **2011**.
- [150] A. Krell, T. Hutzler, *EP1557402*, **2005**.
- [151] H. Schwertfeger, P. R. Schreiner, *Chemie in unserer Zeit* **2010**, 44 (4), 248.
- [152] W. Luther et al., *Nanotechnologie als wirtschaftlicher Wachstumsmarkt: Innovations- und Technikanalyse*, 1st ed., Düsseldorf **2004**.
- [153] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. N. van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, J. Chazelas, *Phys. Rev. Lett.* **1988**, 61 (21), 2472.
- [154] Andreas Jungbluth, *Preisgekrönt: Festplattenlesen mit Nanotechnologie*, <http://www.nanotruck.de/treffpunkt-nanowelten/nanotechnologie-konkret/leben-und-freizeit/kommunikation/nobelpreis-fuer-nanoschichten-im-festplattenlesekopf.html> **2010**.
- [155] B. H. Eberhard Wassermann, *Physik Journal* **2007**, 6 (12), 23.
- [156] R. Dittmeyer et al., *Neue Technologien*, 5th ed., Chemische Technik, Prozesse und Produkte ; 2, Wiley-VCH, Weinheim **2004**.
- [157] W. R. Moser, J. Find, S. C. Emerson, I. M. Krausz, in *Nanostructured materials*, Vol. 27, *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 27 (Eds: J. Y. Ying), Academic Press, San Diego **2001**.
- [158] W. A. de Heer, *Rev. Mod. Phys.* **1993**, 65 (3), 611.
- [159] T. T. Kodas, M. J. Hampden-Smith, *Aerosol processing of materials*, Wiley-VCH, New York, NY **1999**.
- [160] H. W. Sarkas, S. T. Arnold, J. H. Hendricks, L. H. Kidder, C. A. Jones, K. H. Bowen, *Z Phys D - Atoms, Molecules and Clusters (Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters)* **1993**, 26 (1-4), 46.
- [161] *Advanced catalysts and nanostructured materials: Modern synthetic methods* (Eds: W. R. Moser), Academic Press, San Diego **1996**.
- [162] S. Becht, S. Ernst, R. Bappert, C. Feldmann, *Chemie in unserer Zeit* **2010**, 44 (1), 14.
- [163] H.-J. Fecht, *Nanostructured Materials* **1995**, 6 (1-4), 33.
- [164] I. Subramanian, *Keeping Moore's "Law" Alive: An IDM perspective*, GSA Silicon Summit, Mountain View, Kalifornien **2012**.

- [165] D. Höltkemeier, J.-H. Kreker, M. Oetken, *Chemkon* **2006**, 13 (2), 63.
- [166] S. K. Earl, T. D. James, T. J. Davis, J. C. McCallum, R. E. Marvel, R. F. Haglund, A. Roberts, *Opt. Express* **2013**, 21 (22), 27503.
- [167] Deutsches Museum München, *Entstehung eines Dendrimers*, [http://www.deutsches-museum.de/fileadmin/Content/2009/02\\_Ausstellungen/09\\_Neue\\_Technologien/01\\_Ausstellung/Highlights/bottom\\_up\\_CD\\_61423\\_resize.jpg](http://www.deutsches-museum.de/fileadmin/Content/2009/02_Ausstellungen/09_Neue_Technologien/01_Ausstellung/Highlights/bottom_up_CD_61423_resize.jpg) **2009**.
- [168] C. Pacholski, A. Kornowski, H. Weller, *Angewandte Chemie* **2002**, 114 (7), 1234.
- [169] L. O. Brown, J. E. Hutchison, *J. Am. Chem. Soc.* **1997**, 119 (50), 12384.
- [170] *Grenzflächen und kolloid-disperse Systeme: Physik und Chemie: mit 88 Tabellen* (Eds: H.-D. Dörfler), Springer-Verlag, Berlin **2002**.
- [171] N. G. Bastús, F. Merkoçi, J. Piella, V. Puentes, *Chem. Mater.* **2014**, 26 (9), 2836.
- [172] P. C. Lee, D. Meisel, *J. Phys. Chem.* **1982**, 86 (17), 3391.
- [173] K. S. P. Edamana, *RSC Adv* **2016**.
- [174] X. G. Luo, X. X. Huang, X. X. Wang, X. H. Zhong, X. X. Meng, J. N. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, 8 (12), 7818.
- [175] Josephina Maier, *Die Zeit* **2009** (27).
- [176] K. Jopp, *Die Welt* **2014**, 68 (1), 17.
- [177] T. Erdem, H. V. Demir, *Nanophotonics* **2013**, 2 (1).
- [178] S. Greßler, F. Part, A. Gaszón, "Nano-Abfall": *Produkte mit Nanomaterialien am Ende ihres Lebenszyklus*, Wien **2014**.
- [179] E. Pösel, C. Schmidtke, S. Fischer, K. Peldschus, J. Salamon, H. Kloust, H. Tran, A. Pietzsch, M. Heine, G. Adam, U. Schumacher, C. Wagener, S. Förster, H. Weller, *ACS Nano* **2012**, 6 (4), 3346.
- [180] X. Wang, G. I. Koleilat, J. Tang, H. Liu, I. J. Kramer, R. Debnath, L. Brzozowski, D. A. R. Barkhouse, L. Levina, S. Hoogland, E. H. Sargent, *Nature Photon* **2011**, 5 (8), 480.
- [181] A. Hellmann-Grobe, *Nanomedizin - Chancen und Risiken: Eine Analyse der Potentiale, der Risiken und der ethisch-sozialen Fragestellungen um den Einsatz von Nanotechnologien und Nanomaterialien in der Medizin, Studie im Auftrag der Friedrich-Ebert-Stiftung*, Bio- und Gentechnologie, Friedrich-Ebert-Stiftung, Stabsabt, Berlin **2008**.
- [182] H. Breuer, *Süddeutsche Zeitung* **2015**, 70.

- [183] D. Appelhans, B. Voit, *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden* **2007**, 56 (1), 53.
- [184] J. Roggenbuck, T. Waitz, M. Tiemann, *Microporous and Mesoporous Materials* **2008**, 113 (1-3), 575.
- [185] M. Tiemann, M. Schulz, C. Jäger, M. Fröba, *Chem. Mater.* **2001**, 13 (9), 2885.
- [186] I. Sondi, B. Salopek-Sondi, *Journal of Colloid and Interface Science* **2004**, 275 (1), 177.
- [187] H. Wang, L. Tang, X. Wu, W. Dai, Y. Qiu, *Applied Surface Science* **2007**, 253 (22), 8818.
- [188] H. Schmidkunz, *Chemische Freihandversuche*, Aulis-Verl, [Hallbergmoos] **2011**.
- [189] A. Rössler, *J Oberfl Techn* **2006**, 46 (1), 34.
- [190] B. O'Regan, M. Grätzel, *Nature* **1991**, 353 (6346), 737.
- [191] S. Pud, A. Kisner, M. Heggen, D. Belaineh, R. Temirov, U. Simon, A. Offenhäusser, Y. Mourzina, S. Vitusevich, *Small* **2013**, 9 (6), 960.
- [192] K. Dawson, A. O'Riordan, *J. Phys.: Conf. Ser.* **2011**, 307, 12004.
- [193] V. Stenzel, *Strömungsgünstige Oberflächen durch innovatives Lacksystem - Haifischhaut für Großbauteile*, <http://www.ifam.fraunhofer.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-DE-Lacktechnik-Riblet.pdf> **2011**.
- [194] L. Heepe, A. E. Kovalev, A. E. Filippov, S. N. Gorb, *Phys. Rev. Lett.* **2013**, 111 (10).
- [195] K. Koch, W. Barthlott, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2009**, 367 (1893), 1487.
- [196] P. J. A. Borm, *Inhalation Toxicology* **2008**, 14 (1), 1.
- [197] Umweltbundesamt (Hrsg.), *Nanotechnik: Chancen und Risiken für Mensch und Umwelt*, Dessau-Roßlau **2006**.
- [198] G. Oberdörster, E. Oberdörster, J. Oberdörster, *Environmental Health Perspectives* **2005**, 113 (7), 823.
- [199] S. Vosen, S. Rieck, A. Heidsieck, O. Mykhaylyk, K. Zimmermann, W. Bloch, D. Eberbeck, C. Plank, B. Gleich, A. Pfeifer, B. K. Fleischmann, D. Wenzel, *ACS Nano* **2016**, 10 (1), 369.
- [200] P. J. A. Borm, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf **2002**.
- [201] M. Möller et al., *Nanomaterialien: Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit*, TA-Swiss, Vol. 60, vdf, Zürich **2013**.
- [202] C. A. Poland, R. Duffin, I. Kinloch, A. Maynard, W. A. H. Wallace, A. Seaton, V. Stone, S. Brown, W. MacNee, K. Donaldson, *Nature Nanotech* **2008**, 3 (7), 423.

- [203] K. Aschberger, H. J. Johnston, V. Stone, R. J. Aitken, S. M. Hankin, S. A. K. Peters, C. L. Tran, F. M. Christensen, *Critical Reviews in Toxicology* **2010**, *40* (9), 759.
- [204] J. P. Ryman-Rasmussen, M. F. Cesta, A. R. Brody, J. K. Shipley-Phillips, J. I. Everitt, E. W. Tewksbury, O. R. Moss, B. A. Wong, D. E. Dodd, M. E. Andersen, J. C. Bonner, *Nature Nanotech* **2009**, *4* (11), 747.
- [205] M. Ober, *Frankfurter Allgemeine Zeitung* **2015**, 66.
- [206] J. Lelieveld, J. S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, A. Pozzer, *Nature* **2015**, *525* (7569), 367.
- [207] C. A. Pope III, R. T. Burnett, M. J. Thun, E. E. Calle, D. Krewski, K. Ito, G. D. Thurston, *JAMA* **2002**, *287* (9), 1132.
- [208] D. E. Abbey, N. Nishino, W. F. McDonnell, R. J. Burchette, S. F. Knutsen, W. Lawrence Beeson, J. X. Yang, *American journal of respiratory and critical care medicine* **1999**, *159* (2), 373.
- [209] A. Kraegeloh, *Nano Zell Interaktionen: Menschliche Lungenzellen*, <https://idw-online.de/en/news404657> **2011**.
- [210] Scientific Committee on Consumer Safety, *Opinion on Titanium Dioxide (nano form): COLIPA n° S75*, Scientific Committee on Consumer Safety, European Commission, Luxembourg **2013**.
- [211] Hillyer, Albrecht, *Microscopy and microanalysis the official journal of Microscopy Society of America, Microbeam Analysis Society, Microscopical Society of Canada* **1998**, *4* (5), 481.
- [212] J. F. Hillyer, R. M. Albrecht, *Journal of pharmaceutical sciences* **2001**, *90* (12), 1927.
- [213] S. Greßler et al., *Nanopartikel und nanostrukturierte Materialien in der Lebensmittelindustrie*, Wien **2008**.
- [214] J. Menthe, P. Düker, H. Heller, A. Hönke, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, *64* (4), 18.
- [215] H. F. Krug, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, *64* (4), 11.
- [216] T. Wilke, "Weil ... Nano ist besser?!": Entwicklung von Experimenten zum Thema Nanotechnologie für den Chemieunterricht, *Masterarbeit*, Georg-August-Universität Göttingen **2012**.
- [217] T. Wilke, T. Waitz, in *New Perspectives in Science Education: Conference Proceedings 2012* (Eds: Pixel), University Press **2012**.

- [218] I. Lehmann, *Wissen und Wissensvermittlung im ökologischen Landbau in Baden-Württemberg in Geschichte und Gegenwart*, Kommunikation und Beratung, Bd. 62, Margraf, Weikersheim **2005**.
- [219] W. Bösche, *Grundlagen der qualitativen Sozialforschung, Lehrtext*, Universität Augsburg **2016**.
- [220] *Handbuch qualitative Sozialforschung: Grundlagen, Konzepte, Methoden und Anwendungen*, 2nd ed., Grundlagen Psychologie (Eds: U. Flick, E. v. v. Kardorff, H. Keupp), Beltz, Weinheim **1995**.
- [221] E. Raab-Steiner, M. Benesch, *Der Fragebogen: Von der Forschungsidee zur SPSS, PASW-Auswertung*, 2nd ed., UTB Schlüsselkompetenzen, Vol. 8406, Facultas-Verl, Wien **2010**.
- [222] M. Amelang, D. Bartussek, *Differentielle Psychologie und Persönlichkeitsforschung*, 5th ed., Kohlhammer-Standards Psychologie, Kohlhammer, Stuttgart **2001**.
- [223] EETimes, *Globalfoundries: EUV-Lithografie ab 2015*, <http://www.eetimes.com/electronics-news/4204581/Globalfoundries-plans-production-EUV-by-2015> **2010**.
- [224] M. Ringelsiep, *Nanofood: Von Wunderpizzas und Zaubermilch*, [http://www.planetwissen.de/natur\\_technik/forschungszweige/nanotechnologie/nanofood.jsp](http://www.planetwissen.de/natur_technik/forschungszweige/nanotechnologie/nanofood.jsp) **2011**.
- [225] H.-M. Cheng, Q.-H. Yang, C. Liu, *Carbon*, **39**, 1447.
- [226] V. Stenzel, *Anti-Eis-Beschichtungen*, [http://www.ifam.fraunhofer.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-DE-Lacktechnik-Anti\\_Eis\\_Beschichtungen.pdf](http://www.ifam.fraunhofer.de/2804/fachinfo/infoblaetter/Produktblatt-2804-DE-Lacktechnik-Anti_Eis_Beschichtungen.pdf) **2010**.
- [227] P. Ottersbach, C. Schmitz, J. Averdung, L. Heinrich, A. Gutsch, *Chemie in unserer Zeit* **2005**, *39* (1), 54.
- [228] A. Reuning, *Nanoteilchen in der Lunge - Gefahren und Chancen der Winzlinge* **2009**.
- [229] Der Tagesspiegel, *Der Tagesspiegel* **2011**.
- [230] S. Greßler et al., *Selbstreinigende, schmutz- und wasserabweisende Beschichtungen auf Basis von Nanotechnologie*, Wien **2010**.
- [231] A.-L. Kähkönen, A. Laherto, A. Lindell, *J Nano Educ* **2011**, *3* (1), 1.
- [232] K. A. Bingimlas, *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education* **2009**, *5* (3), 245.
- [233] C. P. Newhouse, *The Impact of ICT on Learning and Teaching*, Specialist Education Services, Perth **2002**.

- [234] T. Chachibaia, in *Nanotechnology: Concepts, methodologies, tools, and applications*, Premier reference source (Eds: M. Khosrowpour), Information Science Reference/IGI Global. Hershey, Pa. **2014**.
- [235] U. Kattmann, in *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung: Ein Handbuch für Lehramtsstudenten und Doktoranden*, Springer-Lehrbuch (Eds: D. Krüger, H. Vogt), Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Heidelberg **2007**.
- [236] T. Riemeier, *Biologie verstehen: Die Zelltheorie*, 1st ed., Beiträge zur didaktischen Rekonstruktion, Vol. 7, Didaktisches Zentrum Carl-von-Ossietzky-Univ, Oldenburg **2005**.
- [237] V. Frerichs, Schülervorstellungen und wissenschaftliche Vorstellungen zu den Strukturen und Prozessen der Vererbung: ein Beitrag zur Didaktischen Rekonstruktion, Carl von Ossietzky Universität **1999**.
- [238] U. Kattmann, *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* **1995**, 1 (1), 29.
- [239] J. Dege, T. Waitz, T. Wilke, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, 64 (4), 32.
- [240] S. Yuan, W. Chen, S. Hu, *Materials Science and Engineering: C* **2005**, 25 (4), 479.
- [241] A. Lampen, *Aktuelle Aspekte der Risikobewertung von Nanomaterialien in Lebensmitteln*, Konferenz zu ethischen Fragen der Nanotechnologie im Lebensmittelsektor, Saarbrücken **2012**.
- [242] J. Leve, G. Ott, *Nanomaterialien: Anwendungen im Umweltbereich*, Karlsruhe **2011**.
- [243] M. W. Tausch, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2005**, 54 (Heft 3).
- [244] C. Raab, M. Simkó, A. Gzásó, U. Fiedeler, M. Nentwich, *ITAnt* **2011**, 2en (1), 1.
- [245] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, *Was ist Nanotechnologie?*, <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Reformprojekte/hightech-strategie-2007-06-20-was-ist-nanotechnologie-4-1.html> **2016**.
- [246] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, *Kurzinfo Nanotechnologie*, <http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheitschemikalien/nanotechnologie/kurzinfo/> **2015**.
- [247] G. Samulat, *"Lecker Nano": Lebensmitteltechnologie*, <http://www.nanomagazin.net/lecker-nano> **2014**.
- [248] G. Jander, E. Blasius, J. Strähle, R. Rossi, *Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum: (einschließlich der quantitativen Analyse) ; mit 69 Tabellen*, 15th ed., Hirzel, Stuttgart **2005**.

- [249] K. Achtermann, *Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg: Chemie*, Hannover **2009**.
- [250] D. Wöhrle, M. W. Tausch, W.-D. Stohrer, *Photochemie: Konzepte, Methoden, Experimente*, 2010th ed., Wiley-VCH, Weinheim **2010**.
- [251] K. Stopper, Laser-induzierte Primärreaktionen an TiO<sub>2</sub>-Halbleiterkolloiden: Untersuchung mit zeitaufgelöster photoakustischer Kalometrie, *Dissertation*, Freie Universität Berlin **1999**.
- [252] F. Stowasser, Strukturelle Charakterisierung von Galliumnitrid-Nanopartikeln, *Dissertation*, Ruhr-Universität **2004**.
- [253] M. Akarsu, Herstellung undotierter und dotierter TiO<sub>2</sub>-partikel und Untersuchung ihrer photokatalytischen Aktivität, *Dissertation*, Universität des Saarlandes **2006**.
- [254] ARD, *Die große Show der Naturwunder: Luftreinigende Wandfarbe*, Berlin, <http://www.swr.de/naturwunder/thema-1-luftreinigende-wandfarbe/-/id=1223312/did=5181672/nid=1223312/1b7rcky/index.html> **2009**.
- [255] ARD, *Die große Show der Naturwunder: Luftreinigende Wandfarbe* **2009**.
- [256] Elegant Embellishments Ltd, A. Cartagena, Berlin, Mexiko, <http://www.solve370e.com/> **2015**.
- [257] *Handbuch der präparativen anorganischen Chemie: In drei Bänden*, 3rd ed. (Eds: G. Brauer), Enke, Stuttgart **1978**.
- [258] K.-J. Hwang, S.-J. Yoo, S.-H. Jung, J.-W. Lee, *Bulletin of the Korean Chemical Society* **2009**, 30 (1), 172.
- [259] M. Baum, S. Schwarzer, *Chemkon* **2013**, 20 (1), 25.
- [260] F. Groß, S. Sepeur, *Farbe & Lack* **2006** (12), 20.
- [261] A. Fujishima, T. N. Rao, D. A. Tryk, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* **2000**, 1 (1), 1.
- [262] S. Schwarzer, Liedtke, Patrick, Staubitz, Anne., R. Adelung, *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **2016**, 27 (152), 34.
- [263] Sebastian Gerke, Entwicklung von Photokatalyseexperimenten mit Titandioxid für den Chemieunterricht, Georg-August-Universität **2013**.
- [264] J.-O. Kliemann, H. Gabriel, H. Gutzmann, F. Gärtner, T. Klassen, *Keramische Zeitschrift* **2011**, 61 (1), 31.



- [265] A. Kubacka, M. S. Diez, D. Rojo, R. Bargiela, S. Ciordia, I. Zapico, J. P. Albar, C. Barbas, Martins dos Santos, Vitor A P, M. Fernandez-Garcia, M. Ferrer, *Scientific reports* **2014**, 4, 4134.
- [266] B. Dodge, *Some Thoughts About WebQuests*, San Diego, [http://webquest.sdsu.edu/about\\_webquests.html](http://webquest.sdsu.edu/about_webquests.html) **1995**.
- [267] T. Wilke, B. Niepötter, T. Waitz, in *New Perspectives in Science Education: Conference Proceedings 2013* (Eds: Pixel), University Press **2013**.
- [268] T. Wilke, *Ein WebQuest zum Thema Nanomaterialien*, <http://unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/wip/nanomaterialien/> **2012**.
- [269] M. A. Maurer-Jones, I. L. Gunsolus, C. J. Murphy, C. L. Haynes, *Analytical chemistry* **2013**, 85 (6), 3036.
- [270] I. Eilks, B. Ralle, *Chemkon* **2002**, 9 (1), 13.
- [271] S. Markic, I. Eilks, *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education* **2011**, 7 (3), 149.
- [272] I. Eilks, B. Ralle, in *Research in chemical education - What does this mean?: Proceedings of the 16th Symposium on Chemical Education held at the University of Dortmund, 22-24 May 2002*, Didaktik der Naturwissenschaften (Eds: B. Ralle, I. Eilks), Shaker. Aachen **2002**.
- [273] h. Meyer, *Was ist guter Unterricht?*, 1st ed., Cornelsen-Verl. Scriptor, Berlin **2004**.
- [274] T. Wilke, S. Haffer, I. Parchmann, E. von Hoff, T. Waitz, *Chemkon in Vorbereitung*.
- [275] T. G. Smijs, S. Pavel, *Nanotechnology, science and applications* **2011**, 4, 95.
- [276] R. Pietruszka, B. S. Witkowski, S. Gieraltowska, P. Caban, L. Wachnicki, E. Zielony, K. Gwozdz, P. Bieganski, E. Placzek-Popko, M. Godlewski, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **2015**, 143, 99.
- [277] R. Kumar, O. Al-Dossary, G. Kumar, A. Umar, *Nano-Micro Lett.* **2015**, 7 (2), 97.
- [278] C.-S. Chuang, T.-C. Fung, B. G. Mullins, K. Nomura, T. Kamiya, H.-P. D. Shieh, H. Hosono, J. Kanicki, *SID Symposium Digest* **2008**, 39 (1), 1215.
- [279] N. Landwehr, E. Müller, *Begleitetes Selbststudium: Didaktische Grundlagen und Umsetzungshilfen*, 1st ed., Reihe Pädagogik, h.e.p, Bern **2006**.
- [280] W. Schönangerer, *Kompetenzorientierung als Herausforderung für die Schule*, Linz-Landwied, [http://hblw-landwied.at/fileadmin/dateien\\_upload/schule/leitbild/Schuljahr\\_11\\_12/Kollegenbrief\\_59/Kompetenzorientierung\\_Verlaufsformen.pdf](http://hblw-landwied.at/fileadmin/dateien_upload/schule/leitbild/Schuljahr_11_12/Kollegenbrief_59/Kompetenzorientierung_Verlaufsformen.pdf) **2011**.

- [281] N. ter Horst, "Nano" in die Schule!: Entwicklung und Konzeption einer Unterrichtseinheit zum Thema Nanotechnologie, *Masterarbeit*, Georg-August-Universität Göttingen **2014**.
- [282] P. Heinzerling, *Chemkon* **2011**, 19 (1), 33.
- [283] H. Weller, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, 64 (4), 5.
- [284] K. Winkelmann, T. Noviello, S. Brooks, *J. Chem. Educ.* **2007**, 84 (4), 709.
- [285] F. E. Osterloh, *Chemical Society reviews* **2013**, 42 (6), 2294.
- [286] Y. Pan, Y. R. Li, Y. Zhao, D. L. Akins, *J. Chem. Educ.* **2015**, 92 (11), 1860.
- [287] M. L. Landry, T. E. Morrell, T. K. Karagounis, C.-H. Hsia, C.-Y. Wang, *J. Chem. Educ.* **2014**, 91 (2), 274.
- [288] L. D. Winkler, J. F. Arceo, W. C. Hughes, B. A. DeGraff, B. H. Augustine, *J. Chem. Educ.* **2005**, 82 (11), 1700.
- [289] P. Kumar, P. Kumar, A. Deep, L. M. Bharadwaj, *Appl Nanosci* **2013**, 3 (2), 141.
- [290] C.-H. M. Chuang, P. R. Brown, V. Bulovic, M. G. Bawendi, *Nature materials* **2014**, 13 (8), 796.
- [291] H. Althues, *Lumineszierende, transparente Nanokomposite: Synthese und Charakterisierung*, Kassel **2007**.
- [292] J. Götze, *Kathodenlumineszenz-Mikroskopie und -Spektroskopie in den Geo- und Materialwissenschaften*, Wien **2002**.
- [293] D. Weiß, H. Brandl, *Chemie in unserer Zeit* **2013**, 47 (1), 50.
- [294] J. Yu, L. Qi, M. Jaroniec, *J. Phys. Chem. C* **2010**, 114 (30), 13118.
- [295] K. Artelt, F. Kutteroff, T. Wilke, T. Waitz, A. Habekost, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **2015**, 64 (1), 25.
- [296] A. Hoferichter, *Süddeutsche Zeitung* **2014**.
- [297] R. Blonder, *J Nano Educ* **2010**, 2 (1), 67.
- [298] C. Steinbach, *Titandioxid: Materialinfo*, <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/titandioxid/materialinfo-titandioxid> **2010**.
- [299] Wagner, S.: Dillert, R., D. Bahnemann, C. Kasper, *labor&more* **2012**, 40 (5), 40.
- [300] Stiftung Warentest, *test* **2012** (10/2012), 64.
- [301] T. Waitz, B. Caotarani, M. Gröger, *Astronomie + Raumfahrt* **2013**, 50 (1), 31.

- [302] B. Fromme, in *Didaktik der Physik: Beiträge zur Frühjahrstagung Düsseldorf 2004 ; CD zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (Eds: V. Nordmeier), Lehmanns Media. Berlin **2004**.
- [303] M. W. Tausch, M. Twellmann, C. Bohrmann, *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie* **2001**, 66 (12), 12.
- [304] Andreas Kay, Michael Grätzel, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **1996**, 44 (1), 99.
- [305] Online-Wörterbuch Wortbedeutung.info, *Novitätseffekt*, <http://www.wortbedeutung.info/Novit%C3%A4tseffekt/> **2016**.
- [306] L. Armyanskiy, *So macht die ARD antislawischen Rassismus salonfähig*, <http://juliantumasewitsch.blogspot.de/2014/05/eurovision-song-contest-2014-so-macht.html> **2014**.
- [307] K. Burk, C. Claussen, *Lernorte außerhalb des Klassenzimmers II: Methoden, Praxisberichte, Hintergründe*, Beiträge zur Reform der Grundschule, Arbeitskreis Grundschule, Frankfurt a.M **1981**.
- [308] J. L. Carwile, X. Ye, X. Zhou, A. M. Calafat, K. B. Michels, *JAMA* **2011**, 306 (20), 2218.
- [309] I. A. Lang, T. S. Galloway, A. Scarlett, W. E. Henley, M. Depledge, R. B. Wallace, D. Melzer, *JAMA* **2008**, 300 (11), 1303.
- [310] F. Jiao, K. M. Shaju, P. G. Bruce, *Angewandte Chemie International Edition* **2005**, 44 (40), 6550.
- [311] E. Riedel, *Anorganische Chemie*, 4th ed., De Gruyter, Berlin, New York **1999**.
- [312] T. S. Coffey, *Am. J. Phys* **2008**, 76 (6), 551.
- [313] H. Greim, *Nachr. Chem.* **2011**, 59 (2), 124.
- [314] H. Wefers, *Nachr. Chem.* **2011**, 59 (2), 125.
- [315] B. Osterath, *Nachr. Chem.* **2011**, 59 (2), 121.
- [316] J. Salzner, A. Lühken, H. J. Bader, *Chemkon* **2011**, 18 (3), 135.
- [317] M. Tausch, D. Wöhrle, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* **1989**, 38 (3), 37.
- [318] H. Sommerfeld, *Chemie in der Schule* **1995**, 42 (4), 147.
- [319] C. Pawek, *Schülerlabore als interessefördernde außerschulische Lernumgebungen für Schülerinnen und Schüler aus der Mittel-und Oberstufe*, Kiel **2009**.
- [320] LernortLabor - Bundesverband der Schülerlabore e.V., *Schülerlabor-Atlas*, <http://www.schuelerlabor-atlas.de/> **2016**.

- [321] A. Krapp, in *Interesse, Lernen, Leistung: Neuere Ansätze der pädagogisch-psychologischen Interessenforschung*, Arbeiten zur sozialwissenschaftlichen Psychologie, Vol. 26 (Eds: A. Krapp, M. Prenzel), Aschendorff. Münster **1992**.
- [322] I. Glowinski, *Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse fördernde Lernumgebungen* **2007**.
- [323] A. Brandt, *Förderung von Motivation und Interesse durch außerschulische Experimentierlabors. Das "teutolab" als Beispiel für den Lerngegenstand Chemie.*, Universität Bielefeld **2005**.
- [324] F.-J. Scharfenberg, *Experimenteller Biologieunterricht zu Aspekten der Gentechnik im Lernort Labor: empirische Untersuchung zu Akzeptanz, Wissenserwerb und Interesse.*, Universität Bayreuth **2005**.
- [325] K. Engeln, *Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken*, Christian-Albrechts Universität Kiel **2004**.
- [326] T. Wilke, B. Drabent, Neher, Eva-Maria, Waitz, Thomas, *Nanotechnologie - ein experimentelles Kursdesign für das XLAB-Schülerlabor*, 11. Lernort Labor Jahrestagung, Saarbrücken, Saarbrücken **2016**.
- [327] C. Battmer, A. Popp, E.-M. Neher, *XLAB – Göttinger Experimentallabor für junge Leute e.V.*, <http://www.xlab-goettingen.de/presse.html> **2016**.
- [328] M. Streller, *The educational effect of pre and post-work in out-of-school laboratories*, School of Science, TU Dresden, Dissertation **2015**.
- [329] H.-D. Barke, G. Harsch, A. Marohn, *Chemiedidaktik kompakt: Lernprozesse in Theorie und Praxis*, 2nd ed., Springer Berlin Heidelberg, Berlin Heidelberg **2015**.
- [330] H. G. Maier, *Lebensmittelanalytik: Band I: Optische Methoden*, 2nd ed., Uni-Taschenbücher, Vol. 342, Steinkopff, Heidelberg **1974**.
- [331] Beiersdorf AG, *Silver Protect After Shave Fluid | NIVEA MEN*, <http://www.nivea-men.de/produkte/Silver-Protect-After-Shave-Fluid> **2016**.
- [332] Beiersdorf AG, *NIVEA FOR MEN - Silver Protect*, [http://www.nivea-formen.co.uk/products/silver\\_protect\\_1.html](http://www.nivea-formen.co.uk/products/silver_protect_1.html) **2012**.
- [333] N. von Goetz, *Consumer exposure to silver (nanoparticles) in consumer products*, BfR-Conference on Nanosilver, Berlin **2012**.
- [334] Drytest GmbH, *Luftkeimsammler*, <http://www.drytest.de/194e-Malzextrakt-Agar-fuer-Luftkeimsammler-20-Stueck->.

- [335] C.-N. Lok, C.-M. Ho, R. Chen, Q.-Y. He, W.-Y. Yu, H. Sun, P. K.-H. Tam, J.-F. Chiu, C.-M. Che, *Journal of biological inorganic chemistry JBIC a publication of the Society of Biological Inorganic Chemistry* **2007**, 12 (4), 527.
- [336] J. R. Morones, J. L. Elechiguerra, A. Camacho, K. Holt, J. B. Kouri, J. T. Ramirez, M. J. Yacaman, *Nanotechnology* **2005**, 16 (10), 2346.
- [337] J. L. Elechiguerra, J. L. Burt, J. R. Morones, A. Camacho-Bragado, X. Gao, H. H. Lara, M. J. Yacaman, *Journal of nanobiotechnology* **2005**, 3, 6.
- [338] C. Steinbach, *Silber-Nanopartikel. Materialinfo*, <http://www.nanopartikel.info/nano-info/materialien/silber/materialinfo-silber> **2010**.
- [339] T. Wilke, „Mit Nanosilber gegen Bakterien“: *Antimikrobielle Silber-Nanopartikel in Alltagsgegenständen*, <http://unterrichtsmaterialien-chemie.uni-goettingen.de/wip/nanosilber/index.html> **2013**.
- [340] S. Schwarzer, R. Abdelaziz, M. Elbahri, T. Wilke, *Chemkon* **angenommen**.
- [341] S. Schwarzer, R. Abdelaziz, M. Elbahri, T. Wilke **in Vorbereitung**.
- [342] R. Abdelaziz, D. Disci-Zayed, M. K. Hedayati, J.-H. Pohls, A. U. Zillohu, B. Erkartal, V. S. K. Chakravadhanula, V. Duppel, L. Kienle, M. Elbahri, *Nature communications* **2013**, 4, 2400.
- [343] T. Hemmert, *Wärmetransport*, <http://www.physik.uni-wuerzburg.de/video/waermelehre/transport/t04.html> **2004**.
- [344] D. Völcker, A. Schleip, *Handbuch zum Physik- und Chemieunterricht: Mit den Werken beobachten - experimentieren - erklären - anwenden physikalisches Schülerpraktikum, chemisches Schülerpraktikum*, Hirschgraben-Verl., Frankfurt a.M. **1968**.
- [345] J. G. Leidenfrost, *De aquae communis nonnullis qualitatibus tractatus*, [Typis Joan. Sebast. Straube, Acad. typogr.] Impensis Hermannii Ovensi, Univers. bibliopolæ, Duisburgi ad Rhenum **1756**.
- [346] J. Walker, in *Fundamentals of Physics* (Eds: D. Halliday, R. Resnick), Wiley. New York **1988**.
- [347] W. Selzer, *NiU Physik* **1991**, 39 (2), 24.
- [348] R. L. Agapov, J. B. Boreyko, D. P. Briggs, B. R. Srijanto, S. T. Retterer, C. P. Collier, N. V. Lavrik, *ACS Nano* **2014**, 8 (1), 860.
- [349] P. van Carey, *Liquid-vapor phase-change phenomena: An introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton **2008**.

- [350] G. Lamour, A. Hamraoui, A. Buvailo, Y. Xing, S. Keuleyan, V. Prakash, A. Eftekhari-Bafrooei, E. Borguet, *J. Chem. Educ.* **2010**, *87* (12), 1403.
- [351] M. Faraday, *Experimental researches in electricity: Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, CXXIII **1833**.
- [352] P. Kolarž, M. Gaisberger, P. Madl, W. Hofmann, M. Ritter, A. Hartl, *Atmos. Chem. Phys.* **2012**, *12* (8), 3687.
- [353] A. Holmes, *Principles of physical geology*, London **1966**.
- [354] R. Abdelaziz et al., *Online Supplementary Nature 1*, <http://nature.com/ncomms/2013/131029/ncomms3400/extref/ncomms3400-s3.mov>.
- [355] R. Abdelaziz et al., *Online Supplementary Nature 2*, <http://nature.com/ncomms/2013/131029/ncomms3400/extref/ncomms3400-s4.mov>.
- [356] M. Elbahri, D. Paretkar, K. Hirmas, S. Jebril, R. Adelung, *Adv. Mater.* **2007**, *19* (9), 1262.
- [357] S. Zajonc, M. Ducci, *Chemkon* **2013**, *20* (1), 9.
- [358] S. Zajonc, M. Ducci, *MNU Journal* **2013**, *66* (1), 24.
- [359] J. Turkevich, P. C. Stevenson, J. Hillier, *Discuss. Faraday Soc.* **1951**, *11* (0), 55.
- [360] C. Senft, U. Siemeling, *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* **2007**, *18* (97), 40.
- [361] N. Marmé, A. Aupperle-Pauls, F. Pauls, J.-P. Knemeyer, *Chemkon* **2014**, *21* (4), 181.
- [362] Y. Niederhöfer, H. Wöhrmann, *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* **2007**, *18* (97), 26.
- [363] P. Heinzerling, N. Boymans, J. Schneider, *Chemkon* **2012**, *19* (4), 163.
- [364] V. Obendrauf, *Chem. Sch.* **1998** (2), 9.
- [365] G. Frens, *Nat Phys Sci* **1973**, *241* (105), 20.
- [366] F. E. Wagner, S. Haslbeck, L. Stievano, S. Calogero, Q. A. Pankhurst, K.-P. Martinek, *Nature* **2000**, *407* (6805), 691.
- [367] P. Heinzerling, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2006**, *55* (1), 32.
- [368] J. Heimlinger, N. Busch, M. Epple, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* **2015**, *64* (4), 37.
- [369] D. T. Sawyer, J. L. Roberts, *Acc. Chem. Res.* **1988**, *21* (12), 469.
- [370] Amazon, *Pim Goldbarren 0,10 Gramm*, <http://amzn.to/2b821p1> **2016**.

- [371] K. S. W. Sing, D. H. Everett, R. A. W. Haul, L. Moscou, R. A. Pierotti, J. Rouquerol, T. Siemieniewska, *Pure Appl. Chem.* **1985**, *57* (4), 603.
- [372] T. Wagner, S. Krotzky, A. Weiß, T. Sauerwald, C.-D. Kohl, J. Roggenbuck, M. Tiemann, *Sensors* **2011**, *11* (3), 3135.
- [373] G. A. Gholami, B. Najafi, F. Mashhadiabbas, W. Goetz, S. Najafi, *Clinical oral implants research* **2012**, *23* (10), 1198.
- [374] S. Ghanaati, M. Barbeck, I. Willershausen, B. Thimm, S. Stuebinger, T. Korzinskas, K. Obreja, C. Landes, C. J. Kirkpatrick, R. A. Sader, *Clinical implant dentistry and related research* **2013**, *15* (6), 883.
- [375] A. Wollrab, *Naturwissenschaften im Unterricht, Physik, Chemie* **1989**, *37* (43), 14.
- [376] M. Noll, *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie* **1993**, *41* (17), 29.
- [377] H. J. Bader, *Naturwissenschaften im Unterricht, Physik, Chemie* **1989** (43), 18.
- [378] J. Sun, D. Ma, H. Zhang, X. Liu, X. Han, X. Bao, G. Weinberg, N. Pfänder, D. Su, *J. Am. Chem. Soc.* **2006**, *128* (49), 15756.
- [379] C. Steinbach, *Siliciumdioxid. Materialinfo*, <http://nanopartikel.info/nanoinfo/materialien/siliziumdioxid/materialinfo-siliziumdioxid> **2010**.
- [380] Silica Verfahrenstechnik GmbH, *Adsorption Agents and Breather Units*, [http://www.silica.berlin/PDF/ADSORPTION\\_BREATHERS\\_DEUTSCH\\_EN.pdf](http://www.silica.berlin/PDF/ADSORPTION_BREATHERS_DEUTSCH_EN.pdf) **2016**.
- [381] D. Zhao, *Science* **1998**, *279* (5350), 548.
- [382] S. Roy, M. Hegde, G. Madras, *Appl. Energy* **2009** (86), 2283.
- [383] X. Mou, B. Zhang, Y. Li, L. Yao, X. Wei, D. S. Su, W. Shen, *Angewandte Chemie* **2012**, 3044.
- [384] J. Xu, Q. Pan, Y. Shun, Z. Tian, *Sensors and Actuators B: Chemical* **2000**, *66* (1-3), 277.
- [385] C.-Y. Lu, S.-P. Chang, S.-J. Chang, T.-J. Hsueh, C.-L. Hsu, Y.-Z. Chiou, I.-C. Chen, *IEEE Sensors J.* **2009**, *9* (4), 485.
- [386] M. Tiemann, *Chem. Eur. J.* **2007**, *13* (30), 8376.
- [387] X. Ma, *J Nanoengng Nanomfg* **2012**, *2* (2), 143.
- [388] S. G. Ansari, S. W. Gosavi, S. A. Gangal, R. N. Karekar, R. C. Aiyer, *Journal of Materials Science Materials in Electronics* **1997**, *8* (1), 23.
- [389] H.-P. Hübner, E. Obermeier, *Technisches Messen*, **1985**, *52* (2), 59.
- [390] T. Wilke, S. Haffer, T. Waitz, *Chemkon* **2016**, *23* (1), 7.

- [391] J. Ackermann, V. Damrath, *Chemie in unserer Zeit* **1989**, 23 (3), 86.
- [392] M. Anton, M. Tausch, S. Krees, *Schulversuchskoffer CHEM2DO - Experimentieren mit Siliconen und Cyclodextrinen*, [http://www.wacker.com/cms/de/wacker\\_group/sustainability/corporate\\_citizenship/chem2do/chem2do.jsp](http://www.wacker.com/cms/de/wacker_group/sustainability/corporate_citizenship/chem2do/chem2do.jsp) **2012**.
- [393] V. Sokolova, M. Epple, *Chemie in unserer Zeit* **2012**, 46 (2), 76.
- [394] J. Venzmer, *Chemie in unserer Zeit* **2008**, 42 (2), 72-19.
- [395] S. Grigoras, T. H. Lane, in *Silicon-based polymer science: A comprehensive resource ; developed from the International Topical Workshop Advances in Silicon-Based Polymer Science ... Makaha, Oahu, Hawaii, November 21 - 24, 1987*, Vol. 224, Advances in chemistry series, Vol. 224 (Eds: J. M. Zeigler, F. W. G. Fearon), ACS. Washington, D.C. **1991**.
- [396] R. Schliebs, J. Ackermann, *Chemie in unserer Zeit* **1987**, 21 (4), 121.
- [397] F. Hoffmann, M. Cornelius, J. Morell, M. Fröba, *Angew. Chem.* **2006**, 118 (20), 3290.
- [398] C. Triantafillidis, M. S. Elsaesser, N. Husing, *Chemical Society reviews* **2013**, 42 (9), 3833.
- [399] B. Pietschmann, M. A. Weiß, T. Selvam, G. Sextl, in *Zeolites and Related Materials: 4th International FEZA Conference, 2-6 September 2008, Paris, France*, Vol. 174, Studies in Surface Science and Catalysis (Eds: A. Gedeon, P. Massiani, F. Babonneau), Elsevier Science. Burlington **2008**.
- [400] M. Lawrence, G. D. Rees, *Advanced Drug Delivery Reviews* **2000**, 45 (1), 89.
- [401] J. H. Burban, M. He, E. L. Cussler, *AIChE J.* **1995**, 41 (1), 159.
- [402] Schmidt, Helmut, Karl, *Chemie in unserer Zeit* **2001**, 35 (3), 176.
- [403] S. D. Sims, D. Walsh, S. Mann, *Advanced Materials* **1998**, 10 (2), 151.
- [404] B. Schneider, *Eigenschaften von PU-Schaum*, <http://www.hs-schaumstoff.com/informationen/technische-informationen/eigenschaften-von-pu-schaum.html> **ohne Datum**.
- [405] Polymer Science Learning Center, *Silicones*, <http://www.pslc.ws/mactest/silicone.htm> **2016**.
- [406] F. Weinhold, R. West, *Organometallics* **2011**, 30 (21), 5815.
- [407] S. Grigoras, in *Computational modeling of polymers*, Plastics engineering, Vol. 25 (Eds: J. Bicerano), Dekker. New York **1992**.



- [408] K. M. Kulinowski, in *Nanotechnology: Societal implications - II: individual perspectives* (Eds: M. C. Roco, W. S. Bainbridge), Springer, Dordrecht **2007**.
- [409] Georg-August-Universität Göttingen, *Modulbeschreibungen zum Modul B.Che.4102.Mp: Anorganisch-Chemisches Praktikum für Lehramtskandidaten*, <https://univz.uni-goettingen.de/qisserver/rds?state=verpublish&status=init&vmfile=no&moduleCall=PordDetail&publishConfFile=pord&publishSubDir=pord&keep=y&pord.pordnr=357281> **2016**.
- [410] M. Gröger, *MNU* **1999**, 52 (8), 466.
- [411] E. Terhart, *Perspektiven der Lehrerbildung in Deutschland*, Beltz, Landsberg **2000**.
- [412] Kultusministerkonferenz, *Dokumentation 209: Schüler, Klassen, Lehrer und Absolventen der Schulen 2005-2014*, <https://www.kmk.org/dokumentation-und-statistik/statistik/schulstatistik/schueler-klassen-lehrer-und-absolventen.html> **2015**.
- [413] Verein mathematisch-naturwissenschaftlicher Excellence-Center an Schulen e.V., *Befragung zum MINT-Lehrkräftemangel an MINT-EC-Schulen*, <https://dmv.mathematik.de/index.php/aktuell-presse/studien/k/428-mint-ec-erhebung-zum-mint-lehrermangel/file> **2014**.
- [414] T. Diehl, A. Richter, *Projekt EvaluNa: Projektkonzeption*, <https://www.ph-freiburg.de/berufs-und-wirtschaftspaedagogik/projekt-evaluna-lfbw/projektkonzeption.html> **2010**.
- [415] OECD, *Anwerbung, berufliche Entwicklung und Verbleib von qualifizierten Lehrerinnen und Lehrern: Länderbericht; Deutschland* **2004**.
- [416] K. S. Yoon et al., *Reviewing the Evidence On How Teacher Professional Development Affects Student Achievement*, Regional Educational Laboratory Program, S.I. **2007**.
- [417] H. Timperley, A. Wilson, H. Barrar, I. Fung, *Teacher professional learning and development: Best evidence synthesis iteration (BES)*, New Zealand **2007**.
- [418] J. Hattie, *Visible learning: A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*, 1st ed., Educational research, Routledge Taylor & Francis, London **2009**.
- [419] T. Diehl, A. Richter, *Projekt EvaluNa: Erste Ergebnisse der Längsschnittstudie*, Freiburg, <https://www.ph-freiburg.de/berufs-und-wirtschaftspaedagogik/projekt-evaluna-lfbw/erste-ergebnisse-der-laengsschnittstudie.html> **2012**.
- [420] T. Diehl, A. Richter, *Projekt EvaluNa*, Freiburg, <https://www.ph-freiburg.de/berufs-und-wirtschaftspaedagogik/projekt-evaluna-lfbw.html> **2011**.

- [421] F. Lipowsky, D. Rzejak, in *Reform der Lehrerbildung in Deutschland, Österreich und der Schweiz: Teil 1: Analysen, Perspektiven und Forschung*, Theorie und Praxis der Schulpädagogik, Vol. 4 (Eds: D. Bosse), Prolog-Verl. Immenhausen **2012**.
- [422] T. Bömer, M. Kunter, S. Hertel, *Veränderungsbereitschaft von Lehrkräften: Empirische Überprüfung eines kognitiv-affektiven Modells der Überzeugungsveränderung*, Fachgruppentagung Pädagogische Psychologie der DGPs, Erfurt **2009**.
- [423] T. P. Carpenter, *American Educational Research Journal* **1989**, 35 (4), 499.
- [424] F. Lipowsky, D. Rzejak, G. Dorst, *Pädagogik* **2011**, 63 (12), 38.
- [425] R. Gersten, J. Dimino, M. Jayanthi, J. S. Kim, L. E. Santoro, *American Educational Research Journal* **2010**, 47 (3), 694.
- [426] P. Woldt, M. Busch, P. Wlotzka, *Klein, kleiner, nano: Materialien für Projekte im Unterricht*, Aulis, [Hallbergmoos] **2012**.
- [427] W. Pöpping, I. Melle, *Reinigungsmittel - Säuren und Laugen im Alltag*, Lehrerfortbildung, Dortmund **2016**.
- [428] S. Schwarzer, K. Hickmann, I. Parchmann, *Nano-Schalter und molekulare Schalter als Lernschalter?*, Transfer Wissenschaft Schule, St. Peter-Ording **2012**.
- [429] R. Hempelmann, *Workshop Nanotechnologie im Schülerlabor*, 7. Lernort Labor Jahrestagung, Saarbrücken **2012**.
- [430] W. M. Heckl, P. Hix, *Lehrerfortbildung zum Thema "Nano"*, Lehrerfortbildung, München **2011**.
- [431] M. Herrmann, *Nanotechnologie: Visionen im Kleinen mit großer Zukunft - und unbedenklich?*, Lehrerfortbildung, Bad Wildbad.
- [432] Niedersächsisches Landesinstitut für schulische Qualitätsentwicklung, *Veranstaltungen sind in der Veranstaltungsdatenbank des Landes Niedersachsen*, <http://vedab.nibis.de/> **2016**.
- [433] H. G. Ebner, W. Müller, *Wirtschaft und Erziehung* **2000**, 52 (2), 62.
- [434] N. ter Horst, J. Dege, K. Wolf, T. Wilke, *Nano: Eine Dimension mit hohem didaktischen Potential für den Chemieunterricht*, Regionaler MNU-Nachmittag, Göttingen **2014**.
- [435] T. Wilke, E. Irmer, *Nanochemie und Katalyse: Eine Unterrichtseinheit im eA-Kurs Chemie*, Regionaler MNU-Nachmittag, Göttingen **2015**.
- [436] S. Nick, Z. Chomicz, *Chemkon* **2013**, 20 (1), 14.

- [437] L. Kampschulte et al., *Nanotechnologie in der Schule: Innovative Ansätze für den Chemieunterricht*, 31. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Kiel **2014**.
- [438] G. de Haan, in *Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung: Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde* (Eds: I. Bormann, G. de Haan), VS, Verl. für Sozialwiss. Wiesbaden **2008**.
- [439] *Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung: Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde*, 1st ed. (Eds: I. Bormann, G. de Haan), VS, Verl. für Sozialwiss., Wiesbaden **2008**.
- [440] M. Burmeister, F. Rauch, I. Eilks, *Chem. Educ. Res. Pract.* **2012**, 13 (2), 59.
- [441] I. Eilks, C. Hößle, D. Höttecke, J. Menthe, in *Der Klimawandel vor Gericht: Materialien für den Fach- und Projektunterricht* (Eds: I. Eilks et al.), Aulis-Verl. Köln **2011**.
- [442] *Der Klimawandel vor Gericht: Materialien für den Fach- und Projektunterricht* (Eds: I. Eilks et al.), Aulis-Verl., Köln **2011**.
- [443] Programm Transfer-21, „Qualitätsentwicklung BNE-Schulen“: Qualitätsfelder, Leitsätze, Kriterien, Berlin **2007**.
- [444] W. Rieß, *Bildung für nachhaltige Entwicklung: Theoretische Analysen und empirische Studien*, Internationale Hochschulschriften, Vol. 542, Waxmann, Münster [u.a.] **2010**.
- [445] R. Nonninger, J. Dege, T. Wilke, T. Waitz, in *Global Perspectives of Nanoscience and Engineering Education* (Eds: K. Winkelmann, B. Bhushan), Springer International Publishing. Cham **2016**.
- [446] J. Dege et al., *Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung: Experimentelle Zugänge für Schule und Schülerlabor*, 31. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Hannover **2016**.
- [447] I. Bösel, T. Wilke, T. Waitz, in *Conference proceedings: New Perspectives in Science Education 4th Conference edition, Florence, Italy, 20-21 March 2015*, Libreriauniversitaria.it. Padova **2015**.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Ausgaben des Bundes für Forschung und Entwicklung im Bereich Nanotechnologie in Millionen Euro <sup>[21]</sup> . Die Werte für 2014 und 2015 sind Soll-Werte. Die angegebenen Daten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung wurden für eine bessere Vergleichbarkeit inflationsbereinigt. ....	6
Abbildung 2 – Publikationen zum Thema „Nano“ in der Suchmaschine SciFinder. ....	7
Abbildung 3 – Verteilung der Anwendungsfelder nanotechnologischer Unternehmen <sup>[32]</sup> . Die blauen Balken markieren den Stand im Juli 2012, die roten Balken das Wachstum seit diesem Zeitpunkt bis Januar 2016. ....	8
Abbildung 4 – NANOTRUCK-Projekt des BMBF <sup>[46]</sup> .....	12
Abbildung 5 – NANOSHUTTLE-Projekt der Nanoinitiative Bayern <sup>[48]</sup> .....	13
Abbildung 6 – KLIICK!LABOR der Kieler Forschungswerkstatt am IPN Kiel <sup>[50]</sup> .....	14
Abbildung 7 – NanoSchoolBox <sup>[59]</sup> (links), NanoBoX <sup>[61]</sup> (Mitte) und Experimentierkoffer zur Nanotechnologie <sup>[56]</sup> (rechts) .....	15
Abbildung 8 – Vergleich der Struktur exemplarischer Studiengänge nach DEPPERT ET AL. <sup>[20]</sup> ; traditionelle Struktur (links), Aufbau, dem T Approach (Mitte) und Inverted T Approach (rechts) .....	18
Abbildung 9 – Grafische Übersicht der curricularen Implementierung von "Nano" in Deutschland. ....	22
Abbildung 10 – Triplet der Didaktischen Reduktion nach KATTMANN, DUIT, GROPEGIEßER und KOMOREK <sup>[87]</sup> . ....	26
Abbildung 11 – Iterative Abfolge der didaktischen Rekonstruktion von Nanotechnologie als gliedernde Struktur dieser Arbeit, basierend auf dem Modell der didaktischen Rekonstruktion <sup>[87]</sup> .....	27
Abbildung 12 – Morphologien von Nanomaterialien. 1) Nanopartikel, alle drei Dimensionen < 100 nm. 2) Nanofaser, zwei Dimensionen < 100 nm. 3) Nanoplättchen, eine Dimension < 100 nm. 4) Nanoporöses Material mit Porendurchmesser < 100 nm. 5) Bereich mit Abmessungen < 100 nm in einer größeren Struktur. ....	32
Abbildung 13 – Titandioxid- und Eisenoxid-Nanopartikel mit unterschiedlichen Morphologien <sup>[108]</sup> .....	33
Abbildung 14 – Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis und Gesamtoberfläche verschiedener Partikel mit unterschiedlicher Kantenlänge <sup>[61, 141]</sup> .....	34
Abbildung 15 – Vereinfachtes zweidimensionales Modell zur Illustration der Rolle der Oberfläche für Adsorption und Reaktivität unterschiedlich großer (Nano-)Partikel (siehe Kap. 7.1.1.3) <sup>[144]</sup> .....	35
Abbildung 16 – Fluoreszenz von Cadmiumselenid-Nanopartikeln mit unterschiedlichen Partikelgrößen zwischen 2 nm (links) und 8 nm (rechts) <sup>[108]</sup> .....	39
Abbildung 17 – Ausgewählte Beispiele für Strategien zur Synthese von Nanomaterialien und Möglichkeiten für deren Stabilisierung. ....	39
Abbildung 18 – Links: Prinzip der EUV-Lithografie (oben), sowie nanostrukturiertes Produkt (unten) <sup>[166]</sup> . Rechts: Selbstorganisation eines Dendrimers, modifiziert nach <sup>[167]</sup> .....	40
Abbildung 19 – Vereinfachtes Modell des Partikelwachstums zu dem Prozess der OSTWALD-Reifung, verändert nach <sup>[126]</sup> .....	41
Abbildung 20 – Stabilisierung von Nanopartikeln mit geladenen Dispersionsmitteln. Vereinfachte Darstellung der Sternschicht, GUOY-CHAPMANN-Doppelschicht und der repulsiven Wechselwirkungen. ....	42
Abbildung 21 – Tyndall-Effekt einer klaren, wässrigen Lösung eines Tensides .....	44
Abbildung 22 – a) Lotos-Effekt mit rasterelektronischer Aufnahme der Oberfläche eines Lotos-Blattes (Inset) <sup>[195]</sup> ; b) rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der nanostrukturierten "Haifischhaut" <sup>[193]</sup> ; c)	

rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von pilzkopfförmigen Haftstrukturen eines männlichen Blattkäfers (links) und des Gecko-Tapes (rechts), dessen Haftelemente denen des Käfers nachempfunden sind <sup>[194]</sup> .....	45
Abbildung 23 – Fluoreszenz-markierte Zellen mit Nanopartikeln: Blau dargestellt sind die Zellkerne, grün die Fluoreszenzmarkierung. Die Nanopartikel in den Zellen sind mit Pfeilen markiert (links). Die mittlere Abbildung zeigt ein Blutgefäß, das mit diesen Zellen (grün) besiedelt wurde. Rechts eine Detailaufnahme einer Gefäßwand mit Markierung des eingeschleusten Wirkstoffes (eNOS-Enzym) <sup>[199]</sup> .....	47
Abbildung 24 – Links: Sequenzielle Querschnitte (Abstand: 100 µm) eines mononuklearen Zellaggregates aus dem Rippenfell einer Maus, einen Tag nach der Exposition mit Carbon nanotubes (30 mg·m <sup>-3</sup> ). Färbemittel: Hematoxylin und Eosin, 40fache Vergrößerung. Insets zeigen Vergrößerungen (400fach). Rechts: Menschliche Lungenzellen (Zellkerne, grün) und Nanopartikel (rot) <sup>[209]</sup> .....	48
Abbildung 25 – Grafische Übersicht der Inhalte und Konzepte.....	56
Abbildung 26 – Selbsteinschätzung der fachspezifischen Vorkenntnisse zum Thema Nanotechnologie von SuS.64	
Abbildung 27 – Interesse der SuS an einer unterrichtlichen Behandlung des Themenfeldes Nanotechnologie in den Chemieunterricht.....	65
Abbildung 28 – Altersverteilung der befragten Lehrkräfte.....	70
Abbildung 29 – Vergleichende Einschätzung des Schülerinteresses durch die Lehrkräfte am allgemeinen naturwissenschaftlichen Unterricht und dem Themengebiet „Nano“.....	71
Abbildung 30 – Häufigkeit der unterrichtlichen Behandlung von "Nano". Reihe 1 (Nano "IST", oben) zeigt die Einschätzung, wie häufig "Nano" gegenwärtig vermittelt wird, Reihe 2 (Nano "SOLL", unten), wie häufig es vermittelt werden sollte.....	71
Abbildung 31 – Verwendetes Unterrichtsmaterial für die Vermittlung von "Nano" im eigenen Unterricht. ....	72
Abbildung 32 – Relevante Kompetenzbereiche für die Vermittlung von „Nano“.....	73
Abbildung 33 – Einschätzung eigener fachbezogener Kenntnisse.....	73
Abbildung 34 – Eingeschätzte Qualität und Ausstattung der schuleigenen Laborammlung für die Vermittlung von „Nano“.....	74
Abbildung 35 – Wahrgenommene größte Barrieren für die Integration des Themenbereiches "Nano" in den Unterricht.....	75
Abbildung 36 – Interesse an mehreren Möglichkeiten der Vermittlung von "Nano" im Chemieunterricht. ....	77
Abbildung 37 – Vorgehensweise und Gliederung der entwickelten Angebote. ....	82
Abbildung 38 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit. ....	85
Abbildung 39 – Nanomaterialien im Alltag.....	86
Abbildung 40 – Beispiele für Analogien zur Vorstellung eines Nanometers <sup>[245, 246]</sup> .....	86
Abbildung 41 – Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines menschlichen Haars und sphärischer Silica-Nanopartikel mit eingezeichneten <i>scale bars</i> . ....	87
Abbildung 42 – Einfaches Modellexperiment für eine mathematischen Erschließung des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses über die fortgesetzte Teilung eines Würfels.....	88
Abbildung 43 – Graph der ermittelten Funktion.....	89
Abbildung 44 – Vereinfachtes zweidimensionales Modell: Illustration der Bedeutung der Oberfläche verschiedener (Nano-)Partikel für die Adsorption und Reaktivität. ....	90
Abbildung 45 – Isolierung des mineralischen Filters; die Sonnencreme wird getrocknet, kalziniert, gewaschen, filtriert. Schließlich werden die verbleibenden anorganischen Bestandteile als weißes Pulver erhalten.....	91

Abbildung 46 – Nachweis von Titan-Ionen; Lösung der untersuchten Probe vor (links) und nach der Zugabe von Wasserstoffperoxid-Lösung (rechts).....	93
Abbildung 47 – Nachweise von Titan aus verschiedenen Alltagsprodukten (Vortrag MNU Bremerhaven 2013).....	94
Abbildung 48 – Standardmodell der heterogenen Photokatalyse an Metalloxid-Halbleiterkörnern ( $h\nu_{VB}^+$ : Elektronenfehlstelle im Valenzband, Elektronenakzeptor; $e_{LB}^-$ : Elektron im Leitungsband, Elektronendonator) nach WÖHRLE, TAUSCH und STOHRER <sup>[250]</sup> .....	96
Abbildung 49 – Experimenteller Aufbau für die photokatalytische Zersetzung von Methylenblau.....	98
Abbildung 50 – Ausgewählte Proben nach der Reaktion: BG 1 (links), BG 3 (mitte) sowie BG 4 (rechts). Da sich BG 2 und BG 4 nicht unterscheiden, wird BG 2 aus Platzgründen nicht aufgeführt.....	98
Abbildung 51 – Algenbewuchs auf einer unbeschichteten Fassade (links) und auf einer Fassade mit photokatalytisch aktiver Beschichtung (rechts).....	100
Abbildung 52 – Illustration des Wirkprinzips der photokatalytischen Reinigung von Abgasen mithilfe von UV-Licht und Titandioxid-Nanopartikeln eingebettet in eine Trägerkonstruktion (links); Fassade des <i>Hospital Manuel Gea Gonzales</i> als Beispielprojekt der Anwendung dieser Technologie (rechts) <sup>[256]</sup> .....	101
Abbildung 53 – Auftragen der TTIP-Lösung zur Erzeugung einer nanoskaligen Titandioxid-Schicht auf einem Objektträger.....	102
Abbildung 54 – Links: Resultat nach dem Besprühen des Objektträgers mit Wasser (links: beschichtet, rechts: unbeschichtet). Rechts: Modell zur Beschreibung der superhydrophilen Wirkung der nanoskaligen Titandioxid-Schicht.....	103
Abbildung 55 – Einfluss von Titandioxid-Nanopartikeln auf die Fermentation von Milch.....	105
Abbildung 56 – Screenshot des WebQuests (links) und Überblick über die behandelten Kontroversen (rechts). .....	107
Abbildung 57 – Anwendungen von Zinkoxid in Alltag, Wirt- und Wissenschaft; Beispiele sind etwa Kosmetika wie Sonnencreme <sup>[275]</sup> , günstige Solarzellen <sup>[276]</sup> sowie Gassensoren <sup>[277]</sup> mit Zinkoxid-Nanopartikeln oder auch Indium-Gallium-Zink-Oxid (IGZO), welches als aktive Schicht in Displays verwendet wird <sup>[278]</sup> .....	112
Abbildung 58 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.....	115
Abbildung 59 – Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln. Die Ausgangslösungen zeigen keine Fluoreszenz (links); sichtbare Fluoreszenz nach dem Vermengen der Lösungen (rechts).....	117
Abbildung 60 - Modell zur Deutung der Fluoreszenz von halbleitenden Zinkoxid-Nanopartikeln. 1. Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband in das Leitungsband mit UV-Licht. 2. Rekombination unter Emission von Fluoreszenz-Strahlung, verändert nach <sup>[168]</sup> .....	118
Abbildung 61 – Momentaufnahmen des Experiments zur Herstellung farbig fluoreszierender Zinkoxid-Nanopartikel.....	120
Abbildung 62 – Schematische Darstellung zum Zusammenhang zwischen Teilchengröße, Abstand zwischen den Energieniveaus und Energie bzw. Farbe der resultierenden Fluoreszenzstrahlung.....	121
Abbildung 63 – Experimente zur Verwendung von Zinkoxid Nanopartikel als UV-Filter.....	123
Abbildung 64 – Links: Eingedampfte Zinkoxid-Nanopartikel. Mitte: Cumarinlösung mit Zinkoxid-Nanopartikeln (linkes BG) und ohne (rechtes BG). Rechts: Filtrierte Lösungen unter UV-Licht.....	124
Abbildung 65 – Photokatalytische Entfärbung von Rote-Beete-Saft: fotografische Aufnahmen der Proben 1 – 4. .....	126
Abbildung 66 – Hydrolyse von Betanin zu Betanidin und Glucose.....	126

Abbildung 67 – Vereinfachtes Bändermodell zur Deutung der heterogenen Photokatalyse (rechts).....	127
Abbildung 68 – Eingelegte Zwiebelproben in Ethanol und in eine Zinkoxid-Nanopartikel-Dispersion(links); Abspülen der Zwiebelstücke unter fließendem Wasser (mitte); Zwiebelproben nach dem Abspülen unter UV-Licht (rechts).....	129
Abbildung 69 – Lichtmikroskop mit UV-Lampe und Zwiebelhäutchen (links). Lichtmikroskopische Betrachtung des in Zinkoxid-Nanopartikel-Dispersion eingelegten Zwiebelhäutchen (rechts). Das Inset zeigt einen vergrößerten Ausschnitt mit stärkerem Kontrast. ....	129
Abbildung 70 - Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit.....	138
Abbildung 71 – Nachweis von Zink-Ionen: Kaliumhexacyanidoferrat(III)-Lösung (links) und gelb-brauner Zinkhexacyanidoferrat(III)-Komplex (rechts). ....	139
Abbildung 72 – Schüler während der Bedienung des Pulverdiffraktometers (links); Identifizierung des verwendeten mineralischen Filters über den Vergleich der untersuchten Probe mit einem Referenzdiffraktogramm (mitte); beispielhafte Bestimmung der Halbwertsbreite aus dem Arbeitsblatt (rechts). ....	142
Abbildung 73 – REM-Aufnahmen der Titandioxid-Nanopartikel aus Sonnencreme. Mithilfe des Größenmaßstabs kann die Partikelgröße bestimmt werden.....	143
Abbildung 74 – Schematische Darstellung der ablaufenden Prozesse während der Energieumwandlung (modifiziertes Modell nach O'REGAN und GRÄTZEL <sup>[190]</sup> ).....	145
Abbildung 75 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit. ....	154
Abbildung 76 – Links: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines mesoporösen Silicas. Rechts: Schema der Porenfüllung von mesoporösem Silica mit Mangan(II)nitrat-Lösung bzw. Braunstein. ....	155
Abbildung 77 – Versuchsaufbau zum Vergleich der Katalyseleistung von Braunstein und Braunstein@Silica...	156
Abbildung 78 – Recherche-Map zum Thema Bisphenol A. ....	158
Abbildung 79 – Strukturformeln von Bisphenol A sowie weiterer organischer Verbindungen. ....	159
Abbildung 80 – Experimenteller Aufbau für die photokatalytische Zersetzung von Methylenblau. ....	160
Abbildung 81 – Schema zur photokatalytischen Zersetzung eines organischen Stoffes. ....	161
Abbildung 82 – UV-VIS-Spektren von Bisphenol A zu verschiedenen Zeiten: links: t = 0, Mitte: t = 125 Minuten, rechts: t = 345 Minuten. ....	161
Abbildung 83 – Struktur und ausgewählte Inhalte der Unterrichtseinheit. ....	170
Abbildung 84 – Links: Versuchsaufbau zur Herstellung von Zinkoxid-Nanopartikeln; Mitte: Fluoreszenz von Zinkoxid-Nanopartikeln unter UV-Licht. Rechts: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Zinkoxidpartikeln nach einer Woche Kristallwachstum.....	173
Abbildung 85 – VIS-Spektrum einer Methylenblau-Lösung zu verschiedenen Messzeitpunkten während des photokatalytischen Abbaus.....	174
Abbildung 86 – Links: Präparation der Probe mit Silber-Nanopartikeln. Rechts: Probe (links) und mit Silber- Nanopartikeln behandelte Probe (rechts) nach vier Tagen. ....	177
Abbildung 87 – Schematischer Aufbau eines Leidenfrost-Tropfens.....	180
Abbildung 88 – Ein durch eine Nadel in Position gehaltener Wassertropfen trifft auf eine 250 °C heiße Oberfläche aus Aluminium <sup>[342]</sup> . ....	180
Abbildung 89 – Temperaturprofil eines erhitzten Wassertropfens.....	181

Abbildung 90 – Links: Vereinfachter Aufbau zur Beobachtung von Benetzungsverhalten und Kontaktzone eines Leidenfrost-Tropfens auf einer heißen Oberfläche; Rechts: Kontaktwinkelmessung an einem solchen Wassertropfen.....	182
Abbildung 91 – Farbumschlag des Indikators bei fortschreitender Verweildauer auf der Aluminiumplatte auf Leidenfrost-Temperatur.....	184
Abbildung 92 – Reversibilität der Farbreaktion durch Zugabe von verdünnter Schwefelsäure.....	184
Abbildung 93 – Vereinfachte schematische Darstellung der Ionisierung und Ladungsverteilung in einem Leidenfrost-Tropfen unter Berücksichtigung der Reaktionspartner.....	185
Abbildung 94 – Leidenfrost-Synthese von Zinkoxid-Nanopartikeln.....	186
Abbildung 95 – Reaktionsstadien der Gold-Nanopartikel und des Goldes im Leidenfrost-Tropfen.....	189
Abbildung 96 – Entnahme und Rückführung der Gold-Nanopartikeldispersion. ....	190
Abbildung 97 – Im Leidenfrost-Reaktor synthetisierte Gold-Nanopartikel. Illustrierter Übergang von der submikroskopischen Ebene (Gold-Ionen, links außen) über die Mesoebene (Gold-Nanopartikel, mitte) bis hin zur Stoffebene (ausgefallenes Gold, rechts).....	190
Abbildung 98 – Isoliertes Gold am Ende der Reaktion im Leidenfrost-Reaktor auf einem Baumwolltuch.....	191
Abbildung 99 – Schematische Darstellung der Reaktionsbedingungen im Leidenfrost-Reaktor. ....	192
Abbildung 100 - Gesamtstruktur des Kurses und ausgewählte Inhalte der einzelnen Kurstage.....	196
Abbildung 101 – Foto von porösem Silica-Pulver (oben) und elektronenmikroskopische Aufnahme poröser Silica-Partikel (unten): links entlang der Porenachse, rechts senkrecht zur Porenachse. ....	198
Abbildung 102 – Prinzip des Abgussverfahrens am Beispiel der Herstellung eines Zahnradabdrucks. ....	199
Abbildung 103 – Schematische Darstellung des Templatverfahrens zur Herstellung mesoporöser Silica.....	200
Abbildung 104 – a) Idealisierte basenkatalysierte Hydrolyse von TEOS. b) Basenkatalysierte Kondensation von Kieselsäure.....	201
Abbildung 105 – Modell eines porösen Silica-Partikels mit amorpher Wand.....	201
Abbildung 106 – Aufbau einer einfachen Sorptionsapparatur.....	202
Abbildung 107 – <i>pV</i> -Diagramm der Adsorption von Luft an poröses und unporöses Silica.....	203
Abbildung 108 – Modell für die Adsorption von Gasen an unporöse (links) und poröse (rechts) Silica-Partikel. ....	204
Abbildung 109 – Versuchsaufbau zur Messung der katalytischen Aktivität bei der Zersetzung bei der Zersetzung von Wasserstoffperoxid mit Braunstein („Bulk“) und Braunstein in porösem Silica-Trägermaterial.....	205
Abbildung 110 – <i>pt</i> -Diagramm der katalysierten Zersetzung von Wasserstoffperoxid an porösem und unporösem Silica. ....	205
Abbildung 111 – Schematische Illustration des Nanocastings (Hard-Matter-Templating).....	209
Abbildung 112 – Synthese von SBA-15-Silica; a) Lösen des P-123 Blockcopolymers (Inset: Tyndall-Effekt); b) nach Zugabe von TEOS; c) Hydrothermalbehandlung; d) Filtration; e) Kalzinierung; f) Produkt.....	210
Abbildung 113 – Synthese des nanoporösen Metalloxides via Nanocasting; a) Dispergieren des Metalloxid-Präkursors; b) Imprägnieren des Präkursors in die SBA-15 Silica-Matrix; c) Trocknen; d) Kalzinierung; e) Entfernen der Silica-Matrix; f) Produkt.....	211
Abbildung 114 – Elektronenmikroskopische Aufnahmen von mesoporösem Eisenoxid (links), Manganoxid (Mitte) und Aluminiumoxid (rechts).....	212



Abbildung 115 – Versuchsaufbau zur Messung der katalytischen Aktivität bei der Zersetzung von Butan mit nanoporösem Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> und Bulk-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . .....	213
Abbildung 116 – <i>cT</i> -Diagramm der katalytischen Zersetzung von Butan durch nanoporöses Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> im Vergleich zu unporösem Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Bulk) und der unkatalysierten Zersetzung. ....	214
Abbildung 117 – Herstellung eines Gassensors; a) Dispergieren des nanoporösen Metalloxides; b) Drop Coating des Sensorsubstrates; c) Funktionsfähiger Sensor. ....	215
Abbildung 118 – Einfache Gassensorik-Messapparatur: a) Messung des Ausgangswiderstands; b) reduzierter Widerstand bei der Messung von Ethanol; c) Schaltkreis des Versuchsaufbaus; d) Sammeln von Ethanol und Ozon. ....	216
Abbildung 119 – Vereinfachter Mechanismus des Ionosorptionsmodells für einen Halbleiter. Oxidierende Gase senken die Leitfähigkeit (links), reduzierende erhöhen sie (rechts). ....	217
Abbildung 120 – Übersicht von Aufbau und Eigenschaften mono-, di-, tri- und tetrafunktionaler Silikone. Die Funktionalitäten sind rot eingefärbt. Abbildung modifiziert in Anlehnung an SCHLIEBS ET AL. <sup>[396]</sup> . ....	220
Abbildung 121 - Schematische Darstellung der zwei Phasen einer Mikroemulsion (links). Aufbau des Zweiphasengebiets auf Teilchenebene mit einfachem Modell zur Bildung des Silikons (rechts). ....	222
Abbildung 122 – Poröser Silikonschwamm (links) mit REM-Aufnahme des kanalartigen Netzwerkes (rechts). Die hellen Bereiche repräsentieren Poren mit einem Durchmesser im Bereich von ca. 100 – 200 nm. ....	222
Abbildung 123 – Synthese eines Silikons mit und ohne Tensid (links) und den jeweils erhaltenen Produkten. ....	224
Abbildung 124 – Reaktionsschema der basenkatalysierten Hydrolyse und Kondensation der Alkoxysilane DMDMS und TMMS bei der Bildung eines (porösen) Silikonschwamms. ....	225
Abbildung 125 – Demonstration der hydrophoben Eigenschaften des Silikons am Beispiel von eingefärbtem Wasser (links) und n-Heptan (rechts). ....	226
Abbildung 126 – Temperaturbeständigkeit des Silikons bei hohen Temperaturen im Vergleich zu einem Haushaltsschwamm nach einer Erhitzungsdauer von 5 (a), 15 (b) und 35 Sekunden (c). ....	227
Abbildung 127 – Silikonschwamm in Flüssigstickstoff (links) und anschließender Flexibilitätstest (rechts). ....	228
Abbildung 128 – Öffnung und Schließung des Si-O-Winkels bei Silikonpolymeren. ....	229
Abbildung 129 – Untersuchung der Gasadsorption poröser Silikonschwämme. Abfüllen des Gases (oben links), Aufleiten des Gases auf die porösen Schwämme (oben rechts), Entnahme des gespeicherten Gases durch Erzeugung eines Unterdrucks (unten links), Nachweis des Gases über die Brennbarkeit (unten rechts). ....	230
Abbildung 130 – Aufleiten des Gases auf die Silikonschwämme (links), gravimetrische Bestimmung der Gasspeicherung (rechts). ....	231
Abbildung 131 – Zeitlicher Verlauf der in den Silikonschwämmen gespeicherten Masse an Feuerzeuggas im Vergleich zu unporösem Silikon und einem Haushaltsschwamm. Es wurden jeweils vier Schwämme mit einem Gesamtvolumen von insgesamt etwa 100 cm <sup>3</sup> verwendet. ....	232
Abbildung 132 - Beispiel einer Recherche-Map zu porösen Materialien und ihren Synthesekonzepten. ....	233
Abbildung 133 – Benötigte Materialien für die Durchführung der Experimente. ....	244

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 – Ausgewählte Themenfelder des NANOTRUCKS.....	12
Tabelle 2 – Anzahl an eigenständigen Nano-Studiengängen sowie Anzahl an Fachhochschulen und Universitäten, die nanotechnologische Inhalte in Vorlesungen oder Seminaren anbieten. Die Darstellung erfolgt pro Bundesland. Für die Länderkürzel siehe Abkürzungsverzeichnis. Der Datensatz basiert auf Angaben des VDI Technologiezentrums, gefördert vom BMBF <sup>[65]</sup> .....	17
Tabelle 3 – Übersicht der Nano-Inhalte in Curricula und Lehr- bzw. Bildungsplänen verschiedener Bundesländer (Stand: Juli 2016).....	20
Tabelle 4 – Geänderte Sichtweise beim Übergang zur Nanoskala <sup>[146]</sup> .....	35
Tabelle 5 – Auswahl der Charakterisierungsmethoden von Nanomaterialien <sup>[99]</sup> .....	43
Tabelle 6 – Grundlegende Konzepte für die Vermittlung von „Nano“. Essentielle Aspekte sind dabei fett markiert, darüber hinaus sind vertiefende Aspekte aufgeführt.....	52
Tabelle 7 – Vergleich der ermittelten Sachstruktur mit den "Big Ideas of Nanoscale Science" <sup>[3]</sup> .....	54
Tabelle 8 – Häufigkeiten genannter bzw. vermuteter Anwendungen von Nanotechnologie in verschiedenen Jahrgängen.....	61
Tabelle 9 – Übersicht der ermittelten Lernerperspektiven und Schlussfolgerungen mit Zitaten von SuS.....	67
Tabelle 10 – Gegenüberstellung der ermittelten Konzepte und Lernerperspektiven.....	79
Tabelle 11 – Ausschnitt eines Arbeitsblattes mit strukturierter Lernhilfe für die Berechnung der Gesamtoberfläche und Ermittlung einer Formel zur Beschreibung derselben. Die von den SuS auszufüllenden Felder sind grau hinterlegt.....	88
Tabelle 12 – Strukturierte Lernhilfe mit Musterlösung zur Auswertung der photokatalytischen Zersetzung von Methylenblau (ME, Experiment 1.3). Die von den SuS einzutragenden Felder sind dunkelgrau hinterlegt; sollen die Bedingungen für eine Photokatalyse von den Lernenden selbstständig ermitteln werden, können auch die hellgrau hinterlegten Felder frei gelassen werden.....	99
Tabelle 13 – Ausgewählte Schlussfolgerungen der Evaluation und Zitate.....	109
Tabelle 14 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 1.....	111
Tabelle 15 – Zusammensetzung der Proben für das Photokatalyse-Experiment.....	125
Tabelle 16 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.....	131
Tabelle 17 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 2.....	135
Tabelle 18 – Röntgendaten von Titandioxid-Nanopartikeln aus Sonnencreme und einer Referenzprobe.....	142
Tabelle 19 – Exemplarische Messwerte der Zusammensetzung einer Beispielprobe aus Sonnencreme.....	144
Tabelle 20 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.....	147
Tabelle 21 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 3.....	150
Tabelle 22 – Musterlösung der Tabelle zur Ermittlungen der notwendigen experimentellen Bedingungen für die Photokatalyse (MB = Methylenblau).....	159
Tabelle 23 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.....	163
Tabelle 24 – „Nano“-Inhalte und curriculare Anbindung von Projekt 4.....	166
Tabelle 25 – Beispiel einer photometrischen Messung; verschiedene Absorptionswerte.....	175
Tabelle 26 – Charakterisierung der via Nanocasting hergestellten Metalloxide.....	212
Tabelle 27 – Übersicht ausgewählter Ergebnisse und Zitate der Evaluation.....	239

---

Tabelle 28 – Überblick über die Lehrerfortbildung zum Thema „Nano – Eine Dimension mit hohem didaktischen Potenzial für den Chemieunterricht“.....	245
Tabelle 29 – Überblick über die Lehrerfortbildung zum Thema “Nanochemie und Katalyse“ .....	247
Tabelle 30 – Überblick über die Lehrerfortbildung zum Thema „Nanotechnologie in der Schule: Innovative Ansätze für den Chemieunterricht“.....	249
Tabelle 31 – Überblick die geplante Lehrerfortbildung zum Thema „Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung - Experimentelle Zugänge für Schule und Schülerlabor“.....	252

---

## CURRICULUM VITAE

Timm Wilke

geboren am 29. Mai 1988 in Brüssel, Belgien

Staatsangehörigkeiten: Deutsch und Luxemburgisch

### AUSBILDUNG

---

- 09/12 – heute     **Georg-August-Universität Göttingen**  
Promotionsstudium (Dr. rer. nat.), Abteilung für Fachdidaktik Chemie (PROF. DR. T. WAITZ). Thema: „*Konzeptualisierung des Themas ‚Nano‘ für den Chemieunterricht*“.
- 10/10 – 08/12     **Georg-August-Universität Göttingen**  
Master of Education. Abschluss mit Auszeichnung (Note 1,3). Masterarbeit (Abteilung für Fachdidaktik Chemie): „*Entwicklung von Experimenten zum Thema Nanotechnologie für den Chemieunterricht*.“ (Note: 1,0).
- 10/07 – 10/10     **Georg-August-Universität Göttingen**  
Bachelor of Arts (Profil Lehramt für Gymnasien) mit den Fächern Chemie und Französisch in 5 Fachsemestern (Note 1,8).  
  
ERASMUS-Auslandssemester (09/09 - 02/10) und Forschungsaufenthalt am CNRS, Toulouse/Frankreich (PROF. DR. H. GORNITZKA, DR. G. LAVIGNE und PROF. DR. D. STALKE).  
  
Bachelorarbeit (Institut für Anorganische Chemie, PROF. DR. D. STALKE): „*Einfluss verbrückter Bis-Carbenliganden auf metallophile Kupfer-Kupfer-Wechselwirkungen*.“ (Note: 1,0).
- 07/07             **Ubbo-Emmius-Gymnasium, Leer**  
Allgemeine Hochschulreife

### BERUFLICHER WERDEGANG

---

- 02/16 – 07/16     **Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN) Kiel**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Didaktik der Chemie (PROF. DR. I. PARCHMANN). Mitarbeit im Schülerlabor klick! und im Teilprojekt Öffentlichkeitsarbeit des SFB 677 („Funktion durch Schalten“).
- 06/15 - 07/15     **Florida Institute of Technology, Melbourne, FL/USA.**

Gastwissenschaftler, Chemistry Department (PROF. DR. K. WINKELMANN)

10/12 – 01/15 **Universitätsmedizin Göttingen**  
Dozent für allgemeine und anorganische Chemie

09/12 – heute **Georg-August-Universität Göttingen**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Abteilung Fachdidaktik Chemie (PROF. DR. T. WAITZ)

#### LEHRERFAHRUNGEN

---

10/12 – 01/15 Dozent für allgemeine und anorganische Chemie an der Universitätsmedizin Göttingen.

09/12 – 09/15 Regelmäßige Betreuung des Schulversuchspraktikums für Lehramtskandidaten im Master of Education (seit 2013 Praktikumsleitung).

01/12 – 09/12 Betreuung von Lehrerfortbildung (2) an der Georg-August-Universität Göttingen

09/10 – 01/16 Regelmäßige Betreuung des Anorganisch-Chemischen Grundpraktikums für Lehramtskandidaten (seit 2013 Praktikumsleitung).

#### QUALIFIKATIONSARBEITEN

---

08/12 – heute Mitarbeit bei der Betreuung von Masterarbeiten (7), Bachelorarbeiten (10), Facharbeiten (4) und weiteren schulische Projektarbeiten.

#### STIPENDIEN UND AUSZEICHNUNGEN (AUSWAHL)

---

2013 – 2016 Promotionsstipendium der STIFTUNG DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT (sdw); Aufnahme in das STUDIENKOLLEG (Begabtenförderungsprogramm für Lehramtsstudierende).

2013 Auszeichnung des Posterbeitrages „Experimente mit Silica-Nanomaterialien zum Spitzenposter durch die Jury der GESELLSCHAFT DEUTSCHER CHEMIKER.

2012 Förderung des Promotionsvorhabens durch das NIEDERSÄCHSISCHE MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT UND KULTUR.

2012 Stipendium für Lehramtskandidaten des FONDS DER CHEMISCHEN INDUSTRIE zur Förderung der Masterarbeit.

#### SONSTIGE TÄTIGKEITEN

---

09/15 – heute Idee, Konzeption und Entwicklung einer Plattform ([www.fachdidaktik-chemie.de](http://www.fachdidaktik-chemie.de)) zur Vernetzung des wiss. Nachwuchses der GDCh Fachgruppe Chemieunterricht.

- 02/13 – heute Idee, Konzeption und Entwicklung einer *Open Educational Resources*-Plattform ([www.unterrichtsmaterialien-chemie.de](http://www.unterrichtsmaterialien-chemie.de)) für den Einsatz in der universitären Lehre mit aktuell knapp 2.000 Experimenten und Unterrichtsmaterialien.
- 05/12 – heute Mitgestaltung und Durchführung diverser extracurricularer universitärer Veranstaltungen (u.a. Science Slam, Kinder-Universität, Nacht der Wissenschaften, Summer Schools, Collegium cellense - Kinderakademie Celle).

#### **MITGLIEDSCHAFTEN**

---

- Gesellschaft Deutscher Chemiker, e.V. (GDCh), Fachgruppe Chemieunterricht
- Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e.V. (MNU)

---

## PUBLIKATIONSVERZEICHNIS

### BUCHKAPITEL

---

- R. Nonninger, J. Dege, **T. Wilke**, T. Waitz (2016): Nanoscience Education in School Chemistry – Perspectives for Curricular Innovations in Context of an Education for a Sustainable Development in: Global Perspectives of Nanoscience and Engineering Education (ISBN 978-3-319-31833-2), herausgegeben von K. Winkelmann und B. Bhushan, Springer International Publishing, Cham, S. 237-274.

### ZEITSCHRIFTENBEITRÄGE

---

- **T. Wilke**, S. Haffer, I. E. von Hoff & T. Waitz: Farbig fluoreszierende Zinkoxid-Nanopartikel, *CHEMKON*, (in Vorbereitung).
- S. Schwarzer, R. Abdelaziz, M. Elbahri & **T. Wilke**: Wenn ein Wassertropfen zum Nanolabor wird – Gold aus dem Tropfenreaktor, *CHEMKON*, (angenommen).
- J. Dege, T. Waitz, S. Haffer, V. Pietzner, R. Abu-Much, M. Hugerat & **T. Wilke** (2016): Titanium Dioxide Nanoparticles – A Teaching Course Model for School Chemistry Education, *J. Nano. Educ.*, 1 (8), S. 1-11.
- **T. Wilke** & T. Waitz (2016): Funktionserweiterung durch Porosität - Herstellung und Eigenschaften eines porösen Silikonschwamms, *CHEMKON*, 1 (23), S. 7-13.
- S. Schwarzer, **T. Wilke**, R. Abdelaziz & M. Elbahri (2015): Wenn ein Wassertropfen zum schwebenden „Nano-Reaktor“ wird - Einsatz eines Leidenfrost-Tropfens zur Darstellung und Untersuchung von Nanopartikeln. *PdN-ChiS*, 4 (64), S. 23-27.
- **T. Wilke**, K. Wolf, A. Steinkuhle & T. Waitz (2015): Experimente mit fluoreszierenden Zinkoxid-Nanopartikeln, *PdN-ChiS*, 4 (64), S. 28-31.
- J. Dege, T. Waitz & **T. Wilke** (2015): Von der Sonnencreme zur Solarzelle - Ein Unterrichtsprojekt über Titandioxid-Nanopartikel verbindet Schule und Universität, *PdN-ChiS*, 4 (64), S. 32-36.
- K. Artelt, F. Kutteroff, **T. Wilke**, T. Waitz & A. Habekost (2015): Von der Bisphenol-A-Problematik zur Photokatalyse - Ein Vorschlag zur Einführung photokatalytischer Reaktionen an Titandioxid im Chemieunterricht, *PdN-ChiS*, 1 (64), S. 25-28.
- B. Heuer gen. Hallmann, E. Irmer, **T. Wilke** & Thomas Waitz (2014): Ein WebQuest zum Thema Alkalimetalle - angeleitet Informationen suchen, strukturieren, reflektieren und präsentieren, *PdN-ChiS*, 3 (63), S. 20-24.
- **T. Wilke**, S. Haffer, C. Weinberger, M. Tiemann, T. Wagner & T. Waitz (2013): Nanoporous Materials - Synthesis Concepts and Model Experiments for School Chemistry Education, *J. Nano. Educ.* 6 (2), 117-123.
- **T. Wilke**, S. Haffer, M. Tiemann & T. Waitz (2012): Mesoporöse Silica – Ein Beispiel für moderne poröse Funktionsmaterialien, *CHEMKON* (19), S. 67–72.

---

**BERICHTE UND KURZFASSUNGEN**

---

- **T. Wilke**, N. ter Horst & T. Waitz (2015): Experiments with Fluorescent Zinc Oxide Nanoparticles: A Teaching Course Design for Upper Secondary Chemistry Class. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2015* (ISBN 978-88-6292-600-3), *Libreriauniversitatia.it*, S. 112-116.
- N. ter Horst, **T. Wilke** & T. Waitz (2015): A Guided Learning Introductory Course on Nanotechnology for Secondary Schools. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2015* (ISBN 978-88-6292-600-3), *Libreriauniversitatia.it*, S. 173-178.
- E. von Hoff, **T. Wilke** & T. Waitz (2015): From Silica to Silicones: A Course Design Introducing Basic Concepts of Material Science into High School Chemistry Class. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2015* (ISBN 978-88-6292-600-3), *Libreriauniversitatia.it*, S. 123-127.
- Bösel, **T. Wilke** & T. Waitz (2015): School Experiments on the Biototoxicity of Metal and Metal Oxide Nanoparticles. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2015* (ISBN 978-88-6292-600-3), *Libreriauniversitatia.it*, S. 137-142.
- J. Dege, **T. Wilke**, A. Pflugmacher & T. Waitz (2015): Silica Aerogels: Synthesis and Experiments of a Fascinating Material for Upper Secondary School Level. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2015* (ISBN 978-88-6292-600-3), *Libreriauniversitatia.it*, S. 148-152.
- **T. Wilke** & T. Waitz (2014): 'Nano' – An Attractive Dimension for School Chemistry Education. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2014*, *Libreriauniversitatia.it*, S. 82-86.
- **T. Wilke**, S. Haffer & T. Waitz (2014): Silica-Based Nanomaterials in Chemistry Education. *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2014*, *Libreriauniversitatia.it*, S. 87-92.
- **T. Wilke**, S. Gerke & T. Waitz (2013): Kleine Würfel, große Oberflächen – Ein Modell-experiment, *MINTZirkel*, 2 (3), S. 8-9.
- **T. Wilke**, B. Niepötter & T. Waitz (2013): Nanosilver in Chemistry Class – A Web Inquiry Project, *New Perspective for Science Education, Conference Proceedings 2013*, *Libreriauniversitatia.it*, S. 57-61.
- **T. Wilke** & T. Waitz (2012): Small Particles - Big Impact; Nanomaterials in Chemistry Class. In: Pixel (Hg.): *New Perspectives in Science Education 2012*, *Libreriauniversitatia.it*, S. 105-109.

---

**VORTRÄGE**

---

- **T. Wilke** & S. Schwarzer: Erstaunliches auf der Oberfläche: Von der Wasserstrahlreflexion bis zum Leidenfrost-Reaktor (33. *GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Hannover, 2016*).
- **T. Wilke**, T. Waitz & E. Irmer: Nanochemie und Katalyse – eine Unterrichtseinheit im eA-Kurs Chemie (62. *MNU Bezirkstagung Bremerhaven, 2015*).



- **T. Wilke**, J. Dege & T. Waitz: Spektakuläres aus der Chemie – Chemische Reaktionen mit Licht! (Experimentalvortrag anlässlich des Tages der Chemie an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2015).
- **T. Wilke** & T. Waitz: Von der Sonnencreme zur Solarzelle - Ein Schule-Hochschule-Unterrichtsprojekt über Titandioxid-Nanopartikel (*GDCh Wissenschaftsforum Chemie, Dresden, 2015*).
- **T. Wilke** & T. Waitz: Experiments with Fluorescent Zinc Oxide Nanoparticles: A Teaching Course Design for Upper Secondary Chemistry Class (*New Perspectives in Science Education, Florenz, 2015*)
- J. Dege, E. Irmer, N. ter Horst & T. Waitz, **T. Wilke**: Vom Tensid zur Biomembran - Ein Public Outreach Projekt zur Verbindung von Schule und Universität (*61. MNU Bezirkstagung Bremerhaven, 2014*).
- **T. Wilke** & T. Waitz: Zinkoxid-Nanopartikel – Fluoreszierend, Faszinierend, Innovierend (*31. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Kiel 2014*).
- **T. Wilke**, E. Irmer, K. Wolf & T. Waitz: "NANO" – eine Dimension mit hohem didaktischen Potenzial für den Chemieunterricht (*MNU Kassel, 2014*).
- **T. Wilke**: Zinkoxid-Nanopartikel (Nano erleben – (Schüler)Wettbewerb zur Nanotechnologie, Kiel, 2014).
- **T. Wilke** & T. Waitz: 'NANO' – An Attractive Dimension for School Chemistry Education (*New Perspectives in Science Education, Florenz, 2014*).
- **T. Wilke**, E. Irmer, K. Wolf & T. Waitz: „Nano“ – Eine faszinierende Dimension für den Chemieunterricht (*60. MNU Bezirkstagung Bremerhaven, 2013*).
- T. Waitz & **T. Wilke**: „Nano“ im Schülerlabor und AG-Bereich (*GDCh Wissenschaftsforum Chemie, Darmstadt, 2013*).
- E. Irmer, **T. Wilke**, K. Wolf & T. Waitz: Von chemischen Chamäleons und magnetisierbaren Salzen – Neues aus der Komplexchemie (*59. MNU Bezirkstagung Bremerhaven, 2012*).

#### WORKSHOPS UND LEHRERFORTBILDUNGEN

---

- J. Dege, J. Menthe, I. Parchmann, V. Pietzner, S. Schwarzer, T. Waitz & **T. Wilke**: Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung: Experimentelle Zugänge für Schule und Schülerlabor (*Workshop: 33. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Hannover, 2016*).
- S. Schwarzer, I. Stamer, **T. Wilke** & G. Stein: Neue experimentelle Ansätze aus dem Themengebiet Datenverarbeitung, Funktionsmaterialien und Nanotechnologie für den naturwissenschaftlichen Unterricht (*Lehrerfortbildung: Transfer Wissenschaft Schule, Kiel, 2016*).
- **T. Wilke** & E. Irmer: Nanochemie und Katalyse – eine Unterrichtseinheit im eA-Kurs Chemie (*Regionaler MNU-Nachmittag Göttingen, 2015*).

- S. Schwarzer, L. Kampschulte, J. Menthe, T. Waitz & **T. Wilke**: Nanotechnologie in der Schule: Innovative Ansätze für den Chemieunterricht (*Workshop: 31. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Kiel 2014*).
- N. ter Horst, J. Dege, K. Wolf & **T. Wilke**: Nano – Eine Dimension mit hohem didaktischen Potential für den Chemieunterricht (*Regionaler MNU-Nachmittag Göttingen, 2014*).
- **T. Wilke**, K. Wolf & T. Waitz: Chemische Bindung (Lehrerfortbildung, Georg-August-Universität Göttingen, 2012).
- E. Irmer, **T. Wilke**, K. Wolf & T. Waitz: Vom Protein zur Aminosäure (*Lehrerfortbildung, Georg-August-Universität Göttingen, 2012*).

#### POSTERBEITRÄGE

---

- **T. Wilke**, B. Drabent, E.-M. Neher, T. Waitz: Nanotechnologie – ein experimentelles Kursdesign für das XLAB-Schülerlabor (*11. Lernort Labor Jahrestagung, Saarbrücken 2016*).
- J. Dege, **T. Wilke** & T. Waitz: Silica Aerogels: Synthesis and Experiments of a Fascinating Material for Upper Secondary School Level (*New Perspective for Science Education, Florenz 2015*).
- N. ter Horst, **T. Wilke** & T. Waitz: A Guided Learning Introductory Course on Nanotechnology for Secondary Schools (*New Perspective for Science Education, Florenz 2015*).
- Bösel, **T. Wilke** & T. Waitz: School Experiments on the Biototoxicity of Metal and Metal Oxide Nanoparticles (*New Perspective for Science Education, Florenz 2015*).
- E. von Hoff, **T. Wilke** & T. Waitz: From Silica to Silicones: A Course Design Introducing Basic Concepts of Material Science into High School Chemistry Class (*New Perspective for Science Education, Florenz 2015*).
- J. Dege, **T. Wilke** & T. Waitz: Funktionserweiterung durch Porosität: Herstellung und Eigenschaften eines porösen Silikonschwamms (*31. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Kiel 2014*).
- J. Schakowske, **T. Wilke** & T. Waitz: Von der Sonnencreme zur Solarzelle – ein Projekt zur Öffentlichkeitsarbeit zur Verbindung von Schule und Universität (*31. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Kiel 2014*).
- **T. Wilke**, B. Niepötter & T. Waitz: Nanosilver in Chemistry Class – A Web Inquiry Project (*New Perspective for Science Education, Florenz 2013*).
- **T. Wilke** & T. Waitz: Mesoporöse Silica - Moderne Funktionsmaterialien im Chemieunterricht (*30. GDCh Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht, Kiel 2012*).
- **T. Wilke** & T. Waitz: Small Particles – Big Impact Nanomaterials in Chemistry Class (*New Perspective for Science Education, Florenz 2012*).
- **T. Wilke**, B. Niepötter & T. Waitz: E-Learning: Virtuelle Vorbereitung auf fachdidaktische Laborpraktika (*11. Europäischer Chemielehrer/-innenkongress Klagenfurt, 2011*).

---

**SONSTIGES**

---

- **T. Wilke** & J. Dege: Chemische Kabinettstücke (*Science Slam, Universität Göttingen, 2015*).
- T. Waitz, **T. Wilke** & H.-G. Schmidt: Vom Brand zur Explosion: Spannende chemische Experimente aus dem Labor und aus dem Alltag (*Kinder-Universität Göttingen, 2014*).
- **T. Wilke** & T. Waitz: Eine Reise mit dem Chemie-Express um die Welt – Chemische Experimente (*Collegium Cellense – Kinderakademie, Celle, 2014*).
- T. Waitz, **T. Wilke** & H.-G. Schmidt: Chemie querbeet – Eine Reise durch das Periodensystem der Elemente (*Kinder-Universität Göttingen, 2013*).

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass die Arbeit mit dem Titel

KONZEPTUALISIERUNG DES THEMAS „NANO“ FÜR DEN CHEMIEUNTERRICHT

von mir selbstständig angefertigt wurde und dass die Stellen der Arbeit, die in wesentlichen Teilen anderen Werken entnommen sind, mit genauer Angabe der Quelle gekennzeichnet sind. Weiterhin bestätige ich, dass benutzte Hilfsmittel an entsprechender Stelle von mir angegeben wurden. Die Dissertation ist weder in Teilen noch in ihrer Gesamtheit einer anderen wissenschaftlichen Hochschule zur Begutachtung in einem Promotionsverfahren vorgelegt worden.

Göttingen, den 04.10.2016

---

(Timm Wilke)