

NANOTECHNOLOGIE IM KONTEXT EINER
BILDUNG FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG:
VOM KONZEPT ZUR CURRICULAREN INNOVATION
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

JANINA ELISABETH DEGE

aus Salzgitter

Göttingen, 2019

Die vorliegende Arbeit wurde im Zeitraum von August 2014 bis Juni 2019 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

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

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. EVA-MARIA NEHER, XLAB Göttinger Experimentallabor für junge Leute, Georg-August-Universität Göttingen

APL. PROF. DR. THOMAS ZEUCH, Institut für Physikalische Chemie, Georg-August-Universität Göttingen

APL. PROF. DR. SUSANNE SCHNEIDER, Didaktik der Physik, Fakultät für Physik, Georg-August-Universität Göttingen

DR. INGO MEY, Institut für Organische und Biomolekulare Chemie, Georg-August-Universität Göttingen

Tag der mündlichen Prüfung: 10.07.2019

DANKSAGUNG

Mein erster Dank geht an Herrn PROF. DR. THOMAS WAITZ für die Möglichkeit zur Promotion in seinem Arbeitskreis, die interessante Aufgabenstellung sowie die herausragende Betreuung. Ich schätze die gemeinsame Arbeit sehr und bedanke mich herzlichst für die vielfältige Unterstützung bei der wissenschaftlichen Arbeit, bei Auslandsaufenthalten sowie bei der Teilnahme an Seminaren und Akademien.

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

Danken möchte ich ALEX, ANNA H., BASTI, BELLA, CARO, CONNI, FELIX K., FELIX M., HILKO, ISABEL, JANA, JOHANNA, KARO, KONRAD, KRISTINA B., KRISTINA F., LAURA, LUKAS, MALTE, MARC, MARIE-LENA, NICOLAI, PHILIPP, RAMONA, SINA und STEVIE für die vielen gemein- und unterhaltsamen Stunden im Arbeitskreis. Ein besonderer Dank gilt in diesem Zusammenhang den längsten Begleitern und Unterstützern ADDI, ANNIKA, DENNIS, ELENA, KAI, NELE, STEFFI und TIMM.

Ein zusätzlicher Dank geht an die fleißigen NanoBiNEn JOHANNA, LAURA, NELE und KRISTINA, die tatkräftig auf allen Ebenen an der Umsetzung des Schülerlaborkurses mitgewirkt haben.

Für die Möglichkeit, während meiner Promotion vor Ort einen Einblick in die Arbeit der israelischen Chemiedidaktik zu bekommen, bin ich Frau PROF. DR. RON BLONDER (Weizmann Institute of Science, Rehovot) sowie Frau DR. RIAM ABU-MUCH (Arab Academic College of Education, Haifa) äußerst dankbar. Danke auch der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Blonder für die spannenden und einmaligen Einblicke in die israelische Kultur.

Besonders danken möchte ich der STIFTUNG DER DEUTSCHEN WIRTSCHAFT zum einen für die finanzielle Unterstützung meiner Promotion inklusive diverser Auslandsreisen, und zum anderen vor allem für die ideelle Förderung. Die besuchten Seminare, Akademien, Workshops sowie die Integration in ein engagiertes Netzwerk haben meinen Lebensweg entscheidend mitgeprägt, wofür ich äußerst dankbar bin.

Meinen Eltern GUDRUN und MATTHIAS danke ich für ihre Unterstützung und die von Kindesbeinen an gelebten Werte wie Großzügigkeit, Dankbarkeit und Gastfreundlichkeit. Meinen beiden Brüdern CHRISTIAN und JULIAN danke ich ebenfalls für ihre Unterstützung sowie für den geschwisterlichen Zusammenhalt. Auch bin ich dankbar für die vielen Jahre mit meinen Großeltern HERTA, META und EWALD.

Das Leben ist eine spannende Reise und ohne Euch wäre meine Reise nur halb so schön und mindestens doppelt so anstrengend. Danke für Eure jahrelange Begleitung durch alle Täler und Höhen: RINA und STEEN mit JONAH, SARA, ELLI und CHRISTOPHER mit EMILIA, CICI und JAN mit MIA, NELE und JAN mit EMILIE und JOHANN, JOHANNES, CLAUDI, JANA sowie CARINA und FLO mit ELLA.

ABSTRACT

Mit einer wachsenden Anzahl von Herausforderungen, die die Menschheit zu bewältigen hat, steigt die Notwendigkeit von vielfältigen Lösungs- und Handlungsoptionen. Um eine nachhaltige Entwicklung der Wirtschaft, der Umwelt und des gesellschaftlichen Lebens zu gewährleisten, sind zwei Elemente unabdingbar.

Zum einen ist es essentiell, dass Innovationen gefördert werden, die umweltverträglich bzw. umweltschutzfördernd, ökonomisch rentabel und dem Menschen von Nutzen sind. In diesem Zusammenhang bieten die Entwicklungen aus dem Bereich der Nanotechnologie ein hohes Potenzial. Daran anschließend ist es zum anderen von großer Bedeutung, dass das Vermitteln von fachlichen Kompetenzen bspw. aus dem Bereich der Nanotechnologie bereits im schulischen Unterricht verankert wird, um dieses Potenzial umfassend ausschöpfen zu können. Darüber hinaus sollen Menschen dazu befähigt werden, aktiv an öffentlichen Diskursen einer nachhaltigen Entwicklung teilzuhaben. Um dies zu erreichen, sollten neue Technologien im Kontext einer Bildung für eine nachhaltige Entwicklung in Bildungspläne bzw. Curricula implementiert werden.

Wie dies am Beispiel der Nanotechnologie konkret vor allem für den experimentellen Chemieunterricht erfolgen kann, soll die vorliegende Arbeit von mehreren Standpunkten aus beleuchten.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

UN	United Nations
UNDRR	United Nation Office for Disaster Risk Reduction
SDGs	Sustainable Development Goals
BNE	Bildung für Nachhaltige Entwicklung
NASA	National Aeronautics and Space Administration
WWF	World Wide Fund for Nature
FCKWs	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
BLK	Bund-Länder-Kommission
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
DUK	Deutsche UNESCO-Kommission
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
DDT	Dichlordiphenyltrichlorethan
BNELIT	Online-Literaturdatenbank Bildung für nachhaltige Entwicklung
DGfE	Deutsche Gesellschaft für Erziehungswissenschaften
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
KMU	Kleinen und Mittleren Unternehmen
NGO	Non-governmental organization
VCI	Verband der Chemischen Industrie
CPI	Nanotechnology Consumer Products Inventory
OLED	Organische Leuchtdiode
NOM	Natürlich vorkommenden Organischen Materialien
UV	ultraviolett
ROS	Reactive oxygen species (reaktive Sauerstoffspezies)
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
BfR	Bundesinstitut für Risikoforschung
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
EU	Europäische Union
Sek	Sekundarstufe
SSI	Socio-Scientific Issues
SEI	social and ethical issues
RiSU	Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht
MDCK-II	Madine Darby Canine Kidney II
NP	Zinkoxidnanopartikel
NaAc	Natriumacetat
EtOH	Ethanol
ZnAc	Zinkacetat-Dihydrat

Zn ²⁺	Zinksulfat
DBU	Deutschen Bundesstiftung Umwelt
BVDD	Berufsverband der Deutschen Dermatologen e.V.
SCCS	Scientific Committee on Consumer Safety
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BUND	Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland
VB	Verbraucherzentrale Bundesverband e.V
DDG	Deutsche Dermatologische Gesellschaft
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
Pre	Pretest
Post	Posttest
FU	Follow-Up-Test

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einleitung.....	1
2.	Ziel und Struktur	3
3.	Das Konzept der Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE).....	4
3.1.	Das Konzept „Nachhaltigkeit“	5
3.2.	Entwicklungsgeschichte des Bildungskonzepts „Bildung für nachhaltige Entwicklung“	11
3.3.	Gestaltungskompetenz als zentrales Element einer BNE	17
3.4.	Themen und Methoden einer BNE	21
3.4.1.	Themen einer BNE	21
3.4.2.	Methoden einer BNE.....	23
3.5.	Aktueller Forschungsstand einer BNE	24
4.	Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung.....	31
4.1.	Fachlicher Hintergrund zur Nanotechnologie	31
4.2.	Nanotechnologie in Bezug zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit	32
4.2.1.	Ökonomische Dimension.....	33
4.2.2.	Ökologische Dimension.....	37
4.2.3.	Soziale Dimension.....	41
4.3.	Bedeutung der Nanotechnologie für den Bildungssektor	47
5.	Entwicklung von Experimenten in Bezug zur Nanotechnologie und Nachhaltigkeit.....	50
5.1.	Nanotechnologie als Thema einer BNE für den Chemieunterricht	50
5.2.	Kriterien für die Entwicklung von Experimenten zur BNE und Nanotechnologie	54
5.3.	Experimente mit Silica-Aerogelen.....	57
5.3.1.	Einfache Strukturaufklärung.....	58
5.3.2.	Wärmeisolierung.....	60
5.3.3.	Gasdurchlässigkeit.....	61
5.3.4.	Feuerzeuggasspeicher	62
5.3.5.	Didaktischer Kommentar zum Einsatz von Aerogelen im Chemieunterricht.....	63
5.4.	Experimente zur Beurteilung der Effizienz photokatalytischer Wasserstoffbildung.....	66
5.4.1.	Kaliumferrioxalat-Aktinometrie	68

5.4.2. Photokatalytische Wasserstoffbildung	73
5.4.3. Berechnung der Effizienz der Wasserstoffbildung.....	76
5.4.4. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von der photokatalytischen Wasserstoffbildung im Chemieunterricht	77
5.5. Experimente zum Einfluss von Nanopartikeln auf Zellen, Algen und Mikroorganismen.....	79
5.5.1. Herstellung von Zinkoxid – und Silbernanopartikel sowie deren Nachweise	80
5.5.2. Einfluss von Zinkoxidnanopartikeln auf Zellkulturen.....	82
5.5.3. Einfluss auf Algenkulturen.....	89
5.5.4. Einfluss auf Mikroorganismen.....	92
5.5.5. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von Experimenten zum Einfluss von Nanopartikeln im Chemieunterricht	95
5.6. Experimente zu Polymermembrane.....	97
5.6.1. Synthese der Polymermembran.....	99
5.6.2. Filtrationswirkung der Membran.....	100
5.6.3. Anfälligkeit der Membran gegenüber organischen Lösungsmitteln, pH-Wert und hohen Temperaturen.....	102
5.6.4. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von Polymermembrane im Chemieunterricht.	104
6. Das Projekt „NanoBiNE“	106
6.1. Themenwahl für den Schülerlaborkurs.....	107
6.2. Lernziele des Schülerlabors NanoBiNE am Standort Göttingen	109
6.3. Methodenwahl und Ablauf des Schülerlaborkurses	111
6.3.1. Einführungsphase.....	112
6.3.2. Experimentierphase.....	117
6.3.3. Planspielphase.....	120
7. Erhebung von Schülerperspektiven zur Nanotechnologie und Nachhaltigkeit	125
7.1. Hypothesen der Umweltbildung.....	125
7.1.1. Hypothese 1: Die Schüler verknüpfen mit dem Begriff Nachhaltigkeit vorrangig ökologische Aspekte.....	125
7.1.2. Hypothese 2: Ohne Wissen zur Nachhaltigkeit erfolgt keine Handlungsbefähigung.....	126
7.1.3. Hypothese 3: Die Schüler sehen die Verantwortung einer nachhaltigen Entwicklung nicht bei sich selbst.....	127

7.2.	Methodenwahl und Fragebogenentwicklung.....	128
7.3.	Ablauf der Datenerhebung unter Beachtung der Gütekriterien von Testverfahren.....	129
8.	Darstellung und Analyse der Ergebnisse der Erhebung.....	131
8.1.	Stichprobenbeschreibung.....	132
8.2.	Quantitative Analyse der geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests.....	134
8.2.1.	Allgemeines Antwortverhalten.....	134
8.2.2.	Mittelwertvergleiche der Messwerte.....	138
8.2.3.	Korrelationskoeffizient r nach Pearson für die geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests	142
8.2.4.	Faktorenanalyse der geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests.....	144
8.3.	Qualitative Inhaltsanalyse der offenen Fragen nach MAYRING.....	146
8.4.	Analyse der Frage 07 des Pre- und Posttests.....	154
8.5.	Analyse der halboffenen Fragen des Pre- und Posttest.....	155
8.6.	Analyse der Sonnencremeempfehlung für Pre-, Post- und Follow-Up-Test.....	157
8.6.1.	Quantitative und qualitative Auswertung der Sonnencremeempfehlung.....	157
8.6.2.	Sonnencremeempfehlung in Abhängigkeit der Planspielposition.....	159
8.7.	Quantitative und qualitative Analyse des Follow-Up-Tests.....	161
9.	Hypothesenüberprüfung und Hypothesenbildung.....	165
9.1.	Hypothese 1: Die Schüler verknüpfen mit dem Begriff Nachhaltigkeit vorrangig ökologische Aspekte.....	165
9.2.	Hypothese 2: Ohne Wissen zur Nachhaltigkeit erfolgt keine Handlungsbefähigung.....	166
9.3.	Hypothese 3: Die Schüler sehen die Verantwortung einer nachhaltigen Entwicklung nicht bei sich selbst.....	168
9.4.	Hypothesenbildung.....	169
9.4.1.	Hypothese 4: Die Schüler nehmen die Nanotechnologie als einen positiven Faktor für die Nachhaltigkeitsförderung wahr.....	170
9.4.2.	Hypothese 5: Wenn den Schülern bekannt ist, in welchen Produkten Nanomaterialien verwendet werden, ist auch bekannt, warum dies der Fall ist und umgekehrt.....	170
9.4.3.	Hypothese 6: Den Schülern ist es wichtig, dass sie über den Einsatz von Nanotechnologie in Alltagsprodukten aufgeklärt werden und diese Informationen an Dritte weitergeben. .	170
9.4.4.	Hypothese 7: Die Schüler bringen das Konzept Nachhaltigkeit nicht mit Nanotechnologie in Verbindung.....	171

9.4.5. Hypothese 8: Die Empfehlung der Anwendung von Sonnencreme mit Nanopartikeln hängt nach dem Kurs von der eingenommenen Position im Planspiel ab.....	171
10. Abschlussbetrachtungen.....	173
11. Literaturverzeichnis.....	175
12. Abbildungsverzeichnis.....	191
13. Tabellenverzeichnis.....	195
Anhang	

1. Einleitung

“We are the first generation that can put an end to poverty and we are the last generation that can put an end to climate change” [1]

- Ban KI-MOON, Mai 2015

Im Rahmen der Verleihung des Ehrendiploms der Katholieke Universiteit Leuven sprach Ban KI-MOON, damals Generalsekretär der United Nations (UN, zu Deutsch: Vereinte Nationen), diese Worte und appellierte damit an alle Bürger dieser Welt. Dieses Zitat scheint aktueller und dringlicher denn je, da Armut und Klimawandel zu den dringlichsten und bedrohlichsten Herausforderungen unserer Zeit gehören.

Für den Zeitraum von 1998 bis 2017 gibt das United Nation Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) an, dass sich die durch extreme Wetterereignisse gemeldeten Schäden auf eine Summe von 2,245 Milliarden US-Dollar belaufen und dies einem Anstieg von 151 % im Vergleich zu den Jahren von 1978 bis 1997 entspricht. [2] Dazu kommt die weltweit ungleiche Verteilung von Gütern. Nordamerika und Europa besaßen im Jahr 2017 zusammen 64 % des weltweiten privaten Vermögens, machten allerdings nur 17 % des Erwachsenen-Weltbevölkerungsanteils aus. [3] Dabei nahm das weltweite Bruttoinlandsprodukt zwischen 2010 und 2016 im Schnitt um 3,76 % im Vergleich zum Vorjahr zu. [4] Laut Schätzungen wird die Steigerung für das Jahr 2017 3,7 % und in den Jahren 2018 sowie 2019 voraussichtlich jeweils 3,9 % betragen. [4] Aus rein wirtschaftlicher Perspektive betrachtet erscheint es heutzutage also kaum nachvollziehbar, dass Menschen auf dieser Erde in bitterer Armut leben. Dass dies dennoch der Fall ist, mag einer Vielzahl an Ursachen geschuldet sein, ist allerdings kein neues Phänomen der letzten Jahre. Schon vor mehreren Jahrzehnten wurde dieses Problem unter anderem von der UN erfasst und thematisiert.

Aktuell wird von der UN angestrebt, durch eine nachhaltige Entwicklung auf ökologischer, ökonomischer und sozialer Ebene die Lebensbedingung weltweit zu verbessern. Dazu traten 2016 die 17 Sustainable Development Goals (SDG, zu Deutsch: Ziele einer nachhaltigen Entwicklung) in Kraft, in denen konkrete Forderung formuliert sind, um die weltweite Armut, Ungleichheit sowie Umweltzerstörung einzudämmen und Wohlstand, Frieden sowie Gerechtigkeit für alle zu fördern. Bereits in dem Aktionsprogramm „Agenda 21“ der UN, das im Jahr 1992 auf der „Konferenz für Umwelt und Entwicklung“ in Rio de Janeiro beschlossen wurde, wird dabei folgender Erfolgsfaktor formuliert: „**Bildung ist eine unerlässliche**

Voraussetzung für die Förderung der nachhaltigen Entwicklung und die bessere Befähigung der Menschen, sich mit Umwelt- und Entwicklungsfragen auseinanderzusetzen.“ [5, S. 329] Demensprechend gewann eine Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) auch im deutschen Bildungssystem über die letzte Jahre an Bedeutung und wird in den kommenden Jahren weiter zunehmen.

Ein weiterer Faktor, der neben der Bildung in einem hohen Maße zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen kann, ist die verstärkte Förderung des technischen Fortschritts. Eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts ist die Nanotechnologie, die unter anderem in den Bereichen Pharmazeutik, medizinischen Diagnostik und Behandlung oder auch der Wasseraufbereitung eine entscheidende Rolle spielen kann. [6, 7]

Beide Themen, sowohl die BNE als auch die Nanotechnologie, sind bisher lediglich in einem geringen Umfang in Bildungsplänen bzw. Kerncurricula der deutschen Bundesländer verankert, obwohl sie beide ein hohes Potenzial vor allem für den Chemieunterricht darstellen können.

2. Ziel und Struktur

Ziel dieser Arbeit soll es entsprechend der Einleitung sein, zu zeigen, dass vor allem durch die Thematisierung der Nanotechnologie im Kontext der BNE eine gewinnbringende Symbiose geschaffen werden kann, die zum einen das fachliche Verständnis der Nanotechnologie der Schüler¹ fördert und zum anderen zur Förderung von Kompetenzen im Rahmen einer BNE beitragen kann.

Zu diesem Zweck wird zu Beginn dieser Arbeit das Konzept der BNE vorgestellt, in seinen historischen Hintergrund einsortiert und die Merkmale einer BNE für den schulischen Einsatz vorgestellt (Kapitel 3). Darauf aufbauend wird dargestellt, wie sich die Nanotechnologie im Rahmen einer BNE präsentiert und welche Zusammenhänge zwischen der Nanotechnologie und den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit bestehen (Kapitel 4).

Auf diesen theoretischen Überlegungen aufbauend schließt sich ein Kapitel zur konkreten Verknüpfung der Nanotechnologie und der BNE für den Chemieunterricht an, einschließlich experimenteller Umsetzungsmöglichkeiten (Kapitel 5).

In der zweiten Hälfte dieser Arbeit wird das Projekt „NanoBiNE“ vorgestellt, in dem ausgewählte Elemente der vorherigen Kapitel praktisch in einem Schülerlabor an der Georg-August-Universität Göttingen umgesetzt wurden (Kapitel 6). Im Rahmen der Durchführung dieser Schülerlabore fand eine Befragung der Schüler zu den Themen Nanotechnologie und Nachhaltigkeit statt. Hierzu wird zunächst die Erhebungsamt der zentralen Forschungsfragen vorgestellt (Kapitel 7), im Anschluss werden die Ergebnisse präsentiert (Kapitel 8) sowie interpretiert (Kapitel 9).

Abschluss der Arbeit bildet eine kurze Zusammenfassung der präsentierten Inhalte (Kapitel 10).

¹ In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form verwendet. Sie bezieht sich allerdings ausdrücklich auf Personen aller Geschlechter.

3. Das Konzept der Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE)

Katastrophen in Bhopal (Chemie- und Umweltkatastrophe 1984), Tschernobyl (Nuklearkatastrophe 1986) sowie die Hungersnöte in der Sahelzone in den 1970ern und 1980ern sorgten für großes Aufsehen. Diese waren mit ein Auslöser für die Anfertigung eines Zukunftsberichts der von der UN gegründeten Weltkommission für Umwelt und Entwicklung im Jahr 1987. Der unter der Bezeichnung BRUNDTLAND-Bericht bekannt gewordene Report „**Unsere gemeinsame Zukunft**“ beeinflusste immens die Umwelt- und Entwicklungspolitik der kommenden Jahrzehnte. Gro Harlem BRUNDTLAND formulierte den negativen Trend der Ungerechtigkeit und Ungleichheit in seinem Vorwort damals folgendermaßen:

„The downward spiral of poverty and environmental degradation is a waste of opportunities and of resources. In particular, it is a waste of human resources. [...] **Poverty is a major cause and effect of global environmental problems.**“ [8, S. 7]

Ziel des Berichts sollte daher die Erarbeitung gemeinsamer Strategien für ökologische, ökonomische sowie soziale Herausforderungen der nächsten Jahre sein. „Together, we should span the globe, and pull together to formulate an interdisciplinary, integrated approach to global concerns and our common future.“ [8, S. 7]

Eine nachhaltige bzw. stabile Entwicklung wurde in diesem Bericht letztendlich folgendermaßen formuliert: **“Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.”** [8, S. 16] Aber wie genau kann eine solche Entwicklung gestaltet werden? Welches sind die Faktoren, die hierbei eine Rolle spielen? Können aufgrund verschiedener kultureller und sozialer Hintergründe gemeinsame Ziele gefunden werden, auch in Abhängigkeit unterschiedlicher Wirtschaftskraft? Und selbst wenn sie gefunden werden, ist es tatsächlich realistisch, dass alle Parteien der Weltgemeinschaft zusammenarbeiten? Gibt es Strategien, die gleichermaßen für ökonomische, ökologische und soziale Bereiche gelten und universell anwendbar sind?

Diese hoch komplexen Fragen können im Rahmen dieser Dissertation nicht allumfassend thematisiert werden. Sie zeigen aber bereits sehr deutlich, dass die Anzahl an verschiedensten Perspektiven bezüglich einer nachhaltigen Entwicklung kaum zu überblicken ist und viele Akteure mit unterschiedlichen Interessen eine Rolle in diesem unübersichtlichen Themenfeld spielen. Für dieses Dissertationsprojekt wird im Folgenden ein kurzer Überblick über einige gängige Definitionen der Nachhaltigkeit und ein Einblick in die

Entstehungsgeschichte der BNE gegeben. Anschließend werden in einem gesonderten Unterkapitel geeignete Themen und Methoden der BNE vorgestellt und zum Abschluss des Kapitels der aktuelle Forschungsstand der BNE präsentiert.

3.1. Das Konzept „Nachhaltigkeit“

Der Begriff Nachhaltigkeit ist in den letzten Jahrzehnten zu einem modernen Schlagwort avanciert. Google liefert unter „Nachhaltigkeit“ 43.900.000 Treffer (das englische Äquivalent „sustainability“ sogar 342.000.000, zum Vergleich: der Begriff „Naturschutz“ liefert lediglich 12.400.000 Einträge². Dabei wird Nachhaltigkeit unter anderem häufig in Verbindung mit neuen Technologien oder besonders Ressourcenschonenden Produkten verwendet. Der Begriff Nachhaltigkeit ist heutzutage sehr weit gefasst und wird auf eine Vielzahl an Bereichen angewendet, sodass das Erstellen einer allgemeingültigen Definition der Nachhaltigkeit ein schwieriges Unterfangen darstellt.

Zu der Zeit, als der Begriff Nachhaltigkeit im Jahr 1713 im deutschsprachigen Raum erstmals aufkam, bezog er sich voranging auf eine ökologische Komponente. Mit Holz, einem der wichtigsten Rohstoffe der damaligen Zeit, sollte nach Hans Carl von Carlowitz so verfahren werden, dass pro Jahr nicht mehr Bäume geschlagen werden als in einer bestimmten Zeitspanne wieder nachwachsen. [9] Dabei war sein Postulat in Bezug auf die zur Verfügung stehenden Rohstoffe generell: „Von den Erträgen einer Substanz, nicht von der Substanz selbst leben!“ [9, S.12] Ziel sollte es sein, dass der Rohstoff Holz auch über die nächsten Jahrzehnte im angemessenen Maße der Menschheit zur Verfügung stehen und die Rohstoffe der Natur vom Menschen bewusst genutzt werden sollten. Von dieser rein ökologischen Betrachtungsweise ist bereits seit einigen Jahrzehnten abgerückt worden. Im Zuge der Industrialisierung und dem technologischen Fortschritt wurde erkannt, dass zum Erhalt und Vorankommen der Menschheit nicht ausschließlich die Umwelt eine Rolle spielt, sondern ebenso andere Faktoren. Eine Annäherung an ebendiese kann über den englischen Begriff der Nachhaltigkeit, „sustainability“, erfolgen. Dieser kann umgekehrt als „ability to sustain“ [10], also als „die Fähigkeit eines Systems, zu bestehen“ bzw. als „die Fähigkeit eines Systems, zu überdauern“ interpretiert werden. Dabei spielt die zeitliche Komponente eine entscheidende Rolle, da die „Überlebensdauer“ eines Systems meist an der Lebensdauer von Menschen (einer oder mehrerer Generationen) bemessen wird. [10] Wird bspw. das System „Sonne-Erde“ betrachtet,

² Stand 22.05.2019.

liefert die Sonne die notwendige Energie, damit Organismen auf der Erde überleben können. Die National Aeronautics and Space Administration (NASA) geht davon aus, dass der Stern „Sonne“ für die nächsten 6,5 Milliarden Jahre in seiner heutigen Form erhalten bleiben wird, bevor er, wie viele andere Sterne, zunächst expandiert und dann kollabiert. [11] Und obwohl die Sonne damit eine begrenzte Lebensdauer hat, wird das System „Sonne-Erde“ aus menschlicher Sicht als ein stabiles und damit nachhaltiges System betrachtet. [10] Dieses Beispiel zeigt bereits deutlich, dass Systeme sich nicht zwangsläufig an den Menschen und seine Lebensdauer koppeln lassen, auch wenn dieser in vielen Bereichen Einfluss auf Systeme nehmen kann. Als Beispiel für anthropogene Einflüsse kann das System „Weltmeere-Lebensraum für Fische“ betrachtet werden, welches unter anderem stark vom Konsumverhalten der Menschen geprägt wird – sowohl in positiver als auch in negativer Art und Weise. Dabei geht es einerseits um die Überfischung und andererseits um Plastikmüll, der im Meer entsorgt wird. Nach Aussage des World Wide Fund for Nature (WWF) wird sich bei gleichbleibenden Wegwerfverhalten bereits im Jahr 2050 gewichtsmäßig ebenso viel Plastikmüll wie Fisch in den Weltmeeren befinden. [12]

Werden zur zeitlichen Komponente die Hauptsätze der Thermodynamik hinzugezogen, ist davon auszugehen, dass kein System ewig überdauern kann. [10] Wird das Universum als thermodynamisch abgeschlossenes System aufgefasst, würde die Annäherung an das thermische Gleichgewicht bedeuten, dass die Entropie seinen maximalen Wert annimmt. Dementsprechend würden die Prozesse des Systems zum Erliegen kommen und damit der sogenannte „Wärmetod“ des Universums eintreten. [13] Im Kontext der Nachhaltigkeit sollte damit stets der Zeitrahmen festgelegt werden, für welchen ein System aufrechterhalten bleibt bzw. aufrechterhalten werden soll. Aufgrund der Komplexität von Systemen, einer Vielzahl an unterschiedlichen Einflussfaktoren und verschiedenen Interessensgruppen, ist es allerdings kaum möglich, präzise Zeitangaben über die Lebensdauer eines Systems zu treffen oder zu einem Konsens zu kommen. Der Biobauer wird vermutlich eine artgerechte und möglichst medikamentenfreie Schweinezucht fördern, da er dies als geringsten nachhaltigen Schaden für Mensch, Tier und Umwelt erachtet, wohingegen die Massentierhaltung aus der Sicht eines Ökonomen die effektivste und nachhaltigste Weise darstellen kann, um möglichst viele Menschen zu ernähren. Beide Akteure verfolgen mit ihrem Handeln bestimmte Absichten, allerdings wird es schwierig werden, dass diese beiden Personen in diesem Beispiel zu einer einheitlichen Definition nachhaltiger Landwirtschaft finden.

Durch äußere, unvorhergesehene Einflüsse kann ein als nachhaltig erachtetes System seine Beständigkeit verlieren. Die Kernkraftwerke in Fukushima wurden vermutlich errichtet, um nachhaltig den wachsenden Energiebedarf der japanischen Bevölkerung über mehrere Jahrzehnte zu sichern. Das Erdbeben und der Tsunami im Jahr 2011 resultierten allerdings in einer Katastrophe, die unter anderem zu einer dauerhaften Verseuchung der Umwelt durch radioaktive Materialien führte und damit hunderte Existenzen zerstörte. Darüber hinaus sind Systeme von Natur aus meist dynamisch und keine starren Konstrukte. Nach MANDERSON ist damit ein nachhaltiges System, welches sich äußeren Reizen und Einflüssen anpassen und sich auf neue Gegebenheiten einstellen kann - besitzt es die Fähigkeit, sich fortwährend anzupassen, dann hat es eine Chance, längerfristig zu überdauern. [10] Als Beispiel hierfür kann die menschliche Spezies angesehen werden, die es geschafft hat, sich im Laufe der Evolution an die neuen Umweltbedingungen anzupassen und weiterzuentwickeln, ohne dabei (bisher) auszusterben.

Bei einer Definition von Nachhaltigkeit gibt es also eine Vielzahl an Komponenten, die eine Rolle spielen: die Zeit, die Akteure mit jeweiligen Interesse, und das System, auf welches diese angewendet werden soll sowie dessen Anpassungsfähigkeit. Darüber hinaus ist zu klären, warum bestimmte Systeme überhaupt nachhaltig sein sollen und wie dies letztendlich umzusetzen ist. [10] Diese Faktoren zeigen zudem deutlich, dass Nachhaltigkeit auf alle Bereiche der Welt angewendet werden kann und jeden Bereich der Lebensgestaltung des Menschen tangiert – von Geburt bis zum Tod, und wenn mehrere Generationen betrachtet werden, darüber hinaus. Auch wenn das „stabile und anpassungsfähige System“ den Begriff Nachhaltigkeit sehr treffend beschreibt, ist er jedoch sehr abstrakt und ist nicht praktikabel für eine konkrete Umsetzung. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat es sich daher etabliert, den Begriff Nachhaltigkeit unter den drei Dimensionen Ökologie (Umwelt), Ökonomie (Wirtschaft) und Soziales (Gesellschaft) zu betrachten. [9, 14] Dabei können die drei Dimensionen nicht völlig separat voneinander betrachtet werden, sie bedingen sich vielmehr gegenseitig und sind vollkommen gleichwertig. Um diese Eigenschaften zu verdeutlichen, wird häufig folgendes Schnittmengenmodell (Abbildung 1) verwendet:

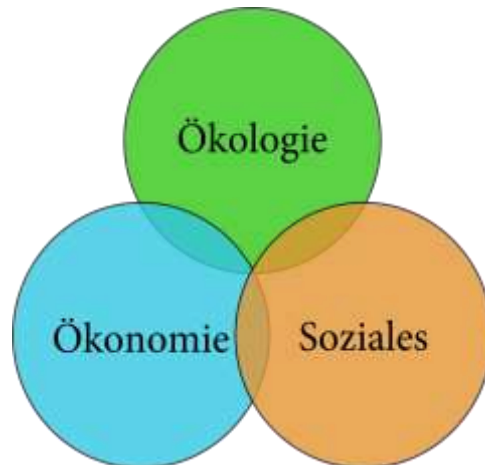


Abbildung 1 - Schnittmengenmodell der Nachhaltigkeit nach VON HAUFF. [14, S. 165]

Nach DE HAAN sollte im Bereich der jeweiligen Dimension - bei DE HAAN als Seiten bezeichnet - folgender Inhalt thematisiert werden:

Tabelle 1 - Seiten der Nachhaltigkeit nach DE HAAN. [15, S. 17-19]

Ökologie	Ökonomie	Soziales
Globaler Wandel von Ökosystemen	Wachstumskriterien	Gerechtigkeitskonzeption
Indikatoren für globale (nicht) nachhaltige ökosystemare Entwicklungen	Traditionelle ökonomische Logiken und nachhaltiges Wirtschaften	Verantwortungsübernahme
Ökologische Ressourcen	Technologien und Technik	Risikoabwägung
Ökologische Senken und Critical Loads	Produktion	Suffiziente Lebensformen
Umweltbeobachtungssysteme	Produkte und Dienstleistungen	Regionale Entwicklung
Handlungsregeln für den Umgang mit Natur	Handel und Distribution	Unterstützungsstrategien
	Konsum	Kulturelle Anpassungsfähigkeit
	Preise, Schulden und Steuern	
	Evaluation	

Die Tabelle 1 erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, zeigt allerdings bereits auf, dass der Umfang an Themen äußerst weit ist. Im Bereich der Ökologie geht es vor allem darum, welchen Einfluss der Mensch auf die Umwelt (Natur sowie Tiere) hat und wie langfristig die Diversität und Regenerationsfähigkeit von Ökosystemen aufrechterhalten werden können. Auch müssen hierfür Beobachtungssysteme und

Handlungsregeln eingeführt werden, um den Einfluss des Menschen und die Entwicklung des Ökosystems dokumentieren und regulieren zu können. Die ökonomische Seite thematisiert die globale, wirtschaftliche Leistungsfähigkeit und deren Entwicklung. Dabei geht es sowohl um die ressourceneffiziente Herstellung von Produkten und deren (nachhaltigen) Konsum als auch um die effektive und gerechte Aufteilung von Gütern. Thematisierungsaspekte der sozialen Seite stehen klar unter dem Fokus der Chancengleichheit sowie inter- und intragenerationeller Gerechtigkeit. Auch geht es um die Stärkung der Empathie und der Solidarität für Andere sowie der Stärkung des Partizipationswillens in der Gestaltung der Gesellschaft, sei es auf politischer, institutioneller, regionaler oder persönlicher Ebene. [15] Wie bereits angedeutet, stehen diese Dimensionen nicht nebeneinander, sondern müssen gleichermaßen gefördert werden, um eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten. So sind z. B. Armut bzw. Gründe für eine Armut und Umweltzerstörung eng miteinander verknüpft, denn

„[d]ie Armut hat zwar bestimmte Arten der Umweltbelastung zur Folge, doch ist die Hauptursache für die anhaltende Zerstörung der globalen Umwelt in den nicht nachhaltigen Konsumgewohnheiten und Produktionsweisen – insbesondere in den Industrieländern – zu sehen, was Anlass zu ernster Besorgnis gibt und Armut und Ungleichgewichte noch verschärft.“ [5, S. 18]

Ebenfalls ist die Wirtschaftskraft stets von den materiellen wie personellen Ressourcen abhängig und kann nicht unabhängig von diesen Faktoren aufrechterhalten oder gar erhöht werden. Eine strikte Separierung der drei Dimensionen ist daher nicht möglich und unterstreicht die Notwendigkeit der Beachtung und Förderung aller drei Bereiche gleichermaßen.

Auch wenn alle drei Dimensionen gleichermaßen gefördert werden sollen, existiert eine Diskussion über die verschiedenen Varianten von Nachhaltigkeit. Diese Varianten haben gemein, dass sie den größtmöglichen Nutzen für den Menschen im Blick haben; jedoch ist die Art der Umsetzung eine andere. Die Vertreter der sogenannten „Schwachen Nachhaltigkeit“ wie PEARCE und ATKINSON [16] sowie GUTÉS [17] gehen davon aus, dass Sach- und Naturkapital unbegrenzt substituierbar sind, vor allem das Natur- durch das Sachkapital. Dies hat bspw. zur Folge, dass der Verbrauch natürlicher Ressourcen keine Gefahr bzw. keinen Verlust für den Menschen zur Folge hätte, solange dieser durch neue Technologien bspw. durch erneuerbare Energien ausgeglichen werden kann. Eine vollständig artifizielle Welt wäre demnach vorstellbar und sogar wünschenswert, wenn dabei der Nutzen die Kosten übersteigt. [18] Vertreter

der „Starken Nachhaltigkeit“ wie OTT und DÖRING [19] sprechen sich hingegen dafür aus, dass das Naturkapital konstant bleiben muss. Endliche Ressourcen dürfen zum Wohle nachfolgender Generationen nicht verbraucht werden, ihr Erhalt hat eine hohe, wenn nicht gar die höchste Priorität. [18] Es wäre fatal, wenn künftige Generationen bspw. entdeckten, dass Honigbienen Krebs oder andere für den Menschen schwerwiegenden Krankheiten erriechen könnten und somit zuverlässige Diagnoseinstrumente darstellen, bis dahin allerdings die Honigbiene ausgestorben wäre. Eine dritte Variante, ein Mittelweg aus vorherigen, ist die „Kritische Nachhaltigkeit“. Vertreter wie NUTZINGER und RADKE [20] unterstützen die Auffassung, dass Natur- und Sachkapital begrenzt füreinander substituierbar sind. Nach Möglichkeit soll die Natur erhalten bleiben, parallel soll eine Ausweitung eines technologischen Einsatzes erfolgen. Die Probleme der heutigen Welt betrachtend scheint das Konzept der Kritischen Nachhaltigkeit am überzeugendsten, denn längst nimmt die Biodiversität stetig ab: Bspw. schwinden die Erdölvorkommen (Naturkapital) und wir werden auf die Hilfe neuer Technologien (Sachkapital) zwangsläufig angewiesen sein.

Ob Schwache, Starke oder Kritische Nachhaltigkeit: Für die Umsetzung von Nachhaltigkeit in den genannten Bereichen gibt es viele verschiedene Ansätze, Maßnahmen und Konzepte. Einzelne Aktionen der letzten Jahrzehnte sind hierbei z. B. das Verbot von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKWs) als Kühlmittel in Kühlschränken aufgrund ihres negativen Einflusses auf die Ozonschicht und die Atmosphäre, die Einführung von Flaschen- und Dosenpfand zur Reduzierung von Müll sowie das Sozialstaatsprinzip zur Unterstützung der sozialen Gerechtigkeit. Solche lokalen bzw. nationalen Errungenschaften sind sinnvoll und notwendig, vernachlässigen allerdings die globale Perspektive, da bspw. Plastikmüll nur effektiv eingegrenzt werden kann, wenn alle Länder der Welt unter anderem ein Pfandsystem einführen würden.

Nach der Anfertigung und Veröffentlichung des BRUNDTLAND-Berichts durch die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der UN, in dem erstmal der Begriff „**Nachhaltige Entwicklung**“ **definiert wurde**, sollte die internationale Partnerschaft durch die Agenda 21 intensiviert werden. Die Verabschiedung der Agenda 21 erfolgte im Jahr 1992 auf der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der UN in Rio de Janeiro. „Die Agenda 21 nimmt sich der drängendsten Probleme der heutigen Zeit an und ist zur gleichen Zeit **bemüht, die Welt auf die Herausforderungen des nächsten Jahrhunderts vorzubereiten.**“ [5, S. 1] Zu diesem Zweck führte der Bericht auf über 300 Seiten notwendige ökonomische, ökologische und soziale Maßnahmen auf, die ein gerechtes und friedliches Zusammenleben sichern sollen. Dabei werden konkrete

finanzielle Mittel genannt und erörtert, welchen Beitrag die Wissenschaft und umweltgerechte Technologien leisten können. Eine wegweisende Rolle spielt hierbei allerdings die in Kapitel 36 geforderte Ausweitung der Bildung.

3.2. Entwicklungsgeschichte des Bildungskonzepts „Bildung für nachhaltige Entwicklung“

Nach Artikel 26 der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte der UN aus dem Jahre 1948 „[...] hat [jeder] das Recht auf Bildung.“ [21, S. 8] Weiter heißt es dort, dass Bildung

„[...] zu Verständnis, Toleranz und Freundschaft zwischen allen Nationen und allen rassistischen oder religiösen Gruppen beitragen und der Tätigkeit der Vereinten Nationen für die Wahrung des Friedens förderlich sein [muss].“ [21, S. 8]

Bildung geht demnach über einen reinen Wissenserwerb und Fortschritt der Wissenschaft hinaus, sie ist vielmehr der Schlüssel zu einem friedlichen und erfüllten Zusammenleben. Damit ist sie auch das zentrale Instrument, um eine nachhaltige Entwicklung zu fördern. Nur wer über ausreichende Informationen verfügt, kann seine Einstellung grundlegend verändern, Sachverhalte bewerten und dementsprechend „gute“ Entscheidungen fällen. Nach ADOMBENT et al. gilt demnach:

„**Bildung für nachhaltige Entwicklung** zielt darauf ab, Menschen dazu zu befähigen, Probleme nicht nachhaltiger Entwicklung zu erkennen und so zu handeln, dass heute und künftig lebende Generationen die Chance auf die Verwirklichung eines in sozialer, ökologischer und ökonomischer Hinsicht ‚guten‘ Lebens haben.“ [22, S. 75]

Dies wird vor allem vor dem Hintergrund immer bedeutender, dass sich neue Technologien rasant entwickeln und etabliert werden. Diese Entwicklungen können äußerst positive Auswirkungen für die Gesellschaft haben, allerdings gehen mit diesen auch mögliche negative Effekte einher. Ein Beispiel hierfür sind Smartphones, die zu einem nützlichen Alltagprodukt der heutigen Gesellschaft avanciert sind. Selten bekannt ist jedoch, dass die in Smartphones verwendeten Metalle wie Kobalt, Zinn, Tantal, Wolfram oder Gold in afrikanischen Bürgerkriegsländern teilweise von Kindern in Minen gewonnen werden. [23] Dies hat massive nachteilige Auswirkungen auf die Menschen und die Umwelt vor Ort. Bei der Entwicklung und Verbreitung von neuen Technologien ist eine Technikfolgenabschätzung daher essentiell, welche sich mit dem Spannungsfeld von Technik sowie Technisierung und Wirtschaft, Öffentlichkeit und Politik

auseinandersetzt. [24] Ziel ist es dabei, die Chancen neuer Technologien zu nutzen und gleichzeitig die Risiken in der Produktion, Anwendung und Entsorgung bzw. Wiederverwertung zu minimieren. [25] Bildung ist hierzu unabdingbar, da hierdurch ein verändertes Handeln erreicht werden kann sowie Werte und Normen für eine globale nachhaltige Entwicklung vermittelt werden können. Auch sind generell Lernprozesse von Nöten, um die Zukunft aktiv zu gestalten, denn ein gewisses (Fach-)Wissen muss vorhanden sein, um geeignete Pläne zu entwickeln und um diese Strategien in Handlungen umzusetzen.

Trotz der Veröffentlichung des BRUNDTLAND-Berichts im Jahr 1987 und der Agenda 21 im Jahr 1992, startete in Deutschland erst im Jahr 1999 die Bund-Länder-Kommission (BLK) das „Programm 21 – Bildung für eine nachhaltige Entwicklung“. Die zwei Hauptziele des Programms waren zum einen die Verankerung der BNE in die schulische Regelpraxis und zum anderen die Vermittlung von Gestaltungskompetenz (Erläuterungen zur Gestaltungskompetenz siehe Kapitel 3.3) an Schüler, also das Vermitteln von „[...] nach vorne weisende[m] Vermögen [...], die Zukunft von Sozietäten, in denen man lebt, in aktiver Teilhabe im Sinne nachhaltiger Entwicklung [zu] modifizieren und [zu] modellieren [...].“ [26, S. 7]

Die Programmbeauftragten zogen nach fünf Jahren eine positive Bilanz: Es war gelungen, eine BNE an den Programmschulen zu implementieren und sowohl institutionell als auch personell zu verankern. So waren im Sommer 2004 an vier von fünf Schulen Steuergruppen eingerichtet, die eine BNE fördern. Neue Unterrichtsformen wie der Einsatz digitaler Medien oder Planspielen förderten die Aneignung von Gestaltungskompetenz seitens der Schüler und forderten deren Partizipation in der Gestaltung von Unterrichtsinhalten und Formen. Der entstandene Pool an Kompetenzen seitens der Lehrkräfte sowie das Entstehen eines Netzwerkes an BNE-Schulen sollten für eine gute Unterstützung der folgenden „Transferjahre“ führen. Als weniger gelungen wurde der geringe Zuwachs an neuen Programmschulen während des Projekts, die geringe Beteiligung der Eltern sowie die mangelnde Verankerung des Bildungskonzepts in die Lehrerbildung angeführt. [26]

Um die erarbeiteten Inhalte und Kompetenzen des „BLK-Programms 21“ zu disseminieren, schloss sich in Deutschland im Jahr 2004 nahtlos das Projekt „Transfer-21“ an, welches bis zum Jahr 2008 durchgeführt wurde. „Ziel des Programmes war es, Netzwerkstrukturen, Materialien und Konzepte des Vorgängerprogramms auf zehn Prozent der Schulen Deutschlands zu erweitern und somit die Bildung für

nachhaltige Entwicklung in großem Umfang [systematisch] zu verankern.“ [27, S. 25] Eine Plattform für einen Austausch sollten Fortbildungsveranstaltungen, Tagungen und Kampagnen bilden und die Programme sollten für Grundschulen und Ganztagschulen (vor allem den Nachmittagsbereich) ausgeweitet werden. Um zusätzlich auch die Gesellschaft für Nachhaltigkeitsthemen zu sensibilisieren, wurde das Projekt über die Schulgrenzen hinaus an unterschiedlichen Stellen implementiert. So sollte ein „Ausbau von dauerhaften Beratungs- und Unterstützungsstrukturen“ sowie eine „Umfassende Fortbildung von Multiplikatoren“ [28, S. 61] (z. B. in Landesinstituten oder Umweltbildungszentren) erfolgen. Zusätzliche Kooperationen mit Eltern, Vereinen, Universitäten, Studienseminaren und Landesinstituten sollten regionale BNE-Strukturen sowie die Präsenz in der Lehrerbildung fördern. [28]

Ein Großteil der Ziele konnte innerhalb von vier Jahren erreicht werden: Deutschlandweit konnten insgesamt 12,1 % der Schulen in das Projekt eingebunden werden. Zu den bereits existierenden Kernschulen des BLK-Programms 21 konnten weitere Kernschulen, aber auch Kooperations- und Kontaktschulen gewonnen werden.³ Durch das breite Angebot an Lehrerfortbildungen konnten darüber hinaus viele Schulen erreicht werden, vor allem der Zuwachs an Grundschulen nahm zu. Bei den Ganztagschulen zeigte sich ein anderes Bild, hier bestand nach Programmabschluss weiterhin ein hoher Umsetzungsbedarf. Diese Diskrepanz der Schulformen sei durch mehrere Umstände zu erklären, als äußerst förderlich wurden für den Grundschulbereich die Nähe zu den Rahmenplänen angeführt. Zusätzlich konnten durch die Kernschulen, internationale und nationale Schulnetzwerke sowie die bundesweite Koordinierungsstelle an der Freien Universität Berlin dauerhafte Beratungs- und Unterstützungsstrukturen auch über die Projektzeit hinaus etabliert werden.

Generell waren die finanzielle und personelle Ausstattung sowie die Festlegung eines Themenschwerpunktes des jeweiligen Bundeslandes sehr heterogen. Die Ausbildung und der Einsatz von Multiplikatoren verliefen wünschenswert, da sich jeweils 79 Personen zu vollqualifizierten bzw. teilqualifizierten Multiplikatoren ausbilden ließen. Diese waren maßgeblich an der Unterstützung des Programms in den jeweiligen Bundesländern beteiligt und sind darüber hinaus auch nach Projektende in dauerhaften Strukturen eingebunden. Einzig im Bereich der Implementierung der BNE in die

³ Kernschulen = BNE als Schulkonzept, Kooperationsschule = BNE-Teilintegration in Schulcurricula, Kontaktschule = BNE-Aspekte im AG-Bereich (nach dem BLK-Programm 21 [28]).

Lehrerbildung gab es erhebliche Widerstände und Probleme z. B. beim Anpassen von Studiengängen, sodass „[i]m Resümee [...] die Realisierung dieses inhaltlichen Schwerpunktes nur partiell statt[fiel].“ [28, S. 70] Auch wenn der Großteil der Ziele des Projektes erreicht werden konnte, sprachen sich die Programmverantwortlichen am Ende der Laufzeit eindringlich für die Einrichtung einer zentralen Servicestelle BNE aus. [28]

Obwohl die Entwicklung und Etablierung einer BNE in dieser Zeit in Deutschland bereits im vollen Gang war, zog die UN im Jahr 2002 auf der Folgekonferenz Rio+10 in Johannesburg eine ernüchternde Bilanz bezüglich des Fortschritts einer nachhaltigen Entwicklung weltweit. Als Konsequenz und zur Stärkung des Konzepts rief die UN die Jahre 2005-2014 als Weltdekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ aus. In Deutschland hatten die Durchführung des Transfer-21 und das Ausrufen der UN-Weltdekade einen synergistischen Effekt:

„Transfer-21 war eine der wesentlichen Maßnahmen des Nationalen Aktionsplans der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ in Deutschland. [...] Die Initiative der Dekade erhöhte die Aufmerksamkeit und die Popularität des Themas und wirkte somit als Impuls für die eigene Arbeit und darauf, dass Transfer-21 als Impulsgeber in der UN-Dekade wahrgenommen wurde.“ [28, S. 40]

Wie der Transfer-21 geht die UN-Weltdekade über den rein schulischen Rahmen hinaus und bezieht alle Bildungsbereiche bis hin zur informellen Bildung ein.

Auf internationaler Ebene war die United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO, zu Deutsch: Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur) verantwortlich für die Umsetzung der UN-Weltdekade. In Deutschland übernahm die Deutsche UNESCO-Kommission (DUK) diesen Part, welche im Mai 2004 ein Nationalkomitee zur Umsetzung berief. Hieraus ging der Nationale Aktionsplan hervor, welcher vier strategische Ziele umfasste:

1. „Weiterentwicklung und Bündelung der Aktivitäten auf dem Gebiet „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ sowie Transfer guter Praxis in die Breite
2. Vernetzung der Akteure der Bildung für nachhaltige Entwicklung
3. Verbesserung der öffentlichen Wahrnehmung von Bildung für nachhaltige Entwicklung

4. Verstärkung internationaler Kooperationen“ [29, S.6]

Der Online-Datenbank der UN-Dekade „Bildung für nachhaltigen Entwicklung“ ist zu entnehmen, dass im Laufe der Jahre bundesweit 2314 Personen und 1757 Institutionen an der Umsetzung der Ziele beteiligt waren und 1939 Projekte ausgezeichnet wurden. [30] Bereits im März 2012 war jedoch für den Deutschen Bundestag abzusehen,

„[...] dass bei Abschluss der UN-Dekade „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ die Ziele der Dekade zu einem Teil, aber nicht vollständig erreicht sein werden. Trotz des großen Engagements politischer und zivilgesellschaftlicher Akteure auf allen Ebenen steht der große Durchbruch der dauerhaften Verankerung der BNE national und international noch aus.“ [31, S. 158]

Dies hatte mehrere Ursachen, wie bspw. die ungleiche regionale Verteilung der Projekte, fehlende Aktionspläne in einigen Bundesländern sowie fehlende Qualitätskriterien. [32] Befragungen von Projektmitwirkenden während sowie am Ende der Projektlaufzeit ergaben, dass „[...] personelle, zeitliche und finanzielle Probleme die Haupthindernisse für Umsetzung und damit Verbreitung und Verankerung“ [32, S. 110] einer BNE sind. Nichtsdestotrotz bot die UN-Dekade einen vielversprechenden Ausgangspunkt für die Integration einer BNE im Bildungssektor. Verbindende und unterstützende Strukturen sind allerdings nach wie vor erwünscht und notwendig.

Auch auf internationaler Ebene bestand nach der UN-Dekade der dringende Bedarf an einem Ausbau bzw. Intensivierung einer nachhaltigen Entwicklung. Im Herbst 2015 formulierte die UN daher in der Agenda 2030 insgesamt 17 SDGs, welche erneut unter der Leitung der UNESCO umgesetzt werden. [33] Wie der Abbildung 2 zu entnehmen ist, sind diese Ziele äußerst vielfältig und weit gefasst und unterstreichen aufs Neue die weite Definition der Nachhaltigkeit bzw. der nachhaltigen Entwicklung. Auch hier liegt einer der Schwerpunkte auf der Bildung: Ziel 4 „Inklusive, gleichberechtigte und hochwertige Bildung gewährleisten und Möglichkeiten lebenslangen Lernens für alle fördern“ [33, S. 18] soll sicherstellen, dass bis zum Jahr 2030 Mädchen und Jungen gleichberechtigt der Zugang zu einer kostenlosen Grund- und Sekundarschulbildung ermöglicht wird. [33]

Abbildung 2 - Die 17 SDGs der UN.⁴ [34]

Darüber hinaus sollen

„alle Lernenden die notwendigen Kenntnisse und Qualifikationen zur Förderung nachhaltiger Entwicklung erwerben, unter anderem durch Bildung für nachhaltige Entwicklung und nachhaltige Lebensweisen, Menschenrechte, Geschlechtergleichstellung, eine Kultur des Friedens und der Gewaltlosigkeit, Weltbürgerschaft und die Wertschätzung kultureller Vielfalt und des Beitrags der Kultur zu nachhaltiger Entwicklung.“ [33, S. 18]

Bildung wird hierbei ebenfalls als Grundlage gesehen, mithilfe dessen die übrigen Ziele ebenfalls gefördert werden können. Hier verweist die UN bspw. darauf, dass Daten aus den Jahren 1985-2005 zeigen, dass pro zusätzliches Jahr Bildung der GINI-Koeffizient (ein statistisches Maß für Ungleichheiten im Einkommen oder Konsum von Individuen, einem Haushalt oder Gruppen⁵ [35]) um 1,4 % gesenkt werden kann. [36] Ein erhöhtes Maß an Bildung kann demnach zu einem höheren Grad an gesellschaftlicher Mitgestaltung führen und so Ungerechtigkeiten bekämpfen.

⁴ Mit freundlicher Genehmigung der Deutschen Bundesregierung (siehe Anhang A.1.1.).

⁵ Der Wert 0 entspricht beim GINI-Koeffizienten einer absolut gleichmäßigen Verteilung, der Wert 1 einer absolut ungleichmäßigen Verteilung. [35]

3.3. Gestaltungskompetenz als zentrales Element einer BNE

Spätestens ab der Umsetzung der UN-Dekade lag der inhaltliche Schwerpunkt der BNE in Deutschland auf der Vermittlung und Umsetzung der Gestaltungskompetenz. Aber was bedeutet Kompetenz in diesem Kontext konkret, wie ist sie mit den einzelnen Dimensionen der Nachhaltigkeit verknüpft und was hat dies mit „Gestaltung“ zu tun?

Kompetenzen gehen in der Regel über rein fachlich theoretische Komponenten hinaus und betreffen zusätzlich „[...] **ethische, soziale**, emotionale, motivationale und verhaltensbezogene Komponenten [...]“ [37, S. 16] sowie „[...] allgemeine Einstellungen und Elemente der Selbstwahrung.“ [38, S. 183] Dabei sind sie stets „[...] auf Intentionen, Aufgaben und Herausforderungen bezogen [...]“ [38, S. 183] (Führungskompetenzen zielen darauf ab, eine Gruppe zu leiten; Managementkompetenzen dienen einer adäquaten Koordination von Projekten) und müssen zu Automatismen in Handlungsmustern werden. [38] In der praktischen Umsetzung zeigt sich, wie sehr sie sich in die Verhaltensstrukturen manifestiert haben und angewendet werden können.

Für die inhaltliche Ausdifferenzierung der Gestaltungskompetenz für den deutschen Bildungssektor wurde sich an den Schlüsselkompetenzen der Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD, zu Deutsch: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) orientiert, da dieses Konzept „[...] **international anschlussfähig und zugleich von hoher bildungspolitischer wie planerischer Relevanz ist.**“ [39, S. 30] Dabei werden Schlüsselkompetenzen darüber definiert, dass sie „[...] *erstens* für die Gestaltung komplexer Herausforderungen des eigenen Lebens wie der gesellschaftlichen Entwicklung wichtig, und *zweites* für die Fähigkeit, ein gutes Leben zu führen, **zentral sind.**“ [38, S. 184] Im deutschsprachigen Raum wird am häufigsten die Einteilung der Teilkompetenzen nach DE HAAN zur Beschreibung der Gestaltungskompetenz verwendet (siehe Tabelle 2). Nach dem maßgeblichen Mitgestalter des BLK-Programms 21, des Transfer-21 sowie der UN-Weltdekade in Deutschland lauten die 12 Teilkompetenzen für den deutschen Bildungssektor orientiert an den OECD Richtlinien wie folgt:

Tabelle 2 - 12 Teilkompetenzen und deren Zuordnung zu den OECD Schlüsselkompetenzen. [38, S. 188]

Kompetenzkategorien der OECD	Teilkompetenzen der Gestaltungskompetenz
Interaktive Verwendung von Medien und Tools	<p>T.1 Kompetenz zur Perspektivübernahme: Weltoffen und neue Perspektiven integrierend Wissen aufbauen</p> <p>T.2 Kompetenz zur Antizipation: Vorausschauend Entwicklungen analysieren und beurteilen können</p> <p>T.3 Kompetenz zur disziplinenübergreifenden Erkenntnisgewinnung: Interdisziplinär Erkenntnisse gewinnen und handeln</p> <p>T.4 Kompetenz zum Umgang mit unvollständigen und überkomplexen Informationen: Risiken, Gefahren und Unsicherheiten erkennen und abwägen können</p>
Interagieren in heterogenen Gruppen	<p>G.1 Kompetenz zur Kooperation: Gemeinsam mit anderen planen und handeln können</p> <p>G.2 Kompetenz zur Bewältigung individueller Entscheidungsdilemmata: Zielkonflikte bei der Reflexion über Handlungsstrategien berücksichtigen können</p> <p>G.3 Kompetenz zur Partizipation: An kollektiven Entscheidungsprozessen teilhaben können</p> <p>G.4 Kompetenz zur Motivation: Sich und andere motivieren können, aktiv zu werden</p>
Eigenständiges Handeln	<p>E.1 Kompetenz zur Reflexion auf Leitbilder: Die eigenen Leitbilder und die anderer reflektieren können</p> <p>E.2 Kompetenz zum moralischen Handeln: Vorstellungen von Gerechtigkeit als Entscheidungs- und Handlungsgrundlage nutzen können</p> <p>E.3 Kompetenz zum eigenständigen Handeln: Selbständig planen und handeln können</p> <p>E.4 Kompetenz zur Unterstützung anderer: Empathie für andere zeigen können</p>

Im Bereich der Interaktiven Verwendung von Medien und Tools ist die Kompetenz zur Perspektivübernahme (T.1) dahingehend von Bedeutung, dass in einer immer stärker globalisierten Welt Herausforderungen und Probleme nicht vor einer Landesgrenze Halt machen. Themen wie Klimaerwärmung, Umweltverschmutzung oder auch globale Gerechtigkeit verlangen nach einer

internationalen Zusammenarbeit. Hierfür ist es unabdingbar, sich in die Lage anderer Personen, Gesellschaftsgruppen oder Gruppierungen versetzen zu können und deren Perspektiven in Betracht zu ziehen, um erfolgreich ein gemeinsames Ziel anzusteuern zu können. Das hierzu benötigte Wissen und mögliche Handlungsstrategien werden in der Teilkompetenz Kompetenz zur Antizipation (T.2) gefördert. Prognosen, Simulationen sowie deren Analyse sollen in nachhaltiges Handeln münden und darüber hinaus erkennen, was ein nicht nachhaltiges Handeln zur Folge hätte. Und ebenso notwendig wie eine internationale Zusammenarbeit sind hierfür ein Austausch und eine Kooperation verschiedener Fachdisziplinen (T.3 Kompetenz zur disziplinübergreifenden Erkenntnisgewinnung). Die Bearbeitung solcher komplexer und vielfältiger Herausforderungen erfordert diversitätsgeprägte Ideen und Lösungsansätze, sowohl fachlicher als auch strukturell organisatorischer Natur. Aber auch wenn das Problem gemeinsam, aus verschiedensten Perspektiven und mithilfe antizipierter Ereignisse bearbeitet wird, ist deutlich, dass es erstens unmöglich ist, in die Zukunft zu schauen und zweitens, dass das Problem in seiner Komplexität als Ganzes erfasst werden kann. Es ist daher essentiell, eine Kompetenz zum Umgang mit unvollständigen und überkomplexen Informationen (T.4) zu fördern, um nach einer (stochastischen) Abschätzung von Risiken, Gefahren und Unsicherheiten dennoch eine Entscheidung treffen zu können.

Über den Austausch und die Perspektivübernahme geht der Bereich des Interagierens in heterogenen Gruppen hinaus. Auch wenn allen Akteuren möglichst viele Perspektiven zur Verfügung stehen bzw. in Betracht gezogen werden, garantiert dies keine effektive und erfolgreiche Zusammenarbeit. Die Kompetenz zur Kooperation (G.1) sowie die Kompetenz zur Partizipation (G.3) spielen an dieser Stelle eine entscheidende Rolle, um sich in Entscheidungsprozessen sowie Umsetzungen einzubringen. Dabei ist es nach der Kompetenz zur Bewältigung individueller Entscheidungsdilemmata (G.2) wichtig, sich differenter Zielsetzungen bewusst zu sein und (potentielle) Zielkonflikte zu reflektieren, um mit ihnen produktiv umzugehen. Werden gemeinsame Ziele und Wege dorthin gefunden, garantiert dies noch keine erfolgreiche Umsetzung. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit würde sich keine Person per se gegen bspw. den Umweltschutz aussprechen. Als Konsequenz daraus allerdings auf einen Kaffeebecher „to go“ oder eine übermäßige Verwendung des Autos zu verzichten gelingt nur, wenn die eigene Motivation hierzu hoch genug ist. Die Kompetenz zur Motivation (G.4), und zwar sowohl sich selbst zu motivieren als auch andere, ist demzufolge unerlässlich.

Ebenso wie das Interagieren mit Anderen spielt das Individuum und die Kompetenz des eigenständigen Handelns eine große Rolle. Hierbei hilft die Kompetenz zur Reflexion auf Leitbilder (E.1). Dabei wird zum einen analysiert, nach welchen Formen und mit welchen Auswirkungen auf die Umwelt und Gesellschaft andere Personen und Gesellschaftsgruppen ihr Leben gestalten. Dies ist gerade vor dem Hintergrund **sinnvoll, dass viele Parteien oder Unternehmen mit dem Schlagwort „Nachhaltigkeit“ werben, um einen positiven Eindruck ihrer Agenda bzw. ihrer Arbeit zu vermitteln.** [10] Dies sollte stets kritisch beleuchtet werden, um den tatsächlich nachhaltigen Aspekt der Agenda zu ergründen. Zum anderen sollten eigene Einstellungen und Handlungsmuster auf ihre Konsequenzen für Mitmenschen und die Umwelt hin untersucht und gegebenenfalls angepasst werden. Die Kompetenz zum moralischen Handeln (E.2.) ergibt sich aus einem globalen sowie zeitlich unabhängigen Gerechtigkeitsverständnis, von dem im besten Falle **jeder profitieren kann. Dass diese Forderung nach „Gerechtigkeit für alle“ zwar höchst wünschenswert ist,** allerdings auch Schwierigkeiten allein schon in der Definition mit sich bringt, sollte in diesem Bereich thematisiert und diskutiert werden. Wie bereits im vorherigen Absatz erwähnt, hängt die Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung stark von der Motivation jedes Einzelnen und damit von der Kompetenz zum eigenständigen Handeln (E.3) ab. Es ist daher notwendig, sowohl in einer Gruppe als auch selbstständig befähigt zu sein, nachhaltige Strategien zu verfolgen und anzuwenden. Um als Teil eines Kollektivs kraftvoll zu wirken, ist es darüber hinaus wichtig, eine Kompetenz zur Unterstützung anderer (E.4) zu fördern. Empathie kann dabei nicht wie viele andere Inhalte klassisch vermittelt werden, sondern sollte sich im Idealfall automatisch aus der Notwendigkeit einer gerechten, nachhaltigen und sicheren Welt für alle ergeben. [38]

In der vorliegenden Arbeit werden diese Teilkompetenzen benutzt, um Experimente sowie Methoden für den Chemieunterricht auf ihre Eignung zur Vermittlung einer nachhaltigen Entwicklung hin zu untersuchen bzw. anzupassen. Die sich für die Integration einer BNE in den schulischen Alltag nützlichen Methoden werden im folgenden Unterkapitel 3.4 beleuchtet. Sowohl aus den Experimenten als auch aus den Methoden werden geeignete Aspekte gewählt, um diese zu einem Schülerlaborkurs zusammen zu führen. Auch bei der Entwicklung und Auswertung eines Fragebogens zum Thema Nanotechnologie und Nachhaltigkeit wird sich im Laufe der Arbeit auf diese Teilkompetenzen berufen.

3.4. Themen und Methoden einer BNE

Wie in den vorherigen Unterkapiteln thematisiert ist die „Nachhaltigkeit“ ein weites Feld und auch die BNE berührt viele Aspekte des alltäglichen Lebens. Um eine BNE in den Bildungssektor zu integrieren, ist die konkrete Themenwahl von Bedeutung und es werden nach BARTH „[...] für den Erwerb von Gestaltungskompetenz neue Lehr- und Lernformen für notwendig erachtet.“ [40, S. 2] Darüber hinaus „[erfordert] die Komplexität nachhaltiger Entwicklung [...] eine Thematisierung in möglichst vielen Fächern und in fachübergreifenden und fächerverbindenden Organisationsformen sowie als wichtiges Anliegen des Schullebens.“ [41, S. 4] Das heißt, dass es sowohl Themen als auch Methoden gibt, die sich in einer besonderen Art und Weise zur Vermittlung von Kompetenzen einer BNE eignen. Beides wird in diesem Unterkapitel thematisiert. Bei der Gestaltung des Unterrichts oder bei Projekten sollte darauf geachtet werden, dass im Sinne eines partizipativen Arbeitens die Erfahrungen, Interessen, Ideen und Erwartungen der Schüler sowohl in der inhaltlichen als auch in der methodischen Ausgestaltung genutzt werden. [42]

3.4.1. Themen einer BNE

Nach DE HAAN [15, S. 16ff] gibt es vier „Allgemeine Selektionskriterien für Inhalte“, die sich für die Vermittlung von Gestaltungskompetenz im schulischen Kontext eignen. Das erste Kriterium „Zentrales lokales und/oder globales Thema für nachhaltige Entwicklungsprozesse“ besagt, dass, obwohl die meisten Aspekte einer nachhaltigen Entwicklung auf einer globalen Ebene Veränderung benötigen, der erste Schritt auf einer lokalen Ebene stattfinden muss. Mit abstrakten Konstrukten wird die Motivation zur Auseinandersetzung jedes einzelnen mit bestimmten Themen kaum angesprochen werden, wenn keine Bedeutung für das persönliche, direkte Umfeld unmittelbar spürbar ist. Das heißt es müssen Themen gewählt werden, durch die „[d]ie Wechselwirkungen zwischen lokalem Handeln und globalem Wandel [...] erfahrbar werden.“ [15, S. 16] In Deutschland sind wir bspw. äußerst selten von einer Trinkwasserknappheit bedroht, wie dies in vielen anderen Ländern der Welt der Fall ist. Denn nach neuesten Schätzungen von UNICEF haben mehr als 663 Millionen Menschen weltweit keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. [43] Um von einer lokalen Ebene auszugehen, kann in diesem Kontext allerdings die Trinkwasserverunreinigung in Deutschland durch Nitrate, Hormone oder Weichmacher betrachtet werden. Diese kann von Düngemitteln, Medikamentenresten im Abwasser (durch Entsorgung oder den menschlichen Urin) oder

Weichspülmitteln verursacht werden und einen negativen Einfluss auf den Menschen und die Umwelt ausüben. Sauberes Trinkwasser ist somit auch auf nationaler Ebene ein Problem, über welches sich der weltweiten Trinkwasserversorgung genähert werden kann.

Zu diesem lokalen/globalen Zusammenspiel kommt hinzu, dass das Thema eine „Längerfristige Bedeutung“ haben soll. Das heißt, dass nicht vorrangig Themen diskutiert werden sollen, die tagesaktuell, sondern im Allgemeinen zukunftsgerichtet sind. Wenn dahingehend gearbeitet wird, dass bspw. die Energieversorgung dauerhaft gesichert oder hin zu erneuerbaren Energien umgestellt werden soll, werden sich hieraus automatisch Konsequenzen für die Gegenwart ergeben. Der Blick soll dabei aber stets zukunftsgerichtet sein.

Der dritte Aspekt von geeigneten Themen ist deren „Differenziertheit des Wissens“. Das Wissen zu einem Themenbereich soll dementsprechend „auf breiten und differenzierten Erkenntnissen in Wissenschaft, Forschung und Politik zum spezifischen Thema basieren“. [44, S. 33] Das bedeutet, dass zu einem Thema möglichst viele unterschiedliche Perspektiven vorhanden sind, die in diesem Kontext diskutiert werden können und dass die Umsetzbarkeit in die Realität beachtet werden muss. Wenn z. B. gefordert wird, dass die weltweite Ernährung auf eine vegetarische umgestellt werden soll, da für die Produktion von Fleisch unter anderem verhältnismäßig viel Trinkwasser und Nahrung für die Tiere zur Verfügung gestellt werden muss, lässt dies allerdings außer Acht, dass in manchen Regionen der Anbau von Getreide oder Reis aus klimatischen oder geografischen Gründen nicht möglich ist. Auch ist es notwendig, sich der Begrenztheit der Informationsmöglichkeiten bewusst zu sein, also ein Wissen über Nicht-Wissen zu erhalten und zu beachten. Darüber hinaus ist ein Blick in die Zukunft nicht möglich, dementsprechend mit Prognosen oder Modellen gearbeitet werden muss, um Voraussagen für die Zukunft treffen zu können. Diese basieren häufig zwar auf fundierten Daten, geben letztendlich jedoch auch nur eine Wahrscheinlichkeit wieder.

Um von einer theoretischen Betrachtung eines Problems in ein Handeln übergehen zu können, sollte ein Thema ein gewisses „Handlungspotential“ aufzeigen. Ein Horrorszenario für die Zukunft zu malen, auf das kein Einfluss ausgeübt werden kann, ist nicht zielführend. Bei der Gestaltungskompetenz geht es vielmehr zu einem großen Teil darum, aktiv zu werden und den Herausforderungen mit Handlungen zu begegnen. Dabei gilt, dass je höher die Sichtbarkeit des Handlungspotentials ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Umsetzung konkreter Maßnahmen auf lokaler sowie globaler Ebene. Ein einfaches Beispiel für eine

einfache Sichtbarkeit von Handlungspotential ist folgendes: Die Belastung der Weltmeere durch Plastik ist stetig steigend (globale Ebene), ihr kann allerdings indirekt entgegengewirkt werden, indem der Preis für Plastiktüten erhöht wird (nationale Ebene) oder eine wiederverwendbare Tasche zum Einkaufen stets mit sich geführt wird (lokale bzw. persönliche Ebene).

Neben diesen vier Kriterien wurden im Rahmen des Transfer-21 weitere Kriterien entwickelt, die sich für eine Integration in den schulischen Kontext bzw. Unterricht ergeben. Neben dem klaren Bezug zu Kompetenzen der BNE, soll das Thema mit den in „[...] Unterricht zu erwerbenden Fachkompetenzen verbunden werden können“ [44, S. 33] sowie „eine Relevanz für die Bildungsziele der Lernenden aufweisen.“ [44, S. 33] Hierdurch wird die Integration vor allem in den Regelunterricht deutlich vereinfacht. Auch ein Anknüpfen an das Vorwissen der Schülerinnen und Schülern zu den einzelnen Themen erhöht die Chance, dass Inhalte einfacher verstanden werden bzw. dauerhafter (im schulischen Kontext) verankert werden. [45]

3.4.2. Methoden einer BNE

Um den Erwerb der Kompetenzen einer BNE zu erleichtern, wurden bereits im Rahmen des BLK-Programms 21 drei Unterrichts- und Organisationsprinzipien formuliert:

„Interdisziplinäres Wissen geht von der Notwendigkeit „vernetzten Denkens“, insbesondere der Vernetzung von Natur- und Kulturwelt und der Entwicklung entsprechender Problemlösungskompetenzen aus. Ziel ist die Etablierung entsprechender Inhalte und Arbeitsformen in den Curricula.

Partizipatives Lernen greift die zentrale Forderung der Agenda 21 nach Teilhabe aller gesellschaftlichen Gruppen am Prozess nachhaltiger Entwicklung auf. Schule kann auf diese Teilhabe vorbereiten, indem sie ihre Unterrichtskultur um Lehr- und Lernformen erweitert, die gezielt demokratische Handlungskompetenzen vermitteln.

Etablierung innovativer Strukturen geht davon aus, dass die Schule als ganzheitliches System bildungswirksam ist, indem sie aktuelle schulische Reformfelder wie Qualitätsentwicklung, Profilbildung, Öffnung von Schule, Leistungskultur usw. für alle thematisiert und in partizipativen

Verfahren strukturell weiterentwickelt. In diesem Rahmen ist die Kooperation mit außerschulischen Partnern von hoher Bedeutung.“ [41, S. 5]

Diese drei Prinzipien verdeutlichen bereits, dass sich die Implementierung einer BNE im schulischen Rahmen nicht ausschließlich auf die unterrichtliche Ebene bezieht. Vielmehr sollte „[d]as [gesamte] Schulleben [...] an den Werten und Zielsetzungen der nachhaltigen Entwicklung orientiert [sein] und [...] allen Beteiligten Möglichkeiten zur Mitsprache, Mitgestaltung und Mitbestimmung an relevanten Fragen und Themen [bieten].“ [42, S. 13]

Konkret kann dies für die unterschiedlichen Ebenen Folgendes bedeuten [42]: Die Schule sollte sich als Ganzes öffnen und Kooperationen mit (zivil)gesellschaftlichen Akteuren, anderen Schulen oder Unternehmen (unter anderem im Rahmen von Schülerfirmen) eingehen. Eine Partizipation der Eltern sollte gefördert werden und basisdemokratische Foren sowie repräsentative Gremien sollten eingeführt werden. Die Zusammenarbeit des schulischen Personals kann dabei durch die Etablierung von Teamstrukturen, Supervisionen und kollegiale Fallberatungen, Materialsammlungen sowie Fortbildungs- und Studientage gefördert werden. Im Unterricht sollte situiertes Lernen sowie Lernen vor Ort gefördert werden. Dies kann bspw. durch den Besuch eines Unternehmens erfolgen, an dem Projekte vor Ort durchgeführt werden könnten. Kooperatives bzw. partizipatives Lernen kann durch innovative Lernformen wie Plan- und Rollenspiele, Zukunftskonferenzen oder runde Tische gefördert werden. [46] Dabei spielen lebensnahe Bezüge und Realbedingungen eine entscheidende Rolle. [46] Darüber hinaus sollten Planungs- und Evaluationsmethoden nicht außer Acht gelassen werden, in Form von Selbstevaluation von Lernprozessen (durch z. B. Lernportfolios) oder Schülerfeedback. [42, 46]

3.5. Aktueller Forschungsstand einer BNE

Eigentlich scheint es selbstverständlich: Der Mensch will ein gesundes, bedeutungsvolles Leben in einer blühenden und sicheren Umwelt ohne wirtschaftliche Probleme führen. Die wenigstens Menschen wollen dabei vorsätzlich der Umwelt oder anderen Menschen Schaden zufügen. Darüber hinaus liegen heutzutage umfassende Studien und Erfahrungen vor, welches (menschliche) Verhalten einen negativen Einfluss auf die Umwelt ausübt, wie bspw. die Verwendung des Insektizids Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT)⁶,

⁶ Eine prägnante Übersicht zur Geschichte, Persistenz sowie Risiken von DDT ist unter anderem bei TURUSOV et al. zu finden. [47]

sodass die absolute Vermeidung solcher Substanzen logisch erscheint. Trotzdem gibt es eine Diskrepanz zwischen dem Wissen auf der einen Seite und dem Handeln auf der anderen. MALONEY und WARD definierten für den Bereich des Umweltbewusstseins daher bereits im Jahr 1973 drei verschiedene Komponenten [48]:



Das (Umwelt-)verhalten von Menschen hängt dabei neben dem Umweltwissen und der Umwelteinstellung von vielen unterschiedlichen Einflussfaktoren ab, wobei der soziale, gesellschaftliche und wirtschaftliche Kontext eine entscheidende Rolle spielt. [49] Der Fischer möchte bspw. seinen Lebensunterhalt mit dem Fischen verdienen, überfischt einen Bestand eventuell, die Industrie möchte gegebenenfalls ihre Abfälle unkompliziert im Meer entsorgen, um durch finanzielle Einsparungen zur Verbesserung der wirtschaftlichen Lage der Angestellten beizutragen und der Ökologe möchte zum Schutz der Artenvielfalt **den gesamten Lebensraum „Weltmeer“ seinem vollständig natürlichen Zustand überlassen. Um also einen gemeinsamen Weg zu finden, der die sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedürfnisse Aller berücksichtigt, benötigt es nach KYBURZ-GRABER et al. drei Aspekte:**

- „Personen, Gruppen und ganze Organisationen, die den Mut haben, die Diskussion über gemeinsame Ziele, Werte und Interessen in der Gesellschaft immer wieder anzustoßen
- Die Bereitschaft in der Bevölkerung, darüber nachzudenken, was uns an der Suche nach neuen, kreativen Lösungsmöglichkeiten für anstehende Probleme hindert (Kommunikation)
- Personen und Organisationen, die bereit sind, gemeinsam, das heißt, partnerschaftlich, an **Lösungen zu arbeiten.**“ [49, S. 23]

Das Bildungskonzept BNE ist dabei ein wichtiger Baustein, der eben dazu beitragen kann, dass Schüler zu einer aktiven Lösungsentwicklung sowie –umsetzung befähigt bzw. für diese Problematik sensibilisiert werden. Da es sich hierbei um ein relativ junges Konzept handelt (vgl. Kapitel 3.2), ist es kaum überraschend, dass in diesem Kontext bisher wenige Studien zur Umsetzung, erfolgreichen Implementierung sowie zu dessen Wirksamkeit vorhanden sind. Dies gilt sowohl für den schulischen als

auch für den außerschulischen Bereich. [50] Allerdings ist es möglich, Parallelen zur Etablierung und Erforschung des Umweltbewusstseins zu ziehen, da die BNE in den Anfängen aus der Verstärkung und Erweiterung eines Umweltbewusstseins entstanden ist. Dabei werden bereits seit den 70er Jahren Faktoren erforscht, die ein Umweltbewusstsein begünstigen und welche Faktoren eine Diskrepanz zwischen Umweltwissen und Umweltverhalten verursachen können. [51] In Bezug zum Umweltbewusstsein fasst RIEß in einer Metastudie potentielle Barrieren zusammen, die bei Kindern und Jugendliche (auch im schulischen Kontext) in Bezug auf ein nachhaltiges bzw. umweltfreundliches Handeln von Bedeutung sein können. Dabei fasst er sieben mögliche Punkte zusammen, die ein wünschenswertes Umweltverhalten schwächen können. Diese umfassen

1. fehlendes Wissen (sowohl Fach-/Umweltwissen als auch konkretes Handlungswissen),
2. ausgeprägte externe Verantwortungsattribution,
3. die Überzeugung, dass das eigenen Handeln keinen nennenswerten (negativen wie positiven) Einfluss auf die Umwelt hat,
4. das Fehlen von nachhaltig agierenden Vorbildern,
5. mögliche Schwächung des Selbstwertgefühls durch bspw. Hänseln „beim nachhaltig Handeln“,
6. externe Beschränkungen wie bspw. das Fehlen von Mülleimern sowie
7. möglicherweise bereits durch Sozialisation antrainierte Lebensstile, die einem umweltbewussten Handeln entgegenwirken. [46, S. 65f]

Diese Barrieren können ebenso auf die Entwicklung von Kompetenzen der BNE übertragen werden, indem von der rein ökologischen Dimension sowohl auf die ökonomische als auch die soziale erweitert wird. Punkt drei könnte sich bspw. dahingehend erweitern lassen, dass das eigene Handeln keinen nennenswerten Einfluss auf die Umwelt, die Wirtschaft und die Gesellschaft hat. Es wäre nach Auffassung der Schüler also unbedeutend, als Einzelperson im Winter nur Stoßzulüften statt das Fenster durchgehend auf Kipp zu halten, beim Shoppen lediglich Fairtrade Produkte zu kaufen oder regelkonform in das deutsche Sozialsystem einzuzahlen. Analog können die anderen sechs Punkte auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit sowie die Kompetenzen einer BNE angepasst werden.⁷

⁷ Weitere Verweise auf Studien im Bereich des Umweltbewusstseins sind bei RIEß [46] S. 51ff zu finden.

Neben der Forschung zum Umweltbewusstsein tragen nach GRASEL ebenso Kosten-Nutzen-Ansätze sowie Partizipation zur Grundlage einer BNE-Forschung bei. [52] Die Kosten-Nutzen-Ansätze entstammen in ihrem Ursprung einer ökonomischen Dimension und spiegeln die Komponente der extrinsischen Motivation für ein umweltbewusstes Handeln wider. [52] Das heißt, dass ein (wirtschaftlicher) Nutzen für das Individuum entsteht, wenn in bestimmten Situationen das umweltbewusste Handeln verstärkt oder auch verringert wird. Dabei konnten unter anderem DIEKMANN und PREISENDÖRFER zeigen, „dass [Menschen] ihre „Umweltmoral“ und ihre „Umwelteinrichtungen“ in Situationen einlösen, die keine einschneidenden Verhaltensänderungen erfordern, keine größeren Unbequemlichkeiten verursachen und keinen besonderen Zusatzaufwand verlangen.“ [53, S. 240] Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass (extrinsische) Anreize geschaffen werden sollten, wenn eine umfangreichere und subjektiv als anstrengend wahrgenommene Umweltverhaltensänderung vorgenommen wird. Ein Beispiel extrinsischer Anreize ist die Abwrackprämie⁸ bzw. Umweltprämie aus dem Jahr 2009, bei der Kraftfahrzeugbesitzern in Deutschland eine staatliche Prämie in Höhe von 2.500 Euro gezahlt wurde, wenn ein altes Auto verschrottet und dafür ein Neuwagen oder Jahreswagen angeschafft wurde. Dies sollte zum einen der Schadstoffreduzierung durch neuere Modelle dienen und zusätzlich die Umsätze der Automobilindustrie ankurbeln. Nach einer Aussage des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit konnte in einer Studie des Heidelberger IFEU-Instituts bereits im selben Jahr gezeigt werden, dass die Kohlenstoffdioxid-Emissionen sowie der Spritverbrauch im Durchschnitt um 20 % gesenkt werden konnten. [55] Solche Prämien können demnach hilfreich sein, einen Wandel zu vollziehen. An dieser Stelle sei jedoch in Frage gestellt, ob dies dauerhaft und in welchem Umfang möglich ist und wer letztendlich tatsächlich davon profitiert.

Unter Partizipation fasst GRASEL vor allem die Betrachtung gesellschaftlicher sowie politischer Dimensionen im Rahmen einer Umweltbildung. [52] Das Beispiel der Abwrackprämie zeigt dabei eindrücklich, wie eng ein umweltbewusstes Verhalten mit politischen Entscheidungen verknüpft sein kann. Im Kontext der BNE und einer BNE-Forschung steht dabei nach GRASEL eine „„verständigungsorientierte Umweltbildung“ [im Fokus], die darauf abzielt, dass Lernende aktuelle Umweltdebatten verstehen, an ihnen teilnehmen und eine eigene, fundierte Position zu diesem Thema entwickeln“ [52, S. 11] können.

⁸ Eine kurze, informelle Übersicht zur Abwrackprämie wurde bspw. vom Deutschen Bundestag herausgegeben [54] und ist online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/blob/561134/4376c6bc0fc0b4286ecb7323cce04912/wd-5-069-18-pdf-data.pdf> (zuletzt geprüft am 22.05.2019).

Partizipationsmöglichkeiten und –befähigungen sind bereits aus anderen Lehr-Lernprozessen als wichtiger Bestandteil bekannt, sodass die BNE-Forschung ebenfalls auf sie rekurrieren kann.

Eine BNE-Forschung, die diese und andere Aspekte berücksichtigt, hat nach BARTH in den letzten Jahr(zehnt)en kontinuierlich an Bedeutung zugenommen, was sowohl an dem Anstieg der Konferenzen in diesem Bereich, der steigenden Anzahl an nationalen wie internationalen Publikationen und Zeitschriften sowie der Etablierung von BNE-Netzwerken belegt werden kann. [56] Diese Aussage wird ebenfalls durch die „Online-Literaturdatenbank Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNELIT)“⁹ unterstützt, die ca. 14.600 Bücher, ca. 7.800 Aufsätze aus Büchern, ca. 16.400 erfasste Aufsätze aus Zeitschriften sowie ca. 3.750 Zeitschriftenaufsätze umfasst¹⁰. Unter dem Stichwort „Studie“ liefert die Datenbank 659 Einträge.¹¹

Um einen Überblick über die Themen einer BNE-Forschung, die verwendeten (Mess-)Methoden und die Parallelen zu den Erziehungswissenschaften zu erhalten, analysierten GRÄSEL et al. insgesamt 70 Publikationen deutscher Autoren aus den Jahren 2007-2010. Dabei ergaben sich drei Themenschwerpunkte der BNE-Forschung: Kompetenzmodelle sowie Kompetenzvermittlung (1), Steuerung und Institutionalisierung (2) sowie individueller sowie institutioneller Transfer (3), wobei letzteres über die Hälfte der analysierten Publikationen auszeichnet. [58] Der Großteil der BNE-Forschung verfolgt empirische Ansätze, wobei doppelt so viele quantitative wie qualitative Studien zu verzeichnen sind. [58] Die Ziele der Studien liegen meist in der Evaluierung durchgeführter Projekte oder spezieller Anwendungen im schulischen Kontext. Sie überprüfen nur in einem geringen Maße die Wirksamkeit einer BNE und weisen lediglich im geringen Maße Verbindungen zu der Forschung bzw. Forschungsmethoden in den Erziehungswissenschaften auf. [58] Um die BNE und deren Forschung stärker in die Erziehungswissenschaften zu integrieren, verabschiedete die Kommission „Umweltbildung“ der Deutsche Gesellschaft für Erziehungswissenschaften (DGfE) bereits im Jahr 1997 ein „Programm zur Umweltbildungsforschung“. [59] Im Jahr 2003 wurde die Kommission „Umweltbildung“ in die Kommission „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ umbenannt [59], die seitdem über die rein ökologische Komponente hinaus unter anderem ein „Forum des Austausches zur Forschung zur Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE)“ [60] darstellt. In der Schriftenreihe „Ökologie und Erziehungswissenschaft“ dieser

⁹ Die BNELIT wurde im Jahr 2009 als ein Commitment des „Nationalen Aktionsplan BNE“ online gestellt. [57]

¹⁰ Stand Mitte Juni 2018, BNELIT online verfügbar unter <http://www.bne-literatur.de/> (zuletzt geprüft am 07.11.2018).

¹¹ Stand 22.05.2019.

Kommission wurden seit 2009 sieben Bände herausgegeben, die sich mit eben dieser Symbiose befassen. Band 6, aus dem Jahr 2016, geht dabei explizit auf die „Empirische Forschung zur Bildung für nachhaltige Entwicklung – Themen, Methoden und Trends“ ein. [61] In dem einleitenden Beitrag des Buches wird dabei die Notwendigkeit, die BNE-Forschung in der allgemeinen Bildungsforschung stärker zu verankern, da in diesem Bereich „[...] in einer engeren Vernetzung und Berücksichtigung aktueller Forschungserkenntnisse und –ansätze ein großes Verbesserungspotential gesehen [wird].“ [62, S. 9]

Da BNE vor allem durch eine hohe Interdisziplinarität ausgezeichnet ist, sollte sich der Bereich der BNE-Forschung allerdings nicht alleine auf einen erziehungswissenschaftlichen Kontext beschränken. Vielmehr sollte sie verstärkt einen Teil der Psychologie, der Soziologie, der Politik, der Philosophie, der Wirtschaft sowie der Naturwissenschaften und Fachdidaktiken einnehmen, um nur einige Bereiche zu nennen. Eine BNE-Forschungsstandanalyse zu all diesen Bereichen würde den Umfang dieser Dissertation bei weitem übersteigen und bleibt dem interessierten Leser vorbehalten. Für die vorliegende Arbeit ist allerdings von Interesse, ob und inwieweit eine BNE in der Schule umgesetzt wird und eine BNE-Forschung in der Chemiedidaktik bereits etabliert wurde.

Eine ausführliche Übersicht zu Studien zur Umsetzung und Implementierung einer BNE im schulischen Kontext sowie Einflussfaktoren für eben diese ist bei BUDDEBERG zu finden. [63] In der Analyse untersucht BUDDEBERG die vier Bereiche der BNE-Forschung, die von DGfE aufgestellt wurden, in Verknüpfung mit der schulischen Bildung. Diese umfassen die Lehr-Lern-Forschung, die Innovationsforschung, die Qualitätsforschung sowie die Surveyforschung¹². Auch wenn viele Beispiele angeführt werden können, wird im Fazit festgehalten, dass „[...] in allen Bereichen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. [...] [I]nsbesondere die Surveyforschung [ist] unterrepräsentiert.“ [63, S. 118] Einen erheblichen Beitrag, vor allem zum Bereich der Innovationsforschung, leisteten in diesem Rahmen demnach die Forschung zum BLK-Programm „21“ sowie Transfer-21.¹³ Neben dieser Analyse stellt BUDDEBERG eine im Jahr 2010 selbst durchgeführte Studie vor, in der untersucht wurde, inwieweit die BNE an weiterführenden Schulen in NRW verankert ist und welche Faktoren eine Umsetzung begünstigen. Hierfür wurden zunächst im Rahmen einer Online-Befragung eine quantitative Studie an 48 Schulen mit 34 Schulleitungen und 489 Lehrkräfte

¹² Eine Beschreibung von Surveyforschung, vor allem auch im Kontext BNE, ist unter anderem bei HAUENSCHILD zu finden. [64]

¹³ Hintergründe zum BLK-Programm „21“ und dem Transfer-21 sind in Kapitel 3.2 zu finden.

durchgeführt. Auf diesen aufbauend fand an vier Schulen eine qualitative Erhebung mithilfe von leitfadengestützten Experteninterviews statt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass 30 % der befragten Schulleitungen sowie etwa 52 % der Lehrkräfte das Konzept BNE nicht bekannt ist, auch wenn Themen einer nachhaltigen Entwicklung im Unterricht behandelt werden. [65] In einer Studie von SEYBOLD aus dem Jahr 2003, bei der 788 Grundschullehrer aus Baden-Württemberg befragt wurden, gaben sogar nur 16 % der Befragten an, den Begriff BNE zu kennen. [66] Ein Grund hierfür könnte eine fehlende Verankerung der BNE in der Lehrerbildung sein, da dieser Bereich nach REICHEL „viel zu oft [...] wieder aus der allgemeinen Aufmerksamkeit [verschwindet], wenn der zuständige Hochschullehrer emeritiert wird.“ [67, S. 98] Eine Umsetzung nachhaltigkeitsbezogener Themen im Unterricht findet dabei unter anderem häufiger statt, wenn diese im Curriculum verankert sind, ein allgemein positives Innovationsklima innerhalb des Kollegiums besteht und BNE seitens der Schulleitung als bedeutsam und förderungswürdig wahrgenommen und kommuniziert wird. [63]

Inwieweit Nachhaltigkeit bzw. BNE in Curricula und Bildungsplänen des Fachs Chemie verankert ist, wird in dieser Arbeit in Kapitel 5.1 betrachtet. Die relativ geringe Präsenz, die dabei festgestellt wird, lässt bereits vermuten, dass auch die BNE-Forschung im Kontext der Chemiedidaktik in den Kinderschuhen steckt. Erste Ansätze in Deutschland sind bei BURMEISTER und EILKS zu finden. Diese Studien umfassen zum einen Kenntnisse und Vorstellungen zur BNE von Studierenden, Referendaren sowie Chemielehrkräften [68, 69] sowie Fallstudien zu Projekten partizipativer Aktionsforschung, in denen vor allem Interventionsmaßnahmen wie eine Chemielehrerbildung im Kontext BNE reflektiert werden und Möglichkeiten zur Implementierung in einem iterativen Prozess gemeinsam herausgearbeitet werden. [70] Darüber hinaus sind im chemiedidaktischen Kontext zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Dissertation keine weiteren Publikationen zu finden, sodass darauf geschlossen werden kann, dass an dieser Stelle keine systematische Verankerung einer BNE-Forschung vorliegt.

4. Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung

Im folgenden Kapitel wird zunächst kurz auf den fachlichen Hintergrund der Nanotechnologie eingegangen. Anschließend wird die Nanotechnologie bzw. deren Anwendungen in Bezug zu den drei oben angeführten Dimensionen der Nachhaltigkeit betrachtet und herausgearbeitet, inwiefern die Nanotechnologie die jeweilige Dimension berührt. Dabei werden sowohl Chancen als auch Risiken für den jeweiligen Bereich dargestellt. Darauf aufbauend wird die Bedeutung der Nanotechnologie für den Bildungssektor dargestellt und einem weiteren Unterkapitel verglichen, ob und wenn ja in welchem Umfang die Nanotechnologie den unter Kapitel 3.4. angeführten Kriterien der Themenwahl im Kontext der BNE entspricht.

4.1. Fachlicher Hintergrund zur Nanotechnologie

Das Wort „**nano**“ ist von dem griechischen Wort „**νάνος**“ bzw. dem lateinischen Wort „**nanus**“ abgeleitet und bedeutet Zwerg. Diese Übersetzung deutet bereits darauf hin, dass es sich hierbei um etwas „sehr Kleines“ handelt. Als Vorsilbe bei mathematischen oder physikalischen Beschreibungen von Zahlen, steht das Präfix „**nano**“ für 10^{-9} , also einen milliardstel Teil, womit 1 Nanometer (nm) = $1 \cdot 10^{-9}$ Meter (m) entspricht. Allgemein anerkannte Definitionen für Nanotechnologien sind die folgenden drei:

1. „Nanotechnologie befasst sich mit Strukturen, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 nm sind.
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.“ [71, S. 1]

Zu den Nanomaterialien zählen daher neben den reinen Nanopartikeln Filme mit nanometergroßen Schichtdicken sowie makroskopische Objekte, die aus Nanopartikeln aufgebaut sind oder nanoporöse Poren aufweisen. [72] Wie unter 2. angeführt, zeigen diese Materialien andere physikalische und chemische Eigenschaften als deren makroskopische Stoffe. Bereits die Römer machten sich diesen Zusammenhang – höchst wahrscheinlich unwissentlich – zu Nutze, in dem sie in Gefäßen und Fenstern aus Glas bspw. Silber- und Goldnanopartikel verwendeten, die zu einer besonderen Farbigkeit beitrugen. [73] Je nach Größe

können die Goldnanopartikel zu einer zartrosa bis violetten Färbung des Glases führen, Silber- und Kupfernanopartikel zu einer gelb-bräunlichen bzw. bläulichen Färbung. [74] Neben dieser veränderten Farbigekeit können Nanopartikel, abhängig von ihrem Material, unter anderem supermagnetisch [75], superhydrophob [76] oder auch härter [77] sein, als das zugehörige Bulkmaterial.

Die Eigenschaften von Materialien in der Nanodimension sind vor allem auf das besonders große Oberflächen-zu-Volumenverhältnis, auf die zunehmende Bedeutung quantenphysikalischer Effekte sowie auf Selbstorganisations-Phänomene zurückzuführen. [71, 78] Dabei sind natürlich vorkommende Nanopartikel kein neues Phänomen: Durch das Ausbrechen von Vulkanen gelangen diese in die Umwelt und auch die wasser- und schmutzabweisende Oberfläche der Lotuspflanze ist auf Nanostrukturen zurückzuführen. Die industrielle Herstellung von Nanomaterialien ist hingegen eine Erscheinung der letzten Jahrzehnte (eine detaillierte Betrachtung erfolgt in Kapitel 4.2). Diese Herstellung kann prinzipiell auf zwei Wegen erfolgen: Beim „Top-down“-Verfahren werden durch mechanische Verfahren, bspw. Mahlprozesse, Materialien miniaturisiert. [71] Beim „Bottom-Up“-Verfahren werden nanometergroße Strukturen gezielt aus Atomen, Ionen bzw. Molekülen hergestellt. [71]

Durch die Vielzahl an außergewöhnlichen Eigenschaften von Nanomaterialien steigen die Bedeutung sowie die Möglichkeiten deren Anwendung in vielen Lebensbereichen. Das folgende Unterkapitel soll daher einen Einblick in diese Bereiche geben und deren Chancen sowie möglichen negative Effekte präsentieren.

4.2. Nanotechnologie in Bezug zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit¹⁴

Im Folgenden werden die Ökonomie, die Ökologie und der soziale Bereich in Bezug zur Nanotechnologie betrachtet. Wie unter Kapitel 3.1 beschrieben, überschneiden sich diese drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, sodass die folgende Einteilung der jeweiligen Aspekte der Nanotechnologie nicht als starres Konstrukt zu verstehen ist. Um allerdings trotzdem eine einheitliche sowie übersichtliche Einteilung zu erhalten, erfolgt diese anhand der Zuteilung der Tabelle 1 (S. 8).

¹⁴ Ähnliche Aspekte dieses Unterkapitels sind in dem Buchkapitel „Nanoscience Education in School Chemistry: Perspectives for Curricular Innovations in Context of an Education for a Sustainable Development“ von NONNINGER et al. zu finden. [79] S. 237ff

4.2.1. Ökonomische Dimension

Die im Folgenden angeführten Zahlen, durchgeführten Aktionen sowie der Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland sind zu einem großen Teil sechs Berichten entnommen, welche in den letzten Jahren vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) veröffentlicht wurden. Diese Berichte sind seit 2006 in Kooperation sieben verschiedener Bundesministerien entstanden und umfassen zum einen Aktionspläne¹⁵ und zum anderen den Status der Nanotechnologie in Deutschland¹⁶.

Aufbauend auf vorherige Aktionspläne hat die Bundesregierung folgende Ziele bis zum Jahr 2020 formuliert. Demnach ist vorgesehen,

- „die Nanotechnologieförderung an prioritären Zukunftsaufgaben der neuen Hightech-Strategie auszurichten, [...]
- die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen durch eine effizientere Ergebnisumsetzung zu verbessern, [...]
- durch begleitende Risikoforschung und –kommunikation die verantwortungsvolle Gestaltung der Nanotechnologie als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu gewährleisten, [...]
- [sowie] innovationsfreundliche Rahmenbedingungen für nachhaltiges Wirtschaften zu gestalten.“ [82, S. 9ff]

Inwiefern und in welcher Art und Weise dies für den wirtschaftlichen Bereich bisher umgesetzt wurde, wird im Folgenden ausgeführt.

Wachstumskriterien, Technologie und Technik, Produktion, Arbeitsplätze

Die Bedeutung der Nanotechnologie im wirtschaftlichen Bereich hat über die letzten Jahre stetig zugenommen und wird dies in den nächsten Jahrzehnten weiterhin tun. Dem Status Quo des Aktionsplans Nanotechnologie 2020 ist zu entnehmen, dass im Jahr 2016 insgesamt 1100 Unternehmen in Deutschland in den Bereichen der Forschung und Entwicklung, sowie der Vermarktung kommerzieller Produkte und Dienstleistungen in Bezug zur Nanotechnologie tätig waren. [82] Im Vergleich zum Jahr 2006, dem Entstehungsjahr des Aktionsplans 2010, ist dies ein Anstieg um 500 Unternehmen. [80] Damals wie heute

¹⁵ „Nano-Initiative – Aktionsplan 2010“ [80], „Aktionsplan Nanotechnologie 2015“ [81], „Aktionsplan Nanotechnologie 2020“ [82]

¹⁶ „nano.DE-Report 2009“ [83], „nano.DE-Report 2011“ [84], „nano.DE-Report 2013“ [85]

liegt der Anteil an Kleinen und Mittleren Unternehmen (KMU) zwischen 75-80 %. Eine positive wirtschaftliche Entwicklung lässt sich darüber hinaus aus den Gesamtumsatzzahlen der deutschen Unternehmen im Bereich der Nanotechnologie ableiten: Im Jahr 2010 lag diese bei 13 Milliarden Euro und stieg im Jahr 2013 auf 15 Milliarden an. [85] Weltweit ist dieser Anstieg sogar noch eindeutiger zu beobachten: Der weltweite Gesamtmarkt der Nanotechnologie lag im Jahr 2016 bei 39,2 Milliarden US-Dollar und wird bei einer jährlichen Wachstumsrate von 18,2 % in den Jahren 2016 bis 2021 auf 90,5 Milliarden US-Dollar ansteigen. [86] Die Anzahl der Arbeitsplätze nahm in Deutschland von 50.000 (im Jahr 2006 [80]) auf 70.000 (im Jahr 2013 [85]) zu.

Die Anwendungsfelder der Nanotechnologie in Deutschland sind sehr vielfältig. Auf der „Nanokarte: Forschung und Innovationen (nano-map)“¹⁷ des BMBF sind 1908 Organisationen registriert, welche sich aus Netzwerken, Forschungsinstitutionen, Hochschulforschern, KMU, Großunternehmen, Öffentlicher Verwaltung, Finanzinstitutionen, Verbänden/NGOs (Non-governmental organization, zu Deutsch: Nichtregierungsorganisation) sowie Medien/Museen zusammensetzen. Diese sind in einem oder mehreren der verschiedenen Anwendungsfelder tätig:

Tabelle 3 - Anwendungsfelder der Nanotechnologie sowie die Anzahl der Organisationen des jeweiligen Bereichs.

Anwendungsfeld	Anzahl der Organisationen
Chemie/Werkstoffe	669
Maschinen-/Gerätebau	593
Dienstleistungen	519
Gesundheit/Pharma	412
Energie	268
Optik	222
Information/Kommunikation	212
Umwelttechnik	205
Konsumer-Produkte	141
Mobilität	130
Bau	108
Textil	75
Sicherheitstechnik	61

¹⁷ Online verfügbar unter www.nano-map.de. Die angegebenen Daten stammen vom 22.05.2019.

Wie der Tabelle 3 zu entnehmen, stellt der Bereich Chemie/Werkstoffe den größten Teil nanotechnologischer Forschung, Entwicklung und Anwendung, gefolgt vom Maschinen-/Gerätebau. Dies spiegelt die Ergebnisse einer Umfrage des Statistik-Portals „statista“ zu der Frage „Wie hoch schätzen Sie die Marktchancen in verschiedenen Anwendungsbereichen der Nanotechnologie bis 2020 ein?“ wider. Dort gaben die 16 befragten Finanzinstitutionen auf einer Skala von eins (sehr niedrig) bis sechs (sehr hoch) an, dass sie Marktchancen am höchsten für die Chemie (5,1) und die Elektronik (5,1) einschätzen, gefolgt von der Medizin & Pharma (4,9), Optik (4,5) und Umwelt (4,5). Schlusslicht dieser Befragung stellt die Ernährung (2,4) dar.¹⁸ Für den Bereich Chemie kann dies bspw. die (Weiter-)Entwicklung von verbesserten Katalysatoren oder Filter- und Membransystemen sein. [71] Im Bereich Medizin/Pharma wird die Nanotechnologie unter anderem in der Diagnostik und Therapie von Krankheiten dazu verwendet, vermehrt DNA-Chips herzustellen oder effizientere Drug-Delivery Systeme zu ermöglichen. [71] Bereits im Jahr 2013 waren 247 nanomedizinische Produkte zugelassen oder in verschiedenen Stadien von klinischen Studien, und dies vor allem im Bereich der Krebstherapie. [87] Aber auch über diese Branchen hinaus wird die Nanotechnologie in angrenzenden Disziplinen der Forschung und Produktentwicklung häufig dahingehend verwendet, leistungsstärkere und effizientere Resultate zu erzielen, sowohl beim Herstellungsprozess als auch bei dem Produkt an sich.

Diese Auszüge zeigen bereits, dass die Nanotechnologie in Zukunft fortwährend bedeutender für die Wirtschaft weltweit sein wird, denn aktuelle Trends vermuten, dass allein die Anzahl der Beschäftigten weltweit in diesem Bereich sich alle drei Jahre verdoppeln wird. [88] Vor allem für die wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands wird die Nanotechnologie eine bedeutende Rolle spielen. Wie beschrieben, wird der Einfluss auf die Chemiewirtschaft mit am größten eingeschätzt, welche mit einem Gesamtumsatz von etwa 185 Milliarden Euro und rund 447 000 Beschäftigten im Jahr 2016¹⁹ [89] in der chemisch-pharmazeutische Industrie einen der größten Wirtschaftszweige Deutschland stellt. Dies können auch Zahlen im Bereich der nanotechnologischen Patentanmeldungen belegen: Im Jahr 2012 konnten von weltweit insgesamt 8384 Patentanmeldungen etwa 33 % der „Chemie- und Materialtechnik“ zugeordnet

¹⁸ Online verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/515454/umfrage/prognose-zu-den-marktchancen-der-nanotechnologie-in-deutschland-nach-branche/>, zuletzt geprüft am 22.05.2019.

¹⁹ Zahlen sind der Broschüre „Chemiewirtschaft in Zahlen 2017“ [89] entnommen, mit freundlicher Genehmigung des Verband der Chemischen Industrie (VCI) (siehe Anhang A.1.2.).

werden (2768 Patente). Lediglich der Bereich der „Halbleiter, elektrische und optische Systeme“ konnte mehr Patentanmeldungen verzeichnen (etwa 43 %, 3594 Patente). [90]

Der Bereich Forschung und Entwicklung zählt zu einem der großen Punkte der Nanotechnologie. Dies erscheint vor dem Hintergrund des jungen Alters und dem großen Potential dieser Fachdisziplin äußerst logisch. Allein 745 Institutionen der oben angeführten 1908 Organisationen, verzeichnet in der Nanokarte, stammen aus dem Bereich Forschungsinstitute (183) oder der Hochschulforschung (562).²⁰ Über die letzten Jahre nahm daher der Betrag öffentlicher Fördermittel in Deutschland kontinuierlich zu [85] und lag im Jahr 2016 bei etwa 600 Millionen Euro. [82] Damit ist Deutschland europaweit die Nummer eins im Bereich der Nanotechnologie. Dem Verband der Chemischen Industrie (VCI) zufolge, stammt jedes neunte angemeldete Nano-Patent aus Deutschland, nur Japan und die Vereinigten Staaten von Amerika melden mehr an. [91] Dazu belegt Deutschland hinter den USA, China und Japan Platz Nummer vier, wenn es um die Anzahl von veröffentlichten Publikationen im Bereich der Nanotechnologie geht. [91] Weltweit gesehen lag die weltweite jährliche Wachstumsrate in Bereich der Nanotechnologie in den Jahren 2000-2013 bei etwa 16 %. [90]

Konsum, Produkte, Handel und Distribution

Um einen Überblick zu erlangen, in welchen Produkten weltweit Nanomaterialien verwendet werden, wie diese verteilt sind und welche Nanomaterialien genau enthalten sind, entwickelten im Jahr 2005 das „Woodrow Wilson International Center for Scholars“ und das Projekt „Emerging Nanotechnologies“ das „Nanotechnology Consumer Products Inventory (CPI)“. Um in diese Produktliste aufgenommen zu werden, müssen folgende drei Kriterien erfüllt sein:

1. Die Produkte müssen für Kunden einfach zugänglich sein.
2. Von Seiten des Herstellers oder einer anderen Quelle wird darauf hingewiesen, dass Nanomaterialien im Produkt enthalten sind.
3. Die unter 2. genannte Behauptung erscheint dem CPI Auswahlteam begründet. [92]

Laut einer Veröffentlichung aus dem Jahr 2015 umfasst die Datenbank 1814 Produkte für Konsumenten von 622 verschiedenen Firmen in 32 Ländern. [92] Aktuell wurde der Bestand auf 1829 Artikel ausgeweitet,

²⁰ Stand 22.05.2019.

wobei für Deutschland 319 Produkte gelistet sind (Stand Mai 2019²¹). Auch wenn der konstant wachsende Bestand darauf hinweist, dass stetig neue Nanoprodukte auf den Markt kommen, bleiben nicht alle Produkte in der Datenbank erhalten. In den letzten sieben Jahren wurden 34 % des Inventars archiviert, weil diese Produkte für den Konsumenten nicht mehr zur Verfügung standen oder die Behauptung, dass Nanomaterialien enthalten sind, nicht mehr aufrechterhalten werden kann. [92]

In der Datenbank sind hauptsächlich Nanomaterialien vorhanden, die auf Kohlenstoff, Metallen oder Silizium basieren. Teilweise wird die Art des Nanomaterials allerdings nicht angegeben oder es handelt sich um andere als die vorherig genannten. Titandioxid, Siliziumdioxid und Zinkoxid sind, bezogen auf die Masse, die meistproduzierten Nanomaterialien weltweit sind, allerdings werden die meisten der in der CPI Datenbank enthaltenen Produkte mit Silbernanopartikeln beworben, nämlich 438 Produkte (dies entspricht 24 %). [92] In dem häufigsten aller Fälle, 29 % (528 Produkte), sind die Nanomaterialien suspendiert in einer Flüssigkeit (Wasser, Fette) und etwa 17 % (307 Produkte) der Nanomaterialien sind an die Oberfläche von Feststoffen gebunden (unter anderem Lockenstab und Glätteisen, Textilien). [92] Damit erscheint es nicht verwunderlich, dass von 770 betrachteten Produkten 58 % über die Haut mit dem Menschen in Kontakt kommen, wenn sie bspw. in der Kosmetik oder auch in der Oberflächenbeschichtung vorkommen. 25 % der Produkte können durch Inhalation in den menschlichen Körper gelangen (Sprays), 16 % können oral aufgenommen werden (Nahrungsergänzungsmittel, Rachensprays). [92] In den meisten Fällen wird angegeben (31 %), dass die Nanomaterialien aufgrund ihrer antimikrobiellen Wirkung in dem Produkt verwendet werden (vor allem Silber-, aber auch Titandioxid-Nanopartikel), gefolgt von der Anwendung zum Schutz von Oberflächen durch Umwelteinflüsse (15 %). [92]

4.2.2. Ökologische Dimension

Ressourcenschonung versus mögliche negative Einflüsse auf die Umwelt

Der Einsatz von Nanomaterialien kann sich in vielfältiger Weise positiv auf die Umwelt bzw. den Umweltschutz auswirken. Dabei können bspw. nanoporöse Filter zum Einsatz kommen, welche effektiv Trinkwasser reinigen und entkeimen können und dieses von Dioxinen und Schwermetallen befreien. Nanobasierte Photokatalysatoren können Bakterienfilme zersetzen und damit in Schwimmbädern als

²¹ Online verfügbar unter: unter <http://www.nanotechproject.org/cpi/products/> (zuletzt geprüft am 22.05.2019).

Alternative zur Chlorierung eingesetzt werden. Eine Energieeinsparung kann z. B. durch dünne aktive Nanoschichten in Organischen Leuchtdioden (OLEDs) erreicht werden, da diese durch Nanostrukturen wenig elektrische Energie bei gleichzeitig sehr hoher Lichtausbeute benötigen. Wärmedämmung mit polymeren Nanoschäumen hat im Vergleich zu bisherigen Produkten eine verringerte Wärmeleitung und kann damit eine bessere Wärmeisolation erzielen. [93] Diese Beispiele zeigen bereits, dass die Nanotechnologie ein enormes Potential in Bezug auf eine Rohstoff- und Energieeinsparung mit sich bringt, was eine umfangreiche Entlastung und Schonung der Umwelt zur Folge hat. Diesen positiven Entwicklungen und den damit verbundenen Ressourceneinsparungen bzw. –schonung stehen allerdings ungewisse Auswirkungen von Nanomaterialien auf die Umwelt gegenüber.

Durch ihre vermehrte Anwendung in der Industrie, Alltagsprodukten und der Wissenschaft, gelangen die Nanomaterialien als (Abfall-)Produkt immer häufiger in die Umwelt. Die Auswirkungen, die diese künstlich hergestellten Materialien mit ihren besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften längerfristig auf Flora, Fauna und den Menschen haben, sind bislang noch unbekannt. „Zwar gibt es keine eindeutigen Hinweise, dass [die künstlich hergestellten Nanopartikel] eine signifikante Gefährdung für die Umwelt darstellen“ [94, S. 30], das Fehlen eben dieser lässt allerdings nicht auf deren Ungefährlichkeit schließen. [94] Es bestehen in vielen Bereichen Wissenslücken, z. B. in der Umweltanalytik zur Identifikation von Nanopartikeln in Wasser, Böden, Sediment oder Klärschlamm sowie Angaben zum Verbleib und Verhalten in den natürlichen Umweltkompartimenten, da Vorhersagen in diesem Bereich schwierig sind. Ebenfalls sind Fragen zur Ökotoxikologie ungeklärt, da Tests in Laboren meist mit zu hohen Konzentrationen an Modellorganismen durchgeführt werden und diese nicht realitätsgetreu sind. „Bislang gibt es keine ökotoxikologischen Untersuchungen, die im Detail die Mechanismen der Aufnahme, der Verteilung, der Verstoffwechslung und der Ausscheidung von Nanopartikeln erklären könnten.“ [94, S. 31] Auch wenn die Quantität des Eindringens der Nanomaterialien in die Umwelt nicht bekannt ist, ist davon auszugehen, dass sie in Luft, Wasser und Boden vorhanden sind. In der Luft werden sich die Nanopartikel aufgrund von Diffusion von einer höheren zu einer niedrigeren Konzentration begeben, wobei Luftströmungen zusätzlich für einen zügigen Austausch sorgen und sie über weite Strecken tragen. Sobald die Nanopartikel agglomerieren sind sie schwer nachweisbar, da sie sich dann in ihrer Größe kaum von Schwebstaub unterscheiden. Wie schnell es zu einer Deposition auf Wasser, Boden sowie in Pflanzen kommt, hängt stark vom Durchmesser der Partikel ab. [94] Der Verbleib in der Natur hängt stark vom

Umgebungsmedium ab, von deren pH-Wert, dem Salzgehalt oder der Anwesenheit von Natürlich vorkommenden Organischen Materialien (NOM). [94] Im Medium Boden besteht die Annahme, dass sich die Nanopartikel an Feststoffe binden, was auch die geringe Konzentration an Nanopartikeln im Grundwasser erklären würde. Ihre Schädlichkeit hängt dabei davon ab, inwiefern die Nanopartikel mit den NOMs reagieren. [94] Das Verhalten von Nanopartikeln in Wasser kann von der Kolloidchemie abgeleitet werden. Die fein verteilten Flüssigkeiten oder Feststoffe ziehen sich elektrostatisch an und sinken ab einer gewissen Größe aufgrund der Schwerkraft zu Boden. Zu der Anzahl an Eintritten von Nanomaterialien in die Umwelt durch Abwasser und Abfall werden zurzeit Modellberechnungen und Schätzungen genutzt, die der Realität nicht zwangsläufig entsprechen müssen. [94]

Über die Eigenschaften von Silber- und Titandioxidnanopartikel bzw. deren ökotoxische Wirkungen liegen die meisten Studien vor. Für Titandioxidnanopartikel liegen standardisierte Tests vor, die den Einfluss auf Fische, Krebstiere und Algen untersuchen. Da diese Nanopartikel photokatalytisch aktiv sind, können sie unter dem Einfluss von ultravioletter (UV) Strahlung reaktive Sauerstoffspezies (englisch: reactive oxygen species, kurz ROS) formen, welche die Zellmembran von Mikroorganismen schädigen können. Höher entwickelte Lebewesen wie Krebstiere oder Zooplankton scheinen keinen negativen Auswirkungen von Titandioxidnanopartikeln zu unterliegen. Bleiben die Partikel allerdings am Chitinpanzer haften und werden auf die Jungtiere übertragen, so können diese sich nicht häuten und sterben. Dies geschieht bereits bei einer Konzentration von 0,24 mg/Liter Wasser. [94]

„Silberionen aus Silberverbindungen oder [aus Silbernanopartikeln] wirken stark toxisch auf Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze und Algen.“ [94, S. 36] Untersuchungen an Zebrafisch-Embryonen zeigten, dass die Silbernanopartikel im Wasser in die Zellen und das Gehirn gelangen und Herzrhythmus- und Entwicklungsstörungen, Ödeme sowie Nekrosen verursachen. [95] Diese Effekte ergaben sich nur für Silbernanopartikel, allerdings nicht bei Silberionen aus einer Silbernitratlösung. [96]

Ob die ökologischen Vor- oder Nachteile durch die Anwendung von Nanomaterialien überwiegen, lässt sich nur in Betracht des gesamten Lebenszyklus sehen. Auch wenn durch deren Anwendung Ressourcen eingespart werden können, ist dies wenig hilfreich, wenn zu deren Herstellung mehr Energie als für die bisherigen Produkte verwendet wird und damit Abfälle und/oder Emissionswerte steigen. Auch ausgeweitete Untersuchungen zum toxischen Verhalten sind unabdingbar.

Indikatoren für globale (nicht) nachhaltige ökosystemare Entwicklungen

Um eine nachhaltige Entwicklung der Nanotechnologie auf politischer Ebene zu fördern, wurde im Jahr 2006 die NanoKommission, ein Beratungsgremium der Bundesregierung, einberufen. In zwei Beratungsphasen (die erste von 2006-2008 und die zweite von 2009-2011) entwickelten über 100 Experten zu verschiedenen Themenbereichen Leitlinien zum verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien. Dabei kamen Vertreter von Ministerien auf Bundes- und Landesebene, von Bundesoberbehörden, aus der Wissenschaft, Wirtschaft und aus NGO-Gruppen (Gewerkschaften, Umwelt- und Verbraucherorganisationen, Kirchen und ein Frauenverband) zusammen. [97] In der ersten Arbeitsphase gab es drei Arbeitsgruppen: „Nanotechnologien – Chancen für Umwelt und Gesundheit“ [93, S. 25], „Risiken und Sicherheitsforschung“ [93, S. 36] sowie „Prinzipien für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien“ [93, S. 52]. Diese arbeiteten Kriterien aus, welche einen Klimaschutzbeitrag, Energie- und Ressourceneffizienz, eine Substitution von umweltgefährlichen Stoffen, eine Reduktion von umweltgefährdenden Stoffen sowie eine Erhöhung der Sicherheit fördern sollten. [93]

Die NanoKommission richtete 2010 die Arbeitsgruppe „Nachhaltige Nanotechnologie/green nano“ ein, welche vier Designprinzipien entwickelte, um Rahmenbedingungen für eine grüne Nanotechnologie zu ermöglichen und voranzutreiben. Diese umfassen

1. „die Biomimetik: Nutzung lokaler Stoff- und Energiequellen, Selbstorganisation als Herstellungsprinzip, möglichst physiologische Herstellungsbedingungen [...],
2. die Risikoarmut: Vermeidung und Minderung von gefährlichen Strukturen, Morphologien, Stoffen, Funktionalitäten sowie von Expositionsmöglichkeiten,
3. die Energie- und Umwelttechnik: Emissionsminderung, Umweltmonitoring und -Sanierung sowie der Umstieg auf regenerative Stoff- und Energiequellen und
4. die Ressourceneffizienz: Vermeidung/Minimierung von Nebenreaktionen, Abfällen und Emissionen, geringe Materialintensität, Energieeffizienz über den Lebenszyklus und die Kreislauffähigkeit“ [97, S. 11f]

„Ziel eines solchen Leitbildes ist es, bereits im Forschungs- und Entwicklungsprozess Schwerpunkte im Sinne der Nachhaltigkeit und des Vorsorgeprinzips zu setzen, um gesellschaftlich tragfähige Innovationen zu unterstützen.“ [97, S. 12] Das Verlangen nach einem Vorsorgeprinzip ist bei der Weiterentwicklung und

Etablierung neuer Technologien ein äußerst wichtiger Punkt, der in den letzten Jahrzehnten teilweise zu wenig Beachtung fand. Dies führte in der Vergangenheit dazu, dass neue Materialien bzw. Innovationen wie Asbest, nukleare Energiequellen oder DDT eine breite Anwendung fanden, deren Reduktion oder Entsorgung die Menschheit allerdings bis in die Gegenwart vor (so scheint es, fast unlösbare) Herausforderungen stellt. Im Idealfall geht es darum, solche Fehler aus der Vergangenheit nicht zu wiederholen und eine sichere und vor allem nachhaltige Strategie augenblicklich bei der Entwicklung neuer Technologien zu etablieren, um bei deren Realisierung das Wohl der Menschen und der Natur nicht aus den Augen zu verlieren. Die Designprinzipien der NanoKommission sollen hierbei als Orientierungshilfe und nicht als Regeln verstanden werden, da es kaum möglich sein wird, alle Punkte gleichermaßen zu berücksichtigen, da sie sich teilweise sogar widersprechen. [98]

4.2.3. Soziale Dimension

Gesundheitliche Aspekte für den Menschen

Wie unter Kapitel 4.2.1 beschrieben, finden Nanomaterialien einen vermehrten Einsatz in der Industrie aber vor allem auch im Alltag. Mit über 1900 Produkten, die den Konsumenten weltweit zur Verfügung stehen, ist die Wahrscheinlichkeit des Inkontaktkommens mit Nanomaterialien hoch. Dabei erfolgt in über der Hälfte von 770 untersuchten Produkten der Kontakt über die Haut, kann allerdings auch inhalativ oder oral erfolgen. Die Frage ist nun, ob es Nanopartikeln gelingt, in die Blutbahn des Körpers vorzudringen und was dort mit ihnen geschieht und welchen Einfluss sie auf den Organismus ausüben. Generell stehen in dem Bereich der Nanotoxikologie bisher wenige Daten zur Verfügung, da die Entwicklung und Vermarktung von Nanomaterialien schneller vorangeht als das Wissen und die Regulierung zu potenziellen Gesundheits- oder Umweltrisiken, die mit deren Herstellung und Anwendung einhergehen. [99] Meist sind die Wirkungen der Materialien auf molekularer und stofflicher Ebene bekannt. Im Nanometerbereich ändern sich allerdings aufgrund des großen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses deren chemische und physikalische Eigenschaften, sodass von den bekannten Auswirkungen meist nicht auf die Eigenschaften in der Nanodimension geschlossen werden kann. [100] Eine ausgewählte Übersicht über verschiedene Studien zu diesem Bereich ist bei MAGDOLENOVA et al. [101] einzusehen.

Bisher konnte nicht nachgewiesen werden, dass Nanopartikel über die gesunde Haut ins Blut aufgenommen werden. Allerdings gibt es Hinweise darauf, dass die Nanopartikel an den Haarfollikeln, also in den

Hauttaschen der Haarwurzel, hängen bleiben. [102] Durch das Haarwachstum werden die Haarfollikel geöffnet, sodass die Nanopartikel tiefer ins Gewebe eindringen können. Ob Nanopartikel durch verletzte Haut ins Gewebe eindringen, ist bisher ungeklärt. [102] Inhalativ können diese über die Atemwege oder die Bronchien, Bronchiolen und Alveolen aufgenommen werden. Mit insgesamt einer Fläche von etwa 140 m² bietet die Lunge eine große Expositionsfläche. Die Atemwege stellen mit ihrer Epithel- und der zähflüssigen Mucusschicht (Luft-Blut-Gewebeschanke) eine robuste Barriere da. Die Schicht zwischen der Alveolenwand und den Kapillaren ist sehr dünn, sodass in Tierversuchen gezeigt wurde, dass die Nanopartikel in diese und damit in den Blutkreislauf eindringen können. [103] Dort können bspw. Kohlenstoff- und Titandioxidnanopartikel (in einem Größenbereich von 20 nm) Entzündungsreaktionen hervorrufen. Unlösliche Nanopartikel blieben „[...] in Tierversuchen über Monate bis Jahre in Bronchien und Alveolen deponiert“ [102, S. 10] und „[...] nach 7 Tagen in der Leber, Milz, Gehirn, Nieren, Herz und Knochenmark [wiedergefunden]“ [102] S. 10 werden. Über die Aufnahme über den Magen-Darm-Trakt liegen noch weniger Studien vor, als über die der Haut oder der Lunge. Schätzungen ergeben, dass täglich etwa 1000 Nano- und Mikropartikel oral aufgenommen werden, „[...] wobei es sich größtenteils um Silikate und Titandioxid handelt.“ [102, S. 11] Allerdings sind keine Studien zum Verbleib im Magen-Darm-Trakt vorhanden. [102] Zusammenfassend lässt sich also zu den möglichen Eintrittswegen festhalten, dass die gesunde Haut nach dem derzeitigen Stand des Wissens eine sichere Barriere gegen das Eindringen von Nanopartikeln darstellt. Die Aufnahme durch das Einatmen von Nanopartikeln könnte ein mögliches Risiko darstellen, über die Aufnahme über den Magen-Darm-Trakt können keine gesicherten Aussagen getroffen werden.

Sind die Nanopartikel nun in die Zelle eingedrungen, können verschiedene Mechanismen ablaufen. Zum einen können sie freie Radikale in den Zellen bilden und damit für einen oxidativen Stress sorgen. [102] Des Weiteren wird diskutiert, ob sich Nanopartikel direkt an die DNA in den Zellen anlagern können und eine genotoxische Wirkung entfalten. [102] Dies gilt selbstverständlich nicht für alle Sorten von Nanopartikeln gleichermaßen, sodass nicht generell von einer toxischen Wirkung ausgegangen werden kann. [104]

Im Gegensatz zu diesen fehlenden Studien zum Verbleib und Verhalten von Nanopartikeln im menschlichen Körper, sind viele positive Auswirkungen für den Menschen bekannt. Silbernanopartikel bieten bspw. aufgrund ihrer hohen antimikrobiellen Wirkung ein bedeutendes Potenzial für den

medizinischen und biotechnologischen Bereich. Dies kann vor allem vor dem Hintergrund stetig zunehmender Resistenzen gegen Antibiotika von Bedeutung sein, denn die Aktivität der Silbernanopartikel ist schon ab einer niedrigen Konzentration, welche für die menschlichen Zellen ungefährlich ist, höchst effektiv. Erste Studien zu Resistenzen gegen Silbernanopartikel zeigen allerdings bereits, dass Bakterien, die wiederholt mit der Hemmkonzentration von Silbernanopartikeln ausgesetzt werden, ebenfalls eine Resistenz gegen deren antibiotische Aktivität entwickeln. Die Mechanismen dieser Resistenz sind ebenfalls Teil von Studien, welche bereits erste Ansätze zum Umgehen dieser Resistenzen entwickelt haben. [105]

In der Medizin eröffnen Nanopartikel darüber hinaus die Möglichkeit, effizientere Drug Delivery-Systeme für die Behandlung komplexer Krankheiten zu entwickeln. [6] Da die Wege von Nanopartikeln in die und aus der Zelle bisher noch nicht ausreichend erforscht sind und deren Biosicherheit damit nicht gegeben ist, ist deren klinischer Einsatz bisher noch erheblich eingeschränkt. Erste Ergebnisse von Studien ergaben, dass die Effektivität der Nanopartikel, in die Zelle zu gelangen und wieder aus ihr auszutreten, stark mit der Größe, Form und Ladung der Partikel korreliert: je kleiner, desto effektiver, sphärische Formen werden vor zylindrischen bevorzugt und positiv geladene Nanopartikel zeigen höhere Raten der Endozytose als negativ oder neutral geladene Partikel. [106] Um das volle Potenzial der Nanotechnologie entfalten zu können und um Risiken in der Anwendung von Nanomaterialien, z. B. bei den Drug Delivery-System zu minimieren, ist es unabdingbar, dass die Nanotoxikologie weiterentwickelt und standardisiert wird. [102, 106] Die Erforschung potenzieller Effekte auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit werden noch eine lange Zeit in der Zukunft fortgesetzt werden (müssen). [92]

Gesellschaftlicher Nutzen

Die Nanotechnologie hat das Potenzial, viele Bereiche des alltäglichen Lebens positiv zu beeinflussen. Die Entwicklungen in den verschiedensten industriellen Bereichen können sowohl die Lebensqualität von Produkten erhöhen als auch völlig neue Möglichkeiten bspw. im Bereich der Halbleitertechnik ermöglichen. Das BMBF listete bereits im Jahr 2013 zehn bedeutende Markt- und Anwendungsbereiche:

Tabelle 4 - Anwendungsbereiche der Nanotechnologie sowie zugehörige Beispiele. [85]

Bereiche	Beispiele
Medizintechnik und Pharmazie	Verbesserung der Aufnahme und Bioverfügbarkeit von Wirkstoffen
Metall- und Keramikwerkstoffe	Keramische Hochleistungsbeschichtungen und nanoskalige keramische Pulver, metallische Nanopartikel für leitfähige Tinten, Kleber, antibakterielle Zusätze
Optik/Photonik	Bauteile für optische Daten- und Telekommunikation
Umwelttechnik	Membranfiltration, Umweltkatalyse
Automobil	Nano-imprägnierte Sitzpolster, OLED-basierte Beleuchtungssysteme
Chemie	Herstellung und Verarbeitung von Nanomaterial
Elektronik	Miniaturisierung der Strukturen: Erhöhung der Integrationsdichte
Energie	Solarzellen, elektrochemische Energiespeicher, Brennstoffzellen, Thermoelektrika
Sensorik und Messtechnik	Mikroelektromechanische Systeme
Maschinenbau	Reduktion von Reibung und Verschleiß durch nanoskalige Beschichtungen und Oberflächen

Der potenzielle gesellschaftliche Nutzen der Nanotechnologie scheint unermesslich groß zu sein, da sie fast in jedem Bereich des Lebens eingesetzt werden kann.

Rechtliche Rahmenbedingungen

Bisher ist kein eigenes „Nanogesetz“ vorhanden, welches die Verarbeitung, die Herstellung, das Inverkehrbringen oder auch die Entsorgung dieser Materialien verbindlich regelt. Mit der verstärkten Produktion in den letzten Jahrzehnten sind allerdings parallel Richtlinien und Prinzipien auf verschiedenen Ebenen entstanden sowie Kennzeichnungspflichten der Europäischen Union herausgegeben worden.

Einen ersten nationalen Schritt ging die Arbeitsgruppe 3 der oben bereits angeführten NanoKommission, welche in der ersten Phase, also in den Jahren 2006-2008, Prinzipien für einen verantwortungsvollen Umgang mit Nanomaterialien entwickelte, die zu einer nachhaltigen Entwicklung der Nanotechnologie beitragen sollten. Diese ergänzen die regulativen Maßnahmen der Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)-Verordnung. [97]

Die REACH-Verordnung selbst enthält keine spezifischen Anforderungen an Nanomaterialien, es wird davon ausgegangen, dass ein Stoff, der in dieser Datenbank katalogisiert ist, in allen seinen

Erscheinungsformen als ungefährlich bzw. als gefährlich einzustufen ist. [107] Daher erscheint es sinnvoll, diese um Empfehlungen und Richtlinien zu ergänzen. Zu diesem Zweck veröffentlichte die Europäische Kommission 2011 Empfehlungen zur Definition von Nanomaterialien, in der beschrieben wird, ab wann ein Stoff als Nanomaterial gilt und wie dieses zu spezifizieren ist. [108] Aufbauend auf der REACH-Verordnung und der Empfehlung der Europäischen Union, veröffentlichten im Jahr 2013 das Umweltbundesamt, das Bundesinstitut für Risikoforschung (BfR) und die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) einen Bericht, welcher die Position der deutschen Bundesbehörden zu **Nanomaterialien und REACH beleuchtet. Dabei soll es vor allem als „Grundlage dienen, um Entscheidungswege für politische Prozesse und Antworten auf Anfragen von Außenstehenden (z.B. Abgeordneten oder NGOs) vorzubereiten.“** [107] Hierbei werden die Bestrebungen der Europäischen Union sowie der REACH-Verordnung begrüßt und deren Definitionen anerkannt, es wird allerdings auch kritisch angemerkt, dass noch keine standardisierten Verfahren und Methoden zur Charakterisierung von Nanomaterialien vorhanden sind und die Erweiterung der REACH-Verordnung explizit für Nanomaterialien als sinnvoll erachtet wird. [107] Auch einige Herstellerfirmen sowie Branchenverbände, wie bspw. der Verband der Chemischen Industrie, entwickelten bereits zu Beginn der verstärkten Entwicklung von Nanomaterialien eigene selbstregulatorische Steuerungsmaßnahmen. Darüber hinaus arbeiteten sie verstärkt mit Akteuren auf politischer Ebene zusammen, sodass in diesem Zusammenhang *„[...] von einer kooperativen und selbstregulatorischen strategischen Ausprägung gesprochen werden [kann].“* [109, S. 125] Auch auf internationaler Ebene gewann bzw. **gewinnt das Thema „Nanosicherheit“ an Bedeutung. Mit dem „Handbook of Nanosafety“ erschien im Jahr 2014 von VOGEL et al. eine Publikation, die im umfangreichen Maße Messmethoden, Expositionspfade sowie Fragen der Toxizität von Nanomaterialien darstellt.** [110] Darüber hinaus wird dort zusätzlich die Wichtigkeit einer routinierten Risikobewertung sowie dessen Management in der Herstellung sowie Anwendung von Nanomaterialien unterstrichen. [88]

Auch wenn es keine Gesetze im Bereich des Einsatzes von Nanomaterialien gibt, so sind doch seit einigen Jahren Kennzeichnungspflichten für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union vorhanden, die bei dem Inverkehrbringen von Produkten mit Nanomaterialien beachtet werden müssen. Nach der Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom November 2009 über kosmetische Mittel gilt seit dem 11. Juli 2013 beim Inverkehrbringen von Kosmetika, die Nanomaterialien enthalten, in

der Liste der Bestandteile das Wort „Nano“ in Klammern bei dem jeweiligen Bestandteil anzuführen (Art. 19 Abs. 1 lit. g Kosmetik-Verordnung, Art. 40 Abs. 2 Kosmetik-Verordnung [111]). Für Lebensmittel gilt nach Verordnung (EU) Nr.1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom Oktober 2011, dass **„[a]lle Zutaten, die in Form technisch hergestellter Nanomaterialien vorhanden sind, [...] im Zutatenverzeichnis eindeutig aufgeführt werden [müssen]. Auf die Bezeichnung solcher Zutaten muss das in Klammern gesetzte Wort „Nano“ folgen.“** (Art. 18 Abs. 3 Lebensmittelkennzeichnungs-Verordnung [112, S. 31]) Diese Verordnung trat zum 13. Dezember 2014 in Kraft, entlang aller Etappen der Lebensmittelkette (Art. 55 und Art. 1 Abs. 3 Lebensmittelkennzeichnungs-Verordnung [112]). Gleiches gilt für Biozidprodukte, denn nach Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates **muss ebenfalls das Wort „Nano“ als Hinweis auf Produkten angeführt werden, wenn Produkte Nanomaterialien enthalten und/oder sich aus deren Anwendung spezifische Risiken ergeben** (Art. 69 Abs. 2 lit. b Biozidprodukt-Verordnung [113]). Darüber hinaus muss das Risiko für die Gesundheit von Mensch, Tier und Umwelt, das von Biozidprodukten, die Nanomaterialien enthalten, ausgehen kann, separat bewertet werden (Art. 19 Abs. 1 lit. f Biozidprodukt-Verordnung [113]) und deren Zulassung darf nicht auf einem vereinfachten Weg erfolgen (Art. 25 lit. c [113]). Diese Verordnung wurde im Mai 2012 verabschiedet und trat am 01. September 2013 in Kraft (Art. 97 Biozidprodukt-Verordnung [113]). Die Kennzeichnungspflicht für Produkte mit Nanopartikeln hat im europäischen Raum in den letzten Jahren stetig zugenommen und wird sich vermutlich für weitere Bereiche ausweiten.

Globale Gerechtigkeit

Um eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten, spielt die globale Gerechtigkeit eine bedeutende Rolle. Das heißt die Entwicklung nanotechnologischer Innovationen sollte nicht auf Kosten bestimmter Personengruppen oder Länder erfolgen und die Produkte sollten möglichst allen zugänglich gemacht werden. Im Fall der Nanotechnologie liegt hier bisher ein Ungleichgewicht vor. Dem CPI ist zu entnehmen, dass zwar über 1900 Produkte für Konsumenten zugänglich sind, diese sich allerdings auf lediglich knapp 30 Länder der Welt beschränken. Bei etwa 200 Ländern der Welt ergibt dies gerade einmal eine weltweite Verfügbarkeit von etwa 15 %, sodass hier lange nicht von einer gerechten Verteilung gesprochen werden kann. Durch die Anmeldung von Patenten in den Industrieländern kann es zudem zu einer stärkeren Abhängigkeit der Entwicklungsländer von ebendiesen kommen. Alleine diese beiden Beispiele zeigen

deutlich, dass es einen hohen Diskussions- und Handlungsbedarf gibt, wenn es um die globale Gerechtigkeit und nanotechnologische Entwicklung geht.

4.3. Bedeutung der Nanotechnologie für den Bildungssektor

Die Ausführungen des vorherigen Kapitels belegen den hohen Stellenwert der Nanotechnologie für sowohl die heutige als auch kommende Generation, vor allem auch in Deutschland. Mit dem vermehrten Einsatz von Nanomaterialien im Alltag sowie in der Wissenschaft und Forschung steigt sowohl die Wirtschaftskraft dieses Sektors als auch die Möglichkeit, mit diesen Produkten **oder auch mit dem Begriff „Nano“** in Kontakt zu kommen. Dies zeigt zum einen, dass in den nächsten Jahren ein erhöhter Bedarf an Fachkräften in dem Bereich der Nanotechnologie benötigt werden wird und verlangt auf der anderen Seite eine flächenweite Aufklärung über den Einsatz von Nanomaterialien. Für beide Aspekte ist die Bildung ein essentieller Bestandteil: Erlernen die Schüler bereits im schulischen Rahmen fachliche Hintergründe der Nanotechnologie, so können sie einerseits deren Verwendung in Produkten nachvollziehen und daraus gegebenenfalls Konsequenzen für ihren Konsum ziehen und andererseits bereits sehr früh ein Interesse für eine mögliche Berufswahl in diesem Feld entwickeln. Hierzu ist es unabdingbar, dass die Forschung im Bereich der Nanoscience Education²² ausgeweitet wird, dass Standards sowie Kursdesigns entwickelt werden, die eine Implementierung der Nanotechnologie in den formellen sowie informellen Bildungsbereich ermöglichen. [90, 114] Dies sollte über die Vermittlung rein fachlicher Komponenten hinausgehen, damit die Schüler bzw. Bürger über Risiken, Nutzen sowie soziale und ethische Aspekte der Nanotechnologie informiert werden und aktiv an Diskussionen bzw. Entscheidungen partizipieren können. [114, 115]

Trotz der aktuellen und zukünftigen Bedeutung der Nanotechnologie für den Alltag und die Wissenschaft, spielt die Nanotechnologie im Bildungssektor eine untergeordnete bzw. kaum eine Rolle. Eine Analyse der Kerncurricula bzw. der Bildungspläne des Faches Chemie für die Sekundarstufe I und II des Gymnasiums der 16 deutschen Bundesländer zeigt, dass die Nanotechnologie nur in sechs Bundesländern in der

²² An dieser Stelle wird der englische Begriff „Nanoscience Education“ verwendet, da dieser zum einen auf der internationalen Ebene verbreiteter ist und zum anderen ein adäquater Ausdruck für den deutschen Begriff der Behandlung der Nanotechnologie in formellen und informellen Bildungsbereichen darstellt.

Sekundarstufe I und in fünf Bundesländern in der Sekundarschule II erwähnt wird (siehe Tabelle 5, Stand Mai 2018).

Tabelle 5 - Erwähnung der Nanotechnologie im jeweiligen Bundesland des Chemiecurriculums bzw. Bildungsplan Chemie in der Sekundarstufe I (Sek I) bzw. der Sekundarstufe II (Sek II).²³

	BW	BY	BE	BB	HB	HH	HE	MV	NI	NW	RP	SL	SN	ST	SH	TH
Sek I	x	-	x	-	x	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x
Sek II	x	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	x	x

Dabei wurde ein Bundesland bereits gezählt, wenn der Begriff Nanotechnologie lediglich einmal in dem Curriculum vorkommt, wie z. B. im Berliner Rahmenlehrplan für die Sekundarstufe I – Chemie. Dort wird für die Klasse 7/8 im Wahlbereich das Thema „Kohlenstoff – von weich bis megahart“ vorgeschlagen, in dessen Kontext die Schüler „[...] Fullerene als weitere Erscheinungsform des Kohlenstoffs mit Anwendungsmöglichkeiten in der Nanotechnologie [kennzeichnen sollen].“ [119, S. 31] Zu einer detaillierten Aufstellung der Nanotechnologie innerhalb des Curriculums des jeweiligen Bundeslandes sei an dieser Stelle auf die Dissertation von WILKE verwiesen ([78] S.31ff).

Die geringe Präsenz innerhalb der Curricula deutet darauf hin, dass die Nanotechnologie den Curricula-Entwicklern bisher zu wenig präsent ist oder Schwierigkeiten bestehen, diese ins Curriculum zu integrieren. Die vier größten (pädagogischen) Herausforderungen für die Etablierung einer Nanoscience Education nach JONES et al. [114] sind demnach (1) die Entwicklung von Standards zur Vermittlung der Nanotechnologie, (2) der Bedarf an Curricula sowie Unterrichtsmaterialien, (3) der Bedarf an Lehreraus- bzw. Lehrerfortbildungen sowie (4) die Entwicklung von Konzepten für den informellen Bildungsbereich für Museen und Wissenschaftszentren. Befragungen von Lehrkräften ergaben, dass neben der mangelnden **materiellen Ausstattung der Schule für das Thema „Nano“** und der eigenen Unkenntnis in diesem Bereich [143], **die Stofffülle des Curriculums und der damit verbundene Zeitmangel für „Extrathemen“** mit als die größte Hürde wahrgenommen wird. [78] Eine Implementierung in den schulischen Kontext erscheint vor diesem Hintergrund daher nur dann möglich, wenn fachliche Inhalte der Nanotechnologie mit Inhalten des

²³ Abkürzungen der Bundesländer sowie deren Quellen: BW = Baden-Württemberg [116, 117], BY = Bayern [118], BE = Berlin [119, 120], BB = Brandenburg [121, 122], HB = Bremen [123, 124], HH = Hamburg [125, 126], HE = Hessen [127, 128], MV = Mecklenburg-Vorpommern [120, 129, 130], NI = Niedersachsen [131, 132], NW = Nordrhein-Westfalen [133, 134], RP = Rheinland-Pfalz [135, 136], SL = Saarland [137, 138], SN = Sachsen [139], ST = Sachsen-Anhalt [140], SH = Schleswig-Holstein [141], TH = Thüringen [142].

Curriculums direkt verknüpft bzw. anhand dessen erarbeitet werden können. Erste theoretische sowie unterrichtspraktische Konzepte wurden hierzu bereits im Jahr 2009 entwickelt. Die National Science Teachers Association veröffentlichte hierzu die „The Big Ideas of Nanoscale Science & Engineering – A Guidebook for Secondary Teachers“, welche neun essentielle Themenschwerpunkte beleuchtet, die im Unterricht der 7.-12. Klasse behandelt werden sollten. [144]

Die Ideen der Verknüpfung nanotechnologischer Inhalte mit den Inhalten des Curriculums wurden sowohl auf internationaler als auch nationaler Ebene weiterentwickelt und teilweise für das jeweilige landesspezifische Chemiecurriculum ausdifferenziert. Diese sind unter anderem bei SAKHNINI und BLONDER (Israel) [145, 146] oder WILKE (Deutschland) [78] zu finden. Dort werden jeweils konkrete Inhalte genannt, anhand derer die Nanotechnologie thematisiert werden kann. So bietet bspw. die Entwicklung eines Rasterkraftmikroskops sowohl die Chance, sich mit nanoskaligen Strukturen zu beschäftigen, als auch generell die Motivation an naturwissenschaftlichen bzw. nanotechnologischer Inhalten auseinander zu setzen. [147] WILKE entwickelte darüber hinaus für den deutschsprachigen Raum Kompetenzen, die Schüler im Rahmen einer Nanoscience Education aufweisen sollen, wobei viele Parallelen zu den „big ideas“ zu finden sind. [78]

Die genannten Beispiele zeigen, dass in den letzten Jahren der Ausbau einer Nanoscience Education gewachsen ist. Die geringe Verankerung in den deutschen Chemiecurricula bzw. Bildungsplänen zeigt jedoch deutlich, dass ein hoher Bedarf an einer weiteren Entwicklung dieses Bereiches besteht oder auch andere Wege gefunden werden müssen.

5. Entwicklung von Experimenten in Bezug zur Nanotechnologie und Nachhaltigkeit

Aufbauend auf den präsentierten theoretischen Überlegungen wird in dem folgenden Kapitel herausgearbeitet, dass die BNE ein geeigneter Katalysator sein kann, um die Nanotechnologie in den Chemieunterricht zu implementieren und inwiefern Kompetenzen einer BNE mithilfe der Nanotechnologie gefördert werden können. Anschließend wird erarbeitet, welche Kriterien für eine erfolgreiche Implementierung von geeigneten Experimenten erfüllt sein sollten, um abschließend konkrete experimentelle Beispiele vorzustellen.

5.1. Nanotechnologie als Thema einer BNE für den Chemieunterricht

Die Fachdisziplin Chemie kann im Allgemeinen einen umfangreichen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten. Durch bspw. die Entwicklung von effektiveren Synthesewegen oder Produktion von Gütern kann eine enorme Ressourceneinsparung erzielt werden. Auch zur Trinkwasseraufbereitung und der Sicherstellung einer weltweiten Lebensmittelversorgung leistet die Chemie ihren Anteil. Die Chemie ist also ein wichtiger Faktor für die Wirtschaft und für die Gesellschaft. Jedoch gerade gesellschaftlich wird der „Einsatz von Chemie“ meist eher negativ wahrgenommen. [148–150] Chemie- bzw. Umweltkatastrophen sowie Themen wie Gentechnologie oder Trinkwasserverunreinigung durch Nitrate aus Düngemitteln verstärken den negativen Eindruck dieses Feldes. Dies unterstreicht die Bedeutung für einen bewussten und nachhaltigen Umgang mit „Chemie“ umso deutlicher. Und hier kann gerade der Chemieunterricht einen bedeutenden Teil dazu beitragen, da er aufzeigen kann, wo und warum Chemie im alltäglichen Leben und in der Gesellschaft mit welchen Folgen verankert ist.

In diesem Kontext birgt das Thema „Nanotechnologie“ ein enormes Potential. Wie in Kapitel 4.2 ausführlich dargestellt, berührt die Nanotechnologie die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit im äußerst hohen, umfangreichen Maße. Sowohl für die Ökonomie, die Ökologie als auch für den sozialen Bereich stellt die Nanotechnologie einen wichtigen Faktor dar. Damit erfüllt sie bereits einen essentiellen Bestandteil, um im Chemieunterricht im Kontext einer BNE vermittelt zu werden. Darüber hinaus erfüllt die Nanotechnologie sowohl die vier Kriterien für eine BNE-Themenwahl nach DE HAAN (siehe Kapitel 3.4, im Folgenden fettgedruckt dargestellt) sowie die 12 in Tabelle 2 genannten Teilkompetenzen der Gestaltungskompetenz (siehe Kapitel 3.3, im Folgenden kursiv dargestellt).

Allein durch die Vielzahl an angeführten Verknüpfungen zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (siehe Kapitel 4.2) stellt die Nanotechnologie ein zentral lokales sowie globales Thema für nachhaltige Entwicklungsprozesse dar. Sowohl auf lokaler als auch auf globaler Ebene wird das Potenzial der Nanotechnologie für eine nachhaltige Entwicklung äußerst hoch eingeschätzt. Durch nanoporöse Filtersysteme kann bspw. auf lokaler Ebene die Trinkwasseraufbereitung verbessert werden, effizientere Solarzellen sichern den Energiebedarf. Letzteres kann ebenso zu einer Verbesserung der globalen Energiebilanz beitragen. Weitere globale Perspektiven können auch in Bezug auf eine gerechtere Verteilung bzw. einem gleichberechtigten Zugang zu Nanomaterialien weltweit eröffnet werden. Da nach dem CPI Menschen in nur knapp 30 Ländern der Welt Produkte mit Nanomaterialien frei erwerblich zur Verfügung stehen, bietet dies das Potential, die *Kompetenz zum moralischen Handeln* (Teilkompetenz E.2) zu fördern, um die Gerechtigkeit als Entscheidungs- und Handlungsgrundlage nutzen zu können. Wird eine gerechtere Verteilung angestrebt, so wird dies maßgeblich Entscheidungsprozesse in der Entwicklung der Nanotechnologie beeinflussen. Gleiches gilt, wenn es auf der lokalen Ebene um die Reflektion des eigenen Handelns geht, da dies einen Einfluss auf sowohl das lokale Umfeld als auch nationale bzw. globale Gefüge haben kann. In diesem Kontext ist es unerlässlich, dass die Schüler die *Kompetenz zur Reflexion auf Leitbilder* (Teilkompetenz E.1) vertiefen.

In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung der Nanotechnologie allein für die Wirtschaft rasant zugenommen (siehe Kapitel 4.2.1) und sie wird über die nächsten Jahre vermutlich weiter steigen. Aber nicht nur mit ihrer kontinuierlichen Weiterentwicklung trägt die Nanotechnologie zu einer längerfristigen Bedeutung bei. Auch wenn deren Einsatz mit sofortiger Wirkung verboten werden würde, befinden sich inzwischen künstliche Nanomaterialien in einem so umfangreichen Maße in (Natur-)Kreisläufen, dass in diesem Fall die Entsorgung für die nächsten Jahrzehnte eine Rolle spielen würde. Vor allem die langfristigen Auswirkungen von Nanomaterialien auf den Menschen und die Natur sind unzureichend erforscht, sodass diese Perspektiven, neben den vielen Chancen, die die Nanotechnologie bietet, über einen längeren Zeitraum analysiert werden müssen. Hierzu ist es unabdingbar, dass *die Kompetenz zur Antizipation* (Teilkompetenz T.2) gefördert wird, um mögliche Folgen der Nanotechnologie bereits bei der Entwicklung abzuschätzen und zu berücksichtigen.

Wer sich mit der Nanotechnologie intensiver auseinandersetzt, wird unmittelbar feststellen, dass zu diesem Themenkomplex eine Vielzahl an unterschiedlichen Perspektiven besteht. Seien es Medien oder Behörden, Wissenschaftler oder Ärzte: Aus den unterschiedlichsten Bereichen lassen sich Standpunkte verschiedener Interessensgruppen finden, die zu einer Differenziertheit des Wissens beitragen. Um diese Fülle an Wissen allerdings verarbeiten zu können, spielt die *Kompetenz zur Perspektivübernahme* (Teilkompetenz T.1) eine entscheidende Rolle. Für Schüler kann dies mithilfe von Planspielen erfolgen, wenn die Möglichkeit geboten wird, neue oder andere Perspektiven in ihr eigenes Wissen zu integrieren. Planspiele bieten ebenfalls das Potential, das Wissen über Nicht-Wissen zu fördern, wenn es bspw. um die Einschätzung der Risiken von Nanomaterialien geht, hierbei keine eindeutigen Befunde vorliegen und dennoch Entscheidungen getroffen werden müssen. Dies trägt maßgeblich zur Förderung der *Kompetenz zum Umgang mit unvollständigen und überkomplizierten Informationen* (Gestaltungskompetenz T.4) bei und kann darüber hinaus die *Kompetenz zur Bewältigung individueller Entscheidungsdilemmata* (Teilkompetenz G.2) fördern. Werden Chancen und Risiken der Nanotechnologie im Chemieunterricht thematisiert, wird augenblicklich deutlich, dass in diesem Kontext Aspekte anderer Fächer neben den Naturwissenschaften wie Politik, Ethik oder Geographie mit in die Diskussion einbezogen werden müssen. In diesem Zusammenhang können *Kompetenzen zur disziplinübergreifenden Erkenntnisgewinnung* (Teilkompetenz T.3) gefördert werden. Durch den Austausch mit anderen Personen, sowohl innerhalb einer Gruppe als auch zwischen unterschiedlichen Parteien, kann die *Kompetenz zur Kooperation* (Teilkompetenz G.1) gefördert werden und letztendlich erstrebenswerter Weise erreicht werden, dass durch die aktive Auseinandersetzung mit dem Thema Nanotechnologie die *Kompetenz zur Partizipation* (Teilkompetenz G.3), also der Teilhabe an kollektiven Entscheidungsprozessen, gestärkt wird.

Der Aspekt des Handlungspotentials scheint zunächst keine offensichtliche Verbindung zur Nanotechnologie zu haben, da Diskussionen und Entscheidungen diesbezüglich meist von Experten geführt bzw. getroffen werden. Der Laie hat damit kaum Möglichkeiten, über den Einsatz von Nanomaterialien bspw. in Sonnencreme mitzuentcheiden. Würde der Kauf von Sonnencreme mit Nanopartikeln aufgrund von möglichen Gesundheitsrisiken allerdings komplett boykottiert werden, so könnte dieses Druck auf die Industrie oder Wissenschaft ausüben, weiter in diesem Bereich zu forschen. Dazu ist es unabdingbar, dass die Bevölkerung über den Einsatz von Nanomaterialien in Alltagsprodukten informiert und aufgeklärt wird. Das Handlungspotential würde in diesem Fall vorrangig darin bestehen, das Umfeld sowie die gesamte

Gesellschaft aktiv mit diesem Thema zu konfrontieren. Essentiell ist es an dieser Stelle, dass die *Kompetenz zur Motivation* (Teilkompetenz G.4), die *Kompetenz zur Unterstützung anderer* (Teilkompetenz E.4) sowie die *Kompetenz zum eigenständigen Handeln* (Teilkompetenz E.1) gefördert werden, damit trotz der schwierigen Ausgangslage, sich Schüler befähigt fühlen, Veränderungen zu bewirken. Im schulischen Kontext wäre es zunächst daher notwendig, Informationen zu präsentieren oder von den Schülern recherchieren zu lassen, diese zu verarbeiten und im Rahmen von z. B. Podiumsdiskussionen oder Schulaktionen die eigenen Handlungsmöglichkeiten zu reflektieren.

Die angeführten Beispiele zeigen deutlich, dass die Nanotechnologie im Rahmen einer BNE für die Thematisierung im Chemieunterricht äußerst geeignet ist. Zusätzlich sollte dem Transfer 21 zu Folge ein BNE-Thema mit dem im „[...] Unterricht zu erwerbenden Fachkompetenzen verbunden werden können“ sowie „eine Relevanz für die Bildungsziele der Lernenden aufweisen.“ [44, S.33] Auch sollte nach BURMEISTER et al. die BNE an möglichst vielen verschiedenen Stellen des Chemieunterrichts verankert werden, und dabei nicht nur durch fachliche Innovationen zu einem motivierenden Unterricht beitragen, sondern auch durch dessen Zukunftsrelevanz Verantwortung für die Ausbildung der Schüler zu mündigen Bürgern zu übernehmen. [151] Wie in Kapitel 4.3 dargestellt, ist die Verbindung von nanotechnologischen Inhalten und den Themen des Chemiecurriculums durch eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten möglich und durch die Verbindung mit einer BNE eröffnen sich darüber hinaus eine Vielzahl an weiteren Möglichkeiten. Auch die Tatsache, dass die Chemiecurricula bzw. Bildungspläne explizit Aspekte der Nachhaltigkeit aufweisen, fördert die Integration der Nanotechnologie im Kontext einer BNE. In fast allen Chemiecurricula bzw. Bildungsplänen der Bundesrepublik Deutschland wird das Thema Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung erwähnt – entweder im allgemeinen Einleitungsteil (zur Sekundarstufe I oder Sekundarstufe II oder bei beiden) als ein übergeordnetes Bildungsziel oder in der jeweiligen Sekundarstufe I und II (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6 - Erwähnung von Nachhaltigkeit bzw. nachhaltiger Entwicklung im jeweiligen Bundesland des Chemiecurriculums bzw. Bildungsplan Chemie im allgemeinen Teil, in der Sekundarstufe I (Sek I) bzw. der Sekundarstufe II (Sek II).²⁴

	BW	BY	BE	BB	HB	HH	HE	MV	NI	NW	RP	SL	SN	ST	SH	TH
allgemein	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sek I	x	x	x	x	x	-	x	-	x	x	x	-	-	x	x	-
Sek II	x	-	x	x	x	x	x	x	x	-	-	-	x	x	x	-

Auch wenn der Fokus auf der Implementierung der Nanotechnologie im Kontext einer BNE in den Chemieunterricht liegt, soll an dieser Stelle nicht unterschlagen werden, dass durch das hohe Maß der Interdisziplinarität der Nanotechnologie die Möglichkeit besteht, diese in möglichst viele Schulfächer, vor allem aber auch in die anderen naturwissenschaftlichen Fächer zu integrieren. Dabei kann die Verknüpfung mit der BNE als Katalysator wirken, der es ermöglicht, die Nanotechnologie ebenfalls in den Sozialwissenschaften zu thematisieren. Dies geht einher mit den Postulaten von JONES et al., die besagen, dass Wissen mit am effektivsten vermittelt werden, wenn fachliche Hintergründe und Prozesse mit authentisch, kontroversen, gesellschaftlichen Kontexten (SSI oder auch „social and ethical issues (SEI)“) verbunden werden. [114] So könnte bspw. im Rahmen eines Kunstprojektes eine Ausstellung mit Werbeplakaten angefertigt werden, die über den Einsatz von Nanomaterialien in Alltagsprodukten aufklärt. Hierbei könnten formale sowie inhaltliche Anforderungen generell an ein Werbeplakat thematisiert und auf der Metaebene diskutiert werden, welche Merkmale Werbeplakate neben dem reinen Zweck der Bewerbung eines Produktes aufweisen.

5.2. Kriterien für die Entwicklung von Experimenten zur BNE und Nanotechnologie

Um einen gewissenhaften Umfang in der Produktion und Anwendung von Chemikalien vor allem in der Industrie aber auch in Forschung, Lehre und Gesellschaft zu gewährleisten, publizierten Anastas und Warner im Jahr 1998 zwölf Prinzipien für eine Grüne Chemie („12 Principles of Green Chemistry“ [155]). Die Anwendung dieser Strategien ist bereits ein guter Ansatz für einen sorgfältigen Umgang mit Ressourcen, und ist kein gänzlich neues Thema für den Chemieunterricht. Bereits seit einigen Jahrzehnten werden

²⁴ Abkürzungen der Bundesländer sowie deren Quellen: BW = Baden-Württemberg [116, 117], BY = Bayern [152–154], BE = Berlin [119, 120], BB = Brandenburg [121, 122], HB = Bremen [123, 124], HH = Hamburg [125, 126], HE = Hessen [127, 128], MV = Mecklenburg-Vorpommern [120, 129, 130], NI = Niedersachsen [131, 132], NW = Nordrhein-Westfalen [133, 134], RP = Rheinland-Pfalz [135, 136], SL = Saarland [137, 138], SN = Sachsen [139], ST = Sachsen-Anhalt [140], SH = Schleswig-Holstein [141], TH = Thüringen [142].

Themen wie Ursachen und Auswirkungen vom Sauren Regen oder der Abbau der Ozonschicht in diesem Kontext thematisiert. [156] Dies erfüllt allerdings nur einen kleinen Teil der geforderten Kompetenzen einer BNE. Dieser größtenteils ökologische Aspekt muss im Rahmen einer BNE zwingend um die soziale und wirtschaftliche Dimension erweitert werden. PARCHMANN und MENTHE postulierten bereits im Jahr 2006 Folgendes:

„(1) Der Chemieunterricht soll dazu beitragen, dass Schülerinnen und Schüler jetzt und zukünftig in der Lage sind, auf der Basis ihrer chemischen Kenntnisse Fragen und Maßnahmen für eine nachhaltige Entwicklung zu erkennen, zu diskutieren und umzusetzen.

(2) Der Chemieunterricht soll so gestaltet sein, dass erworbene Kenntnisse und Kompetenzen nachhaltig verankert sind und auch zukünftig nutzbar bleiben.“ [149] S. 115

Um die Implementierung der Nachhaltigkeit bzw. der BNE zu fördern, entwickelten und veröffentlichten BURMEISTER et al. im Jahr 2012 Ansprüche an den Chemieunterricht, die im Rahmen einer BNE umgesetzt werden sollten. Demnach sollte eine BNE [156, S. 62]:

- interdisziplinär und holistisch betrachtet werden: BNE-Verankerung sollte im gesamten Chemiecurriculum stattfinden und nicht separat betrachtet werden.
- wertorientiert sein: die ethischen Werte und Prinzipien einer nachhaltigen Entwicklung sollten anerkannte Richtlinien des Chemieunterrichts sein.
- kritisches Denken und das Problemlösen fördern: das Verstehen und Adressieren der Dilemmata und Chancen einer nachhaltigen Entwicklung verlangen nach kritischem Denken und Problemlösefähigkeit.
- auf multidimensionalen Methoden basieren: Worte, Kunst, Schauspiel, Debatten, Erfahrungen, usw. sollen genutzt werden, um dem multidimensionalen Charakter der BNE zu entsprechen.
- eine partizipative Entscheidungsfindung einbeziehen: Lernende sollte die Chance gegeben werden, an Entscheidungsprozessen teilzuhaben und zu lernen, wie diese Entscheidungen gemeinschaftlich getroffen werden.
- die Anwendbarkeit fokussieren: Das Lernen sollte in persönliche und professionelle Alltagskontexte integriert werden.

- eine lokale Bedeutung sichtbar machen: Der Unterricht sollte globale sowie lokale Probleme ansprechen und sich deren Sprache bedienen.

Im Folgenden werden dementsprechend Experimente aus dem Bereich der Nanotechnologie vorgestellt, die im Kontext einer BNE im Chemieunterricht betrachtet werden können und die oben angeführten Kriterien erfüllen. Dabei werden Experimente zu Silica-Aerogelen (Kapitel 5.3), zur photokatalytischen Wasserstoffbildung (Kapitel 5.4), dem Einfluss von Nanomaterialien auf Zellen, Mikroorganismen und Algen (Kapitel 5.5) sowie Experimente zu Polymermembranen (Kapitel 5.6) vorgestellt. In den didaktischen Kommentaren werden zu jeder Versuchsreihe die angeführten Kriterien für BNE-Experimente im Chemieunterricht hinsichtlich ihrer Erfüllung überprüft.

5.3. Experimente mit Silica-Aerogelen^{25,26}

Silica-Aerogele sind dreidimensionale, im Nanometerbereich liegende, Siliciumdioxid Netzwerke, die meist in einem Sol-Gel-Prozess durch Hydrolyse, Kondensation und überkritischer Trocknung (siehe Abbildung 3) hergestellt werden. [158]

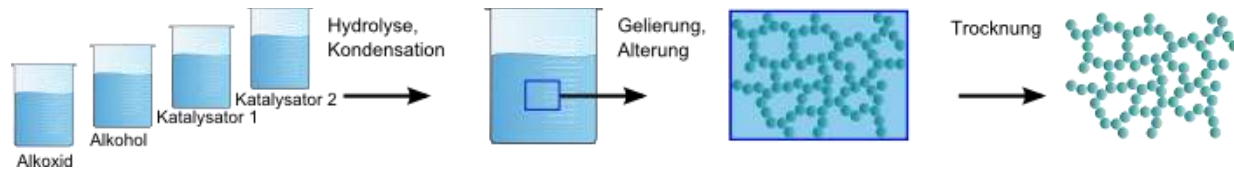


Abbildung 3 - Schematische Darstellung des Sol-Gel-Verfahrens zur Herstellung eines Aerogels (nach DLR/LISINSKI [159]²⁷).

Sie weisen typischerweise eine Porosität von ungefähr 95 % und eine Dichte von 0,003 bis 0,35 g/cm³ auf [160], was sie zu einem äußerst leichten Werkstoff macht. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch eine hohe spezifische Oberfläche (500-1200 m²/g), niedrige Wärmeleitfähigkeit (0,005-0,1 W/(mK)), einen niedrigen Brechungsindex (um die 1,05) [158] sowie eine hohe thermische Stabilität (bis zu 600°C [161]) aus. Dabei lassen sich je nach Synthese Aerogele mit hydrophiler oder hydrophober Oberfläche herstellen.

Aufgrund der besonderen Eigenschaften der Silica-Aerogele, sind sie vielseitig einsetzbar. So sind sie durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und niedrige Dichte unter anderem attraktiv für die Raumfahrt, in der sie bereits als Isolation für Batterieeinheiten bei dem Mars Sojourner Rover eingesetzt werden. [158] Aufgrund dieser Eigenschaften bietet sich außerdem ein Einsatz als Dämmmaterial an. Durch ihre hohe optische Transparenz sowie der geringen Schallgeschwindigkeit, bietet sich eine Verwendung als Fenster von akustisch und thermisch isolierten Systemen an. [162, 163] Darüber hinaus stellen sie in Bezug auf die Notwendigkeit der Entwicklung und Anwendung von effizienteren Energieträgern und -speichern sowie eine ressourcenschonende Herstellung und Verarbeitung von Materialien eine vielversprechende Alternative zu bisherigen Materialien dar.

²⁵ Die in diesem Kapitel präsentierten Experimente sind in Zusammenarbeit mit Herrn Adrian PFLUGMACHER im Rahmen der Qualifikationsarbeit zu „Silica-Aerogele: Herstellung und Entwicklung von Schulexperimenten“ entstanden.

²⁶ Inhalte und Abbildungen dieses Unterkapitels wurden teilweise von der Autorin zusätzlich auf der Konferenz NEW PERSPECTIVES IN SCIENCE EDUCATION vorgestellt und in den Conference Proceedings veröffentlicht. [157]

²⁷ Mit freundlicher Genehmigung der Redaktion Digitale Medien des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (siehe Anhang A.1.3.).

Die im folgenden vorgestellten Experimente zur Untersuchung einiger Eigenschaften von Silica-Aerogelen wurden mit selbsthergestellten Aerogelen nach einer Synthese in Orientierung an Li et al. [162] sowie mit extern hergestellten Aerogelen durchgeführt. Letztere wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Köln-Porz synthetisiert und zur Verfügung gestellt. Die selbst synthetisierten Aerogele sind dabei in einer für die Schule geeigneten Synthese entstanden, was eine überkritische Trocknung ausschließt. Dadurch sind sie weniger porös und weisen eine höhere Dichte auf. Dennoch bieten alle Experimente einen realen Einblick in Methoden und Charakterisierungsverfahren, die in der Forschung und Wirtschaft verwendet werden.

5.3.1. Einfache Strukturaufklärung

Um einen ersten Eindruck der Eigenschaften von Aerogelen zu erhalten, können die Dichte, die Oberflächenbeschaffenheit und die optischen Eigenschaften der Aerogele bestimmt werden. Hierzu werden einfache Experimente mit schulüblichen Materialien wie Messzylindern, Sand, Laserpointern und Wasser durchgeführt. Aufgrund der geringen Komplexität dieser Untersuchungen, werden die zugehörigen Experimentaldurchführungen an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt und lediglich rudimentär die Beobachtungen und Deutungen dargestellt.

Durch Vermessen, Wiegen oder über die Verdrängung eines bestimmten Volumens an Sand, kann die Dichte der Aerogele bestimmt werden. Die berechneten Dichten liegen deutlich über den üblichen Literaturwerten (experimentelle Bestimmung siehe Abbildung 4). Dies hat zwei Hauptgründe. Zum einen weisen die selbsthergestellten Aerogele eine höhere Dichte auf, da sie nicht durch überkritische Trocknung hergestellt wurden. Zum anderen sind die Messmethoden im Vergleich zu denen in Forschungseinrichtungen verwendeten Messgeräten recht ungenau. Dennoch sind die Methoden für die Schule geeignet, um mit den Schülern die Dichte von monolithischen Aerogelen experimentell zu bestimmen.

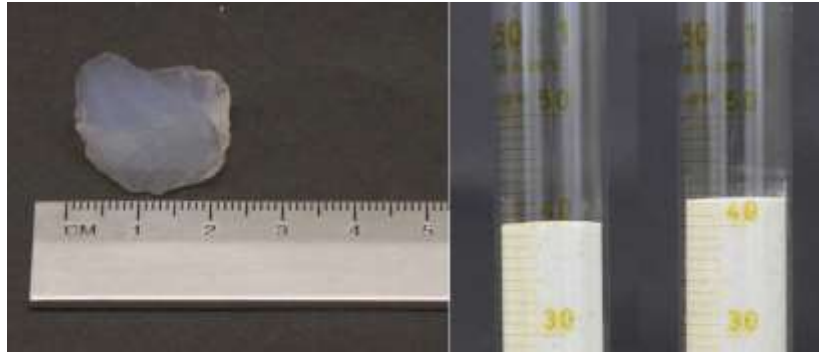


Abbildung 4 - Aerogel (zur Größeneinordnung neben einem Lineal, links) sowie das gemessene Sandvolumen ohne (mittig) und mit Aerogel (rechts) im Messzylinder.

Um die optischen Eigenschaften zu bestimmen und hieraus auf die Struktur schließen zu können, werden zwei Laserstrahlen auf die Aerogele gerichtet (siehe Abbildung 5).

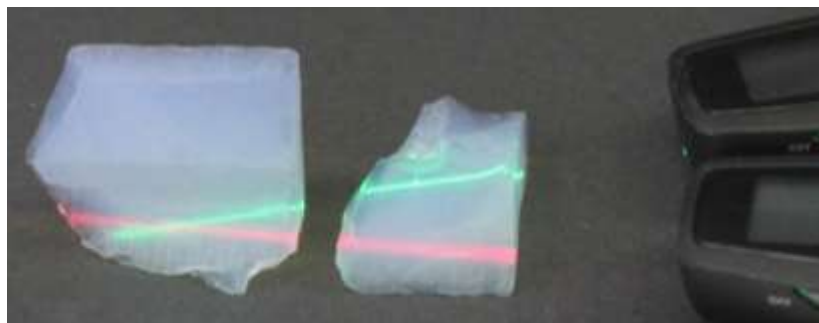


Abbildung 5 - Sichtbare Laserstrahlen in den Aerogelen.

Die Sichtbarkeit der Laserstrahlen in den Aerogelen ist auf den TYNDALL-Effekt zurückzuführen. Dieser weist nach, dass die Aerogele unter anderem aus Netzwerken aufgebaut sind, die in etwa der Größenordnung der Wellenlänge des eingestrahlichten Lichts entsprechen. [164] Daher liegen sie im Bereich einiger Hundert Nanometer. Mit der Größe der Partikel nimmt die Unschärfe der Streuung zu. [165, 166]

Zur Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit der Aerogele wird jeweils ein Tropfen Wasser auf die Oberfläche gegeben. Die Oberfläche des selbst hergestellten Aerogels ist hydrophob, daher perlt der Wassertropfen ab. Das Aerogel des DLR hingegen weist aufgrund der äußeren Hydroxylgruppen eine hydrophile Oberfläche auf. Der Einfluss des Wassers führt zum Zusammenbruch der Silica-Netzwerke, wodurch eine Art Krater entsteht (siehe Abbildung 6).

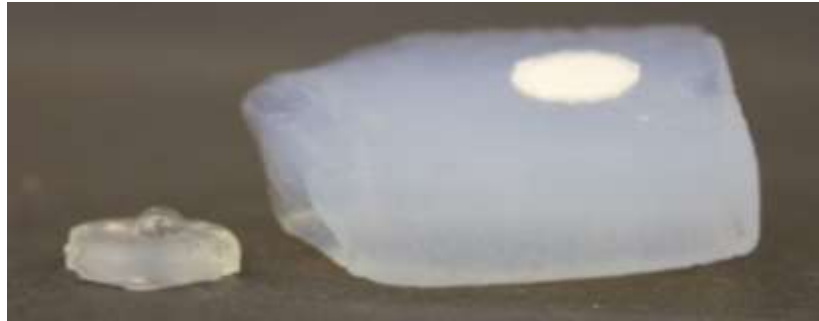


Abbildung 6 - Wassertropfen auf dem selbsthergestellten Aerogel (links), eingezogener Wassertropfen auf dem Aerogel vom DLR (rechts).

Im Anschluss an diese Experimente können weitere Experimente zur Untersuchung der Eigenschaften von Aerogelen durchgeführt werden, die etwas aufwändiger sind und daher an dieser Stelle detaillierter ausgeführt werden.

5.3.2. Wärmeisolierung

Geräte und Chemikalien

Gasbrenner, Dreifuß mit Drahtnetz, dünne Metallplatte (bspw. Eisen oder Kupfer), Streichhölzer, Aerogel, Vergleichsobjekt mit Aerogel ähnlicher Größe (in diesem Fall eine 2-Cent-Münze²⁸).

Durchführung

Die Metallplatte wird auf das Drahtnetz des Dreifußes gelegt. Diese dient der gleichmäßigen Wärmeverteilung der Hitze des unter dem Drahtnetz platzierten Gasbrenners. Auf der Metallplatte wird die 2-Cent-Münze und ein Aerogel platziert. Von den Streichhölzern wird jeweils der Kopf abgeschnitten und auf die beiden Objekte gelegt. Mit rauschender Flamme wird die Metallplatte etwa 15 Minuten erhitzt.

²⁸ Neben einer Münze können weitere Alltagsgegenstände als Streichholzkopfaufgabe dienen, bspw. ein Anspitzer oder ein Stück Schwamm. Beide Streichholzköpfe würden sich in diesem Fall auch entzünden und das Schwammstück zusätzlich schmelzen und verkohlen.

Beobachtung

Nach wenigen Minuten entzündet sich der Streichholzkopf auf der 2-Cent-Münze. Das Aerogel bleibt auch nach längerem Erhitzen unverändert und der Streichholzkopf auf ihm entzündet sich auch nach über 15 Minuten nicht (siehe Abbildung 7).



Abbildung 7 - Experiment Wärmeisolation zu Versuchsbeginn (links), zum Zeitpunkt der Streichholzentzündung (mittig) und 15 Minuten nach der Entzündung (rechts).

Deutung

Das Aerogel isoliert den Streichholzkopf von der Hitze des Gasbrenners, während die Metallmünze die Wärme weiterleitet, welche den oben aufliegenden Streichholzkopf entzündet. Aerogele weisen aufgrund ihrer hohen Porosität (und der damit eingeschlossenen Luft) sowie der „[...] wirkungsvollen Unterdrückung von Strahlungswärmetransport [...] und, am Wichtigsten, [...] [der] Poren, die kleiner sind als die mittlere freie Weglänge in der Gasphase [...]“ [167, S. 7721] eine äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit auf. Metalle hingegen können durch freibewegliche Elektronen im Metallgitter die Wärme sehr gut transportieren.

5.3.3. Gasdurchlässigkeit

Geräte und Chemikalien

Aerogel, Kolbenprober, Stück Schwamm, Münze.

Durchführung

Der Auslass eines Kolbenprobers wird geöffnet und der Stempel wird herausgezogen. Anschließend wird das Aerogel vor den Auslass eines Kolbenprobers gehalten und der Stempel vorsichtig hereingedrückt. Danach wird analog mit einer Münze (siehe Abbildung 8) und einem Stück Schwamm anstelle des Aerogels verfahren.



Abbildung 8 - Kolbenprober mit vorgehaltener 2-Cent-Münze.

Beobachtung

Während sich der Stempel bei der Münze nicht reindrücken lässt, ist der Stempel bei dem Schwamm und dem Aerogel leicht zu bewegen.

Deutung

Beim Schwamm sind die Poren mit dem bloßen Auge zu erkennen, daher ist es offensichtlich, dass hier die Luft durch die Poren strömen kann. Die Münze besitzt keine mit dem Auge zu erkennenden Poren und besteht aus massivem Metall, sodass keine Luft passieren kann. Anders ist es nun mit dem Aerogel: Hier lassen sich ebenfalls keine Poren erkennen, die Luft kann dennoch ungehindert durchströmen. Es verfügt also über Poren, durch welche die Luft fließen kann, die allerdings ohne Hilfsmittel nicht zu erkennen sind.

5.3.4. Feuerzeuggasspeicher

Geräte und Chemikalien

Aerogel, Petrischale, Feuerzeuggas-Kartusche, Feinwaage.

Durchführung

Die Petrischale wird auf die Feinwaage gestellt und tariert. Anschließend wird das Aerogel in die Petrischale gelegt und die Masse notiert. Beides wird nun zusammen von der Waage genommen und die Feuerzeuggas-Kartusche durch Drücken auf den Petrischalenboden entleert (siehe Abbildung 9), bis ein Teil des flüssigen Feuerzeuggases in der Schale verbleibt. Danach wird die Petrischale mit Aerogel wieder auf die Waage gestellt und in Intervallen von 5 Minuten die Masse des Aerogels gemessen. Zusätzlich wird die Zeit bis zum Erreichen der Ausgangsmasse notiert.

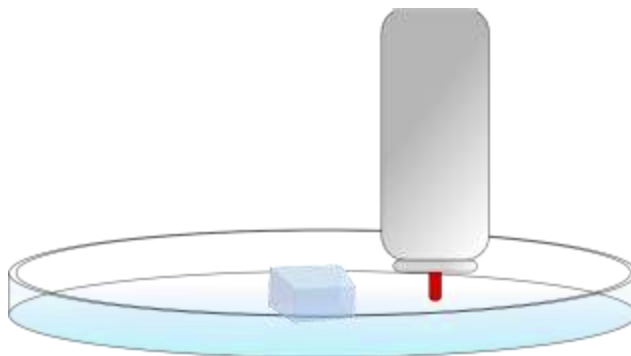


Abbildung 9 - Füllung der Petrischale mit Feuerzeuggas, in der ein Aerogel liegt.

Beobachtung

Die Masse des Aerogels beträgt 3,593 g und nach der Zugabe des Gases 5,52 g. Zunächst sinkt die Masse schnell, nach 10 Minuten ist die Masse bereits bei 3,6313 g. Es dauert insgesamt 40 Minuten, bis die Ausgangsmasse erreicht ist und sich nicht mehr verändert.

Deutung

Die Feuerzeuggas-Kartusche ist mit unter Druck verflüssigten kurzkettigen Alkanen, wie Propan und Butan befüllt, welche unter Normaldruck verdampfen. In der Nähe eines Aerogels adsorbieren die Gasmoleküle an der großen Oberflächenstruktur des porösen Festkörpers und desorbieren von dort weitaus langsamer.

5.3.5. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von Aerogelen im Chemieunterricht

Werden die präsentierten Experimente zu Silica-Aerogelen betrachtet, ist zu erkennen, dass diese im umfangreichen Maße die Kriterien (siehe Kapitel 5.2) der Verankerung einer BNE im Chemieunterricht erfüllen. Dies wird im Folgenden expliziert.

Um eine BNE möglichst interdisziplinär und holistisch im Chemiecurriculum zu verankern, sollten die entwickelten Experimente mit den vier fachlichen Kompetenzen der Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz [168, 168] in Verbindung gebracht werden können. Dabei bieten alle Versuche die Möglichkeit, Aerogele als bedeutsamen Stoff mit ihren typischen Eigenschaften zu beschreiben und damit Stoff-Teilchen Beziehungen zu verdeutlichen. Mit der Untersuchung der Oberflächenbeschaffenheit lässt sich zeigen, dass unterschiedlich synthetisierte Aerogele verschiedene Eigenschaften aufweisen. Daran können den Schülern Struktur-Eigenschaftsbeziehungen aufgezeigt werden und welches Potential sich

damit für die Materialforschung ergibt. Ebenfalls ermöglichen die Untersuchungen der optischen Eigenschaften, der Gasspeicherung sowie zur Gasdurchlässigkeit den Schülern, den strukturellen Aufbau von Aerogelen zu erklären und damit auf die besonderen Eigenschaften zu schließen. Über das Experiment zur Wärmeisolierung können darüber hinaus das Konzept der „chemischen Reaktion“ sowie zur „Energetischen Betrachtung bei Stoffumwandlungen“ [168] erörtert werden.

Bei der Synthese von Aerogelen können die Prinzipien einer Grünen Chemie angewendet werden und damit als Richtlinie für den Chemieunterricht umgesetzt werden. Der Versuch zur geringen Wärmeleitfähigkeit der Aerogele bietet zusätzlich die Möglichkeit der Thematisierung einer nachhaltigen Ressourcenverwendung. Um sowohl energieeffizienter als auch ressourcensparender zu agieren, ist bspw. die Herstellung und Verwendung von geeignetem Dämmmaterial unabdingbar. Durch die geringe Dichte können unter anderem Transportkosten gespart werden (geringeres Gewicht führt zu leichteren Transportern und dadurch weniger Treibstoffverbrauch). Darüber hinaus sind diese Materialien leichter zu verbauen, was sowohl menschliche als auch technische Arbeitskraft einspart. Für eine nachhaltigere, ressourcenschonendere und möglicherweise kostengünstigere Produktion, Anwendung und Entsorgung von Aerogelen als Dämmmaterialien werden zurzeit Biopolymer-Aerogele erforscht und weiterentwickelt. [167] Alle diese Aspekte tragen zur Sensibilisierung und Umsetzung eines wertorientierten Handelns im Chemieunterricht bei.

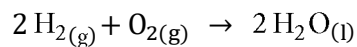
Die Notwendigkeit von Innovationen zur Förderung einer nachhaltigen Entwicklung und die damit verbundene Technikfolgenabschätzung, können im Chemieunterricht darüber hinaus das kritische Denken und die Problemlösefähigkeit von Schülern fördern. Das Befassen mit Aerogelen bietet sich hierzu in einem hohen Maße an, da die Besonderheiten dieser nanoporösen Strukturen ein großes Potential für künftige Anwendungsbereiche bieten. Damit verbunden können die Schüler mithilfe der Informationen über die Eigenschaften von Aerogelen selbstständig überlegen, welche (nachhaltigen) Einsatzmöglichkeiten sich hierdurch ableiten lassen. Dies bietet bspw. die Möglichkeit, **im Kontext der BNE „gemeinsam mit anderen planen und handeln [zu] können“** [38, S. 191] sowie partizipativ zu einer Entscheidungsfindung zu gelangen. Die hierzu geführten Debatten tragen zu einer Methodenvielfalt bei.

In Zusammenhang mit den Aerogelen können außerdem „Nanophänomene“ in der Umwelt diskutiert werden, wie die Beschreibung des Lotos-Effekts an Pflanzen. In Bezug auf Anwendungen von Aerogelen

kann dies von hoher Bedeutung sein, wenn es z. B. um die Herstellung von wasserabweisenden, luftdurchlässigen Oberflächen für Outdoor-Equipment geht. Darüber hinaus könnten effizientere und nachhaltigere Beschichtungen für wasserempfindliche Materialien oder zur Wasserisolierung von Rohren (Schutz vor Rost) entworfen werden. Aufgrund ihrer geringen Dichte, der großen Oberfläche sowie der Gasspeicherfähigkeit könnten Aerogele bspw. zur einer effektiveren Speicherung von flüssigem Raketentreibstoff beitragen. Zusätzlich könnten diese so umfunktioniert werden, dass bestimmte Schadstoffe aus der Luft oder auch aus Flüssigkeiten absorbiert werden. Diese Aspekte fokussieren zum einen die Anwendbarkeit und ermöglichen zum anderen die Sichtbarkeit der lokalen sowie globalen Bedeutung der Aerogele.

5.4. Experimente zur Beurteilung der Effizienz photokatalytischer Wasserstoffbildung²⁹

Eine nachhaltige sowie grüne Energieversorgung rückt im Zuge des Kohle- sowie Atomausstiegs heutzutage immer stärker in Fokus, vor allem auch von Forschung und Entwicklung. Eine mögliche Alternative zu fossilen bzw. nuklearen Ressourcen stellt die Umwandlung von Energie in Brennstoffzellen da, bei der bspw. Wasserstoffgas und Sauerstoffgas elektrochemisch effizient zu Wasser, elektrischer sowie Wärmeenergie reagieren.



Diese Wasserstoff-Sauerstoffreaktion liefert dabei eine ideale Zellspannung von 1,229 V bei einem maximalen Wirkungsgrad von 82,97%.³⁰ [169, S. 215] Das hierfür benötigte Wasserstoffgas wird heutzutage allerdings vielfach aus Erdgas gewonnen und ist damit wieder von endlichen Ressourcen abhängig. Auch andere Herstellungsverfahren von Wasserstoffgas, wie z. B. die Elektrolyse von Wasser, erfordern elektrische Energie, welche häufig über fossile Energieträger in das System eingebracht wird.

Eine Möglichkeit zur nachhaltigen und effizienten Herstellung von Wasserstoffgas kann hingegen über die photokatalytische Wasserspaltung mithilfe von Halbleitermaterialien erfolgen, bei der sich die Energie der Sonne zunutze gemacht werden kann. [170] Bei geeigneten Materialien können durch die Energie des Sonnenlichts Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband angehoben werden (siehe Abbildung 10, Schritt 1) und hinterlassen positiv geladene Löcher. An der Oberfläche des Halbleiters können die Wassermoleküle mithilfe der Elektronen zu Wasserstoff reduziert und die durch die positiven Löcher die Wassermoleküle zu Sauerstoff oxidiert (siehe Abbildung 10, Schritt 2) werden.

²⁹ Die in diesem Kapitel präsentierten Experimente sind in Zusammenarbeit mit Herrn Steven CELIK im Rahmen der Qualifikationsarbeit zur „Effizienz photokatalytischer Reaktionen an Nanopartikeln“ entstanden

³⁰ Zum Vergleich: Der effektive Wirkungsgrad η_{eff} von Otto-Motoren liegt zwischen 0,26 bis 0,32. [169] S. 183

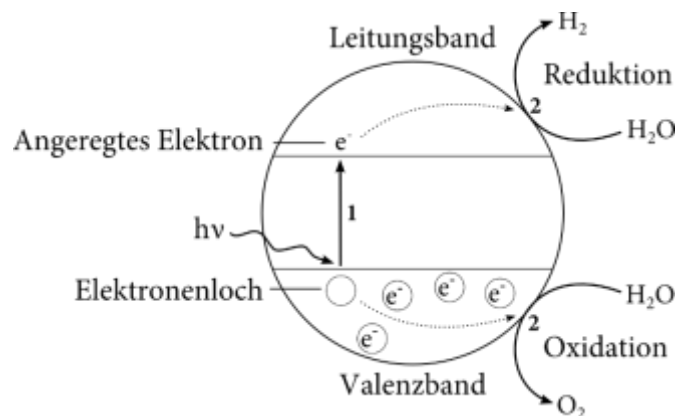


Abbildung 10 - Schematische Darstellung der photokatalytischen Wasserspaltung an Halbleitern.

Besonders effiziente Photokatalysatoren stellen unter anderem nanokristalline Übergangsmetallsulfide wie Cadmiumsulfid und Zinksulfid dar, weil diese durch eine Photoanregung schnell Elektronen-Loch-Paare erzeugen, die ein stark negatives Reduktionspotential aufweisen. [171,172] In Form von Mischkristallen aus diesen beiden Komponenten ergibt sich eine Bandlücke von 2,35 eV, wobei Elektronen durch Licht im sichtbaren Bereich angeregt werden können. [170] Auch wenn dieser Prozess aus Gründen der Umsetzbarkeit und Rentabilität bisher nicht kommerziell angewendet wird, kann dieser Versuch Einblick in aktuelle Forschung zu alternativen Energiequellen darstellen. Darüber hinaus verdeutlicht er das Anwendungspotential von nanoporösen Strukturen aufgrund deren photokatalytischen Aktivität.

Zur Bestimmung der Effektivität der Wasserstoffgasentwicklung bei der photokatalytischen Wasserspaltung unter Verwendung von ZnS/CdS-Mischkristallen wird über eine Aktinometrie die Menge an Lichtquanten monochromatischer LEDs bestimmt und mit der produzierten Gasmenge verglichen. Die Aktinometrie stellt dabei eine chemische Messmethode zur Bestimmung eines absorbierten Photonenflusses dar, bei der eine Substanz einer lichtinduzierten Reaktion mit einer festgelegten Wellenlänge und damit einer festgelegten Quantenausbeute unterliegt. Durch die Messung der Reaktionsrate bspw. über eine UV/VIS-Spektroskopie kann hieraus der Photonenfluss berechnet werden. [173] Wird neben der Aktinometrie parallel mit einer gleichen Lichtquelle die photokatalytische Wasserspaltung durchgeführt (apparativer Aufbau siehe Abbildung 11), kann über den Vergleich der Anzahl der eingestrahlteten Lichtquanten mithilfe der entstandenen Wasserstoffgasmenge die Effizienz dieser Reaktion bestimmt werden.

5.4.1. Kaliumferrioxalat-Aktinometrie

Geräte und Chemikalien

Versuchsaufbau (Abbildung 11), 18 Schnappdeckelgläser, 18 Standardküvetten, UV/VIS-Spektrometer, Feinwaage, Peleusball, 10 mL Pipette, 7 Bechergläser (2x 1 L, 3x 250 mL, 100 mL, 50 mL), Mikroliterpipette, Magnetrührer mit Rührfisch und Heizfunktion, Büchnertrichter, Saugflasche, Filterpapier, Kühlschrank, Trockenschrank.



Abbildung 11 – Versuchsausrüstung mit jeweils einem Reaktionskolben für die Wasserspaltung und die Aktinometrie (links), Low-cost Versuchsaufbau (rechts).

96%ige Schwefelsäure, Ammoniumeisen(II)-sulfat Hexahydrat, Ammoniumacetat, 1,10-Phenanthrolin, Eisen(III)-chlorid Hexahydrat, Kaliumoxalat Monohydrat.

Durchführung

Zunächst werden folgende Lösungen angesetzt:

Lösung 1: 1,4 mL 96%iger Schwefelsäure werden in 50 mL destilliertes Wasser gegeben. Diese Lösung wird auf 500 mL aufgefüllt um 0,05 M Schwefelsäure zu erhalten.

Lösung 2: 1,4 mL 96%iger Schwefelsäure und 78 mg Ammoniumeisen(II)-sulfat Hexahydrat werden in 50 mL destilliertes Wasser gegeben. Diese Lösung wird ebenfalls auf 500 mL aufgefüllt, um $4 \cdot 10^{-4}$ M Ammoniumeisen(II)-sulfatlösung zu erhalten.

Lösung 3: Es werden 0,03 g 1,10-Phenanthrolin in ein Becherglas mit 25 mL demineralisiertem Wasser gegeben und unter Rühren bei 40°C gelöst.

Pufferlösung: 1 mL 96%iger Schwefelsäure und 4,62 g Ammoniumacetat werden in 50 mL destilliertes Wasser gegeben und anschließend auf 100 mL aufgefüllt

Zur Herstellung des Kaliumferrioxalats werden 4,06 g Eisen(III)-chlorid Hexahydrat in 10 mL demineralisiertem Wasser gelöst und 8,3 g Kaliumoxalat Monohydrat in 30 mL. Diese Lösungen werden in einem lichtdicht isolierten Behältnis unter Rühren zusammengeführt und über Nacht im Kühlschrank gelagert. Nach Absaugen der ausgefallenen Kristalle im Büchnertrichter, werden diese zweimal mit 60 °C warmem Wasser umkristallisiert und dann 3 Stunden bei 60 °C im Trockenschrank getrocknet.

Für die anschließende Aufnahme der Kalibrierungskurve zur Bestimmung des Absorptionskoeffizienten von Eisen(II)-Ionen bei einer Wellenlänge von 400 nm werden sieben Lösungen hergestellt, die jeweils 1,5 mL demineralisiertes Wasser, 2,5 mL der Pufferlösung und 1 mL der Lösung 3 enthalten. Den Proben wird nach Tabelle 7 folgende Mengen der Lösungen 1 und 2 hinzugefügt, um unterschiedliche Eisen(II)-phenanthrolin-Konzentrationen zu erhalten.

Tabelle 7 - Zusammensetzung der Lösungen für die Kalibrierungskurve.

Nr.	Lösung 1	Lösung 2	Eisen(II)-phenanthrolin-Konzentrationen
1	5,0 mL	0 mL	0
2	4,5 mL	0,5 mL	$1,99 \cdot 10^{-5}$ mol/L
3	4,0 mL	1,0 mL	$3,98 \cdot 10^{-5}$ mol/L
4	3,5 mL	1,5 mL	$5,97 \cdot 10^{-5}$ mol/L
5	3,0 mL	2,0 mL	$7,96 \cdot 10^{-5}$ mol/L
6	2,5 mL	2,5 mL	$9,95 \cdot 10^{-5}$ mol/L
7	2,0 mL	3,0 mL	$11,94 \cdot 10^{-5}$ mol/L

Im UV/VIS-Spektrometer werden die Lösungen nun hinsichtlich ihrer Absorbanz bei einer Wellenlänge von 400 nm getestet.

Für die eigentliche Aktinometrie werden 1,96 g des Kaliumferrioxalats in das möglichst lichtundurchlässige Reaktionsgefäß gegeben, mit Lösung 1 auf 200 mL aufgefüllt und anschließend in der Versuchsanordnung befestigt. Desweiteren werden elf Schnappdeckelgläser mit folgenden Lösungen befüllt: 4 mL Lösung 1, 1 mL Lösung 3, 2,5 mL Pufferlösung und 1,5 mL demineralisiertes Wasser. Diese werden ebenfalls (z. B. mit Alufolie) lichtdicht verschlossen.

Zum Zeitpunkt 0 werden 1 mL der Probelösung aus dem Reaktionsgefäß entnommen, in eins der befüllten Schnappdeckelgläser überführt und anschließend die LED-Leuchten eingeschaltet. Jede zehn Sekunden wird nun jeweils ein weiterer Milliliter der Probe entnommen und ebenfalls in ein befülltes Schnappdeckelglas überführt.

Alle Proben in den Schnappdeckelgläsern werden anschließend im UV/VIS-Spektrometer analysiert. Über die Formel

$$n_{\text{Fe}^{2+}, \text{Reaktor}} = \frac{A_{400\text{nm}} \cdot V_{\text{Schnappdeckelglas}} \cdot V_{\text{Reaktor}}}{\epsilon_{400\text{nm}} \cdot V_{\text{Pipette}} \cdot d}$$

kann direkt die Stoffmenge der Eisen-Ionen bestimmt werden.

Beobachtung

Nach der Trocknung der Kaliumferrioxalat-Lösung liegen grünliche Kristalle vor (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12 - Getrocknete Kaliumferrioxalat-Kristalle.

Für die Messung der Absorbanz der Eisen(II)-phenanthrolin-Lösungen (siehe Abbildung 13) zur Erstellung einer Kalibrierungskurve ergeben sich die Werte in Tabelle 8.



Abbildung 13 - Sieben Lösungen unterschiedlicher Eisen(II)-phenanthrolin-Konzentration zur Anfertigung einer Kalibrierungskurve.

Tabelle 8 - Gemessene Absorbanz der Eisen(II)-phenanthrolin-Lösungen bei einer Wellenlänge von 400 nm.

Eisen(II)-phenanthrolin-Konzentrationen	Absorbanz bei 400 nm
0	0
$1,99 \cdot 10^{-5}$ mol/L	0,07565
$3,98 \cdot 10^{-5}$ mol/L	0,13783
$5,97 \cdot 10^{-5}$ mol/L	0,22407
$7,96 \cdot 10^{-5}$ mol/L	0,28230
$9,95 \cdot 10^{-5}$ mol/L	0,35881
$11,94 \cdot 10^{-5}$ mol/L	0,42648

Bei der durchgeführten Aktinometrie ergeben sich folgende Stoffmengen:

Tabelle 9 - Veränderung der Stoffmenge an Eisen(II)-Ionen über den gemessenen Zeitraum.

Zeitpunkt	Stoffmenge $n_{\text{Fe}^{2+}}$
0 s	0
10 s	$6,136 \cdot 10^{-7}$ mol
20 s	$8,354 \cdot 10^{-7}$ mol
30 s	$12,506 \cdot 10^{-7}$ mol
40 s	$13,849 \cdot 10^{-7}$ mol
50 s	$21,731 \cdot 10^{-7}$ mol
60 s	$21,771 \cdot 10^{-7}$ mol
70 s	$23,949 \cdot 10^{-7}$ mol
80 s	$28,851 \cdot 10^{-7}$ mol
90 s	$30,773 \cdot 10^{-7}$ mol
100 s	$35,308 \cdot 10^{-7}$ mol

Deutung

Werden die Werte der Kalibrierungskurve gegeneinander aufgetragen und eine lineare Regression durchgeführt, wird die Funktion $y = 3571,8x + 0,0018$ als Ausgleichsgerade erhalten (siehe Abbildung 14).

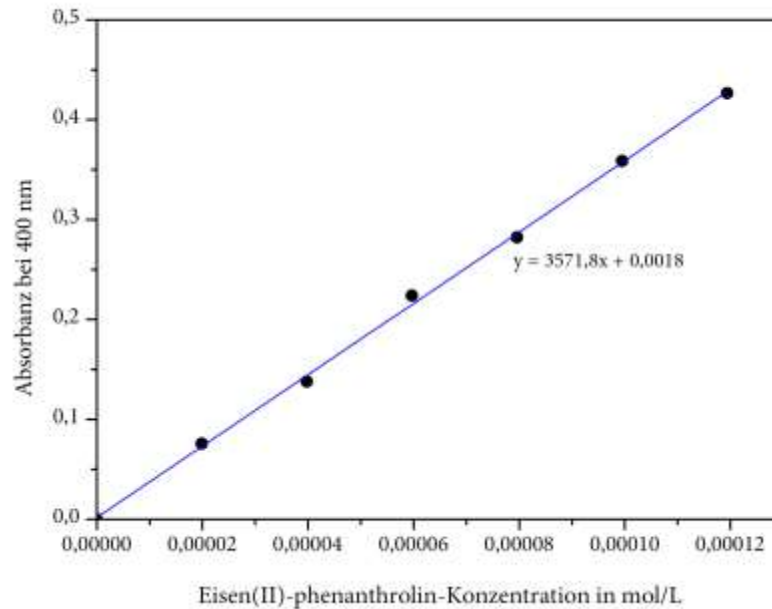


Abbildung 14 - Kalibrierungskurve zur Bestimmung des dekadischen Absorptionskoeffizienten ϵ_{400nm} .

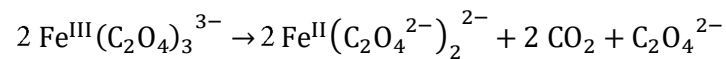
Über das Lambert-Beer'sche-Gesetz

$$A = \epsilon \cdot c \cdot d$$

und einer Küvettendicke von 1 cm ergibt sich, dass die Steigung der Geraden dem Absorptionskoeffizienten entspricht. Für die durchgeführte Aktinometrie lautet dieser also

$$\epsilon_{400nm} = 3571,8 \frac{\text{L}}{\text{mol} \cdot \text{cm}}$$

Bei der Kaliumferrioxalat-Aktinometrie wird durch die Absorption von Licht geeigneter Energiemenge eine Redoxreaktion ausgelöst, bei der Eisen(III)-Ionen zu Eisen(II)-Ionen reduziert werden. [174]



Die Messung der Absorbanz zu unterschiedlichen lässt Rückschlüsse auf die Stoffmenge der gebildeten Eisen(II)-Ionen zu. Über die Auftragung der zeitabhängigen Stoffmengenkonzentration kann die durchschnittliche Umsatzrate der Reaktion extrapoliert werden (siehe Abbildung 15).

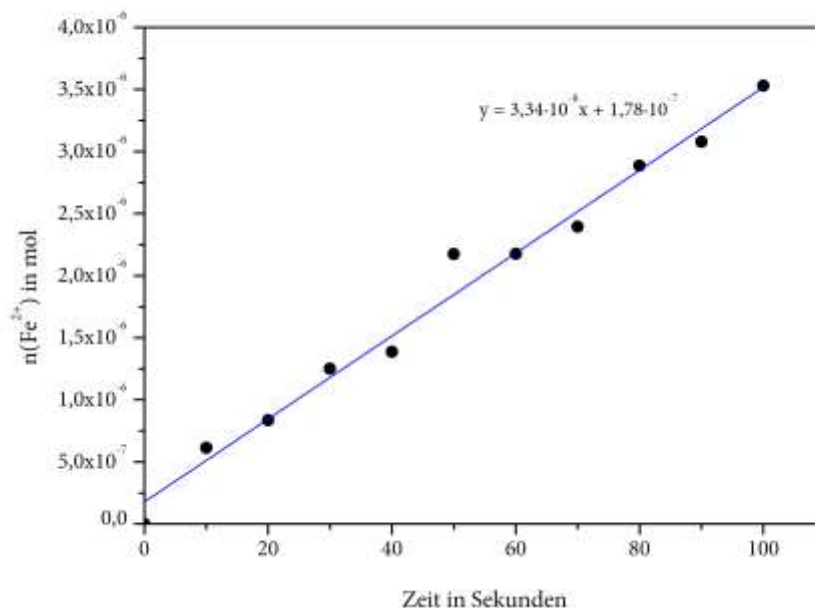


Abbildung 15 - Bestimmung der durchschnittlichen Reaktionsrate der Kaliumferrioxalat-Aktinometrie.

Hiermit ergibt sich aus der Steigung der Ausgleichsgeraden, dass die durchschnittliche Umsatzrate $3,34 \cdot 10^{-8} \text{ mol/s}$ beträgt.

5.4.2. Photokatalytische Wasserstoffbildung

Geräte und Chemikalien

Versuchsaufbau (Abbildung 11), 3 Bechergläser (2x 1 L, 500 mL), Trockenschrank, Feinwaage, Spatel, 10 mL Pipette, Peleusball, Mörser mit Stab, Gummischlauch, Abdichtfolie, pneumatische Wanne, Messzylinder, Magnetrührer mit Rührfisch.

Essigsäure (0,1 M), Cadmiumcarbonat, Zinkcarbonat, destilliertes Wasser, Natriumsulfid, Natriumsulfit.

Durchführung

Zur Herstellung des Photokatalysators – der Cadmiumsulfid-/Zinksulfid-Nanopartikelsuspension im Stoffmengenverhältnis 2:1- werden 250 mL 0,1 M Essigsäure in ein 1 L Becherglas gegeben (Lösung 1) und in einem weiteren 1 L Becherglas 1,25 g Natriumsulfid in 250 mL demineralisiertes Wasser (Lösung 2). Beide Lösungen werden auf 65°C erhitzt. Nun werden in Lösung 1 1,59 g Cadmiumcarbonat und 0,86 g Zinkcarbonat gelöst und anschließend zu Lösung 2 gegeben. Der ausfallende Feststoff wird in einem

Büchnertrichter filtriert, mit Wasser gewaschen und bei 70 °C drei Stunden im Trockenschrank getrocknet. Zum Abschluss wird der getrocknete Feststoff sehr fein gemörsert.

Für die Elektrolytlösung werden 4,68 g Natriumsulfid und 11,03 g Natriumsulfit nacheinander in 255 mL demineralisiertem Wasser gelöst. Zur Durchführung der Photoreaktion werden die Cadmiumsulfid-/Zinksulfidnanopartikel in die Elektrolytlösung gegeben und anschließend in den Reaktionskolben gegeben. Es wird darauf geachtet, dass der gesamte Boden des Kolbens mit dem Feststoff bedeckt ist. Der verschlossene Kolben wird über einen Gummischlauch mit einer pneumatischen Wanne verbunden, mit der das entstehende Wasserstoffgas aufgefangen wird. Nach dem Anschalten der LEDs und einer viertelstündigen Vorlaufzeit, wird in einem regelmäßigen Abstand über zwei Stunden die entstehende Gasmenge gemessen und notiert.

Beobachtung

Der getrocknete Feststoff aus Cadmium- und Zinksulfid hat eine gelbliche Farbe (siehe Abbildung 16).



Abbildung 16 - Getrockneter Feststoff, Photokatalysator aus Cadmium- und Zinksulfid.

Bei der Photoreaktion sind aufsteigende Gasbläschen in der Reaktionssuspension zu beobachten (siehe Abbildung 17) und ein Gas wird in der pneumatischen Wanne aufgefangen.

Dabei wird folgendes Gasvolumen aufgefangen:

Tabelle 10 - Gemessenes Gasvolumen in Abhängigkeit von der Zeit.

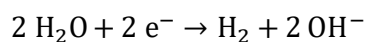
Zeit	Volumen	Zeit	Volumen	Zeit	Volumen	Zeit	Volumen	Zeit	Volumen
1800 s	$0,8 \cdot 10^{-3}$ L	3270 s	$3,8 \cdot 10^{-3}$ L	4500 s	$6,3 \cdot 10^{-3}$ L	6300 s	$9,6 \cdot 10^{-3}$ L	7980 s	$12,5 \cdot 10^{-3}$ L
2580 s	$2,1 \cdot 10^{-3}$ L	3420 s	$4,1 \cdot 10^{-3}$ L	4860 s	$6,9 \cdot 10^{-3}$ L	6720 s	$10,1 \cdot 10^{-3}$ L	8280 s	$12,8 \cdot 10^{-3}$ L
2820 s	$2,9 \cdot 10^{-3}$ L	3780 s	$4,7 \cdot 10^{-3}$ L	5280 s	$7,7 \cdot 10^{-3}$ L	7020 s	$10,7 \cdot 10^{-3}$ L	8640 s	$13,6 \cdot 10^{-3}$ L
3000 s	$3,2 \cdot 10^{-3}$ L	3960 s	$5,2 \cdot 10^{-3}$ L	5580 s	$8,2 \cdot 10^{-3}$ L	7200 s	$11,2 \cdot 10^{-3}$ L	8880 s	$14 \cdot 10^{-3}$ L
3120 s	$3,5 \cdot 10^{-3}$ L	4320 s	$5,6 \cdot 10^{-3}$ L	6180 s	$9,2 \cdot 10^{-3}$ L	7740 s	$12 \cdot 10^{-3}$ L	9000 s	$14,2 \cdot 10^{-3}$ L



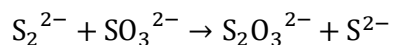
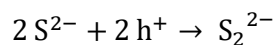
Abbildung 17 - Gasentwicklung bei der Photoreaktion.

Deutung

Bei der photokatalytischen Wasserspaltung entsteht durch die Reduktion von Wassermolekülen Wasserstoff.



Dieses Gas wird über die pneumatische Wanne aufgefangen. Bei der Oxidation des Sulfids der Elektrolytlösung in Anwesenheit von Sulfiten reagiert dieses zu Thiosulfat. [175]



Aus dem aufgefangenen Gasvolumen kann über die ideale Gasgleichung mit $R = 8,31446 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$, $p = 1 \text{ bar}$ und $T = 298 \text{ K}$ die Stoffmenge an entstandenem Wasserstoff berechnet und gegen die Zeit aufgetragen werden (siehe Abbildung 18).

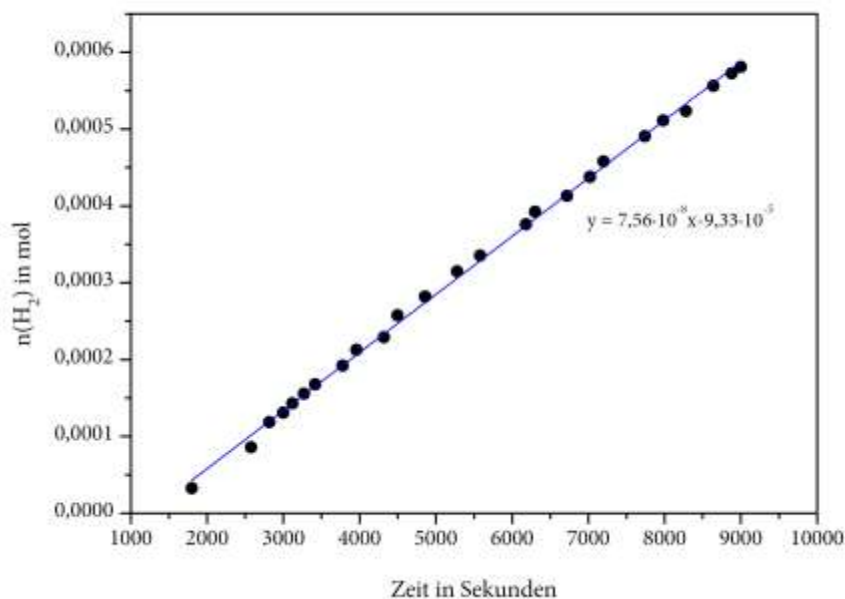


Abbildung 18 - Auftragung der entstandenen Stoffmenge an Wasserstoff gegen die Zeit.

Anhand der Steigung der lässt sich ablesen, dass $7,56 \cdot 10^{-8}$ mol Wasserstoff pro Sekunde entstehen.

5.4.3. Berechnung der Effizienz der Wasserstoffbildung

Zur Berechnung der Effizienz der im vorherigen Unterkapitel durchgeführten Wasserstoffbildung, wird diese mit der Kaliumferrioxalat-Aktinometrie (Kapitel 5.4.1) verglichen. Die Effizienz wird dabei über den Quotienten der gebildeten Wasserstoffstoffmenge pro Zeit durch die Anzahl der Photonen, die pro Zeiteinheit auf den Reaktionsbehälter gestrahlt werden, geteilt. [176]

$$\xi = \frac{n(\text{H}_2)/t \cdot 2 \cdot 100}{n(h\nu)/t}$$

Der Wert des Zählers wurde in Experimente in Kapitel 5.4.2 bestimmt. Der Nenner kann über die Kaliumferrioxalat-Aktinometrie mittels der Quantenausbeute berechnet werden. [177]

$$\phi = \frac{n(\text{Fe}^{2+})}{n(h\nu)}$$

Für die Quantenausbeute des Kaliumferrioxalats bei einer Wellenlänge von 400 nm wird der Wert 1,2 angenommen. [178] Die Formeln kann dementsprechend nach der Anzahl der Photonen umgestellt werden und die zeitliche Komponente hinzugefügt werden.

$$\frac{n(h\nu)}{t} = \frac{n(\text{Fe}^{2+})}{\phi \cdot t}$$

Mit der Änderungsrate der Eisen(ii)-Ionen von $3,34 \cdot 10^{-8} \text{ mol/s}$ und der Quantenausbeute von 1,2 ergibt sich für die Anzahl der Photonen pro Sekunde ein Wert von $2,78 \cdot 10^{-8} \text{ mol/s}$. In die Formel zur Effizienz eingesetzt, ergibt dies:

$$\xi = \frac{7,56 \cdot 10^{-8} \text{ mol/s} \cdot 2 \cdot 100 \%}{2,78 \cdot 10^{-8} \text{ mol/s}} = 543,88 \%$$

Damit beträgt die Effizienz der CdS-/ZnS-Nanopartikel katalysierten Wasserstoffbildung bei 544 %.

Systematische Fehler bei der Versuchsdurchführung, wie bspw. beim Ansetzen von Lösungen oder der nicht vollständig zu gewährleistenden Lichtundurchlässigkeit, können die Messergebnisse verfälschen.

5.4.4. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von der photokatalytischen Wasserstoffbildung im Chemieunterricht

Aufgrund des Anwendungsverbots von Cadmium sowie Phenanthrolin in der Schule, können beide Versuche nicht im Chemieunterricht durchgeführt werden. Eine Anwendung in Schülerlaboren oder mit alternativen Substanzen ist allerdings denkbar. Ist in der Schule kein Photometer vorhanden, bietet sich eine Kooperation mit Forschungseinrichtungen an.

Trotz des komplexeren Aufbaus und dem Einsatz von toxischen Chemikalien, ist die Durchführung der Versuche bedeutend für die Förderung von Kompetenzen der BNE. Die interdisziplinäre und holistische Verankerung im Chemiecurriculum kann vor allem für die Basiskonzepte „chemische Reaktion“ sowie „energetische Betrachtungen bei Stoffumwandlungen“ erfolgen. Dabei können sowohl photoinduzierte Reaktionen bzw. das Thema Aktivierungsenergie als auch Donator-Akzeptor-Konzepte der Photoreaktionen thematisiert werden. Darüber hinaus bietet es sich an, Vorteile sowie Funktionsweisen von Katalysatoren zu erarbeiten.

Ziel der Versuche ist vor allem die Betrachtung neuer und nachhaltiger Energieumwandlungsmöglichkeiten und damit der Gebrauch nicht-endlicher Ressourcen wie dem Sonnenlicht zur effizienten Energienutzung. Die photokatalytische Wasserstoffbildung trägt demnach zu einem werteorientierten Chemieunterricht bei, die auf einen nachhaltigen Nutzen von Ressourcen ausgelegt ist. Die Entwicklung dieser neuen

Technologien ist in der heutigen Zeit unabdingbar, da – wie bereits erwähnt – Alternativen für fossile sowie nukleare Energieträger gefunden werden müssen. Das Entwickeln und Reflektieren von nachhaltigeren Strategien stärkt das kritische Denken und die Problemlösefähigkeit von Schülern, und dass wünschenswerterweise über den unterrichtlichen Rahmen hinaus. Zusätzlich kann in diesem Kontext die Kompetenzen zur partizipativen Entscheidungsfindung gefördert werden, denn was passiert, wenn keine alternativen Energiequellen gefunden werden? Welche Vor- und Nachteile hat der Einsatz von nanopartikularer Photokatalysatoren und was sind die Konsequenzen, wenn diese im industriellen Maßstab eingesetzt werden? Die Diskussion dieser Fragen und darüber hinaus zeigt, welchen Einfluss heutiges Handeln auf die Zukunft haben können und wie am besten gemeinsam Entscheidungen getroffen werden und trägt im unterrichtlichen Kontext zu einer Methodenvielfalt bei.

Durch die Aktualität der Thematik der nachhaltigen Energieumwandlung liegt sowohl die Anwendbarkeit als auch die lokale und globale Bedeutung auf der Hand.

5.5. Experimente zum Einfluss von Nanopartikeln auf Zellen, Algen und Mikroorganismen

Hinsichtlich der vermehrten Verwendung von Nanomaterialien in Alltagsprodukten wäre es wünschenswert, den Einfluss dieser auf lebende Organismen sowie die Umwelt direkt überprüfen zu können. Aus ethischen Gründen und den möglichen Risiken für den Menschen, die Tiere und die Umwelt werden in der Forschung zunächst meist Modellorganismen verwendet, um mögliche schädliche Einflüsse zu untersuchen. Für den schulischen Kontext ist darüber hinaus die „**Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (RiSU)**“³¹ zu beachten, die unter anderem das Arbeiten mit biologischen Arbeitsstoffen reguliert. Da biologische Arbeitsstoffe infektiöse, toxische sowie sensibilisierende Wirkungen haben können, unterliegt das Arbeiten mit diesen im schulischen Kontext einer gesonderten Gefährdungsbeurteilung, welche deren Einsatzmöglichkeiten begrenzt bzw. reguliert

In diesem Kapitel werden daher Experimente mit verschiedenen Modellen bzw. Modellorganismen vorgestellt. Dabei wird der Einfluss von Zinkoxid- bzw. Silbernanopartikel auf Zellen der Linie MADINE DARBY CANINE KIDNEY II (MDCK-II, Kapitel 5.5.2), auf die Algenkultur CHLORELLA VULGARIS (Kapitel 5.5.3) sowie auf handelsübliche Backhefe, SACCHAROMYCES CEREVISIAE (Kapitel 5.5.4), erforscht.

Die möglichen toxischen Mechanismen, die bei diesen Experimenten ablaufen, sind teilweise bereits in Kapitel 4.2.2 unter „**Ressourcenschonung versus mögliche negative Einflüsse auf die Umwelt**“ sowie in Kapitel 4.2.3 unter „**Gesundheitliche Aspekte für den Menschen**“ **aufgeführt**. Die Wirkmechanismen von Nanomaterialien sind bisher noch nicht vollständig erforscht. An dieser Stelle werden daher lediglich einzelne Wirkmechanismen von Nanopartikeln in Zellen verkürzt dargestellt.

Es wird allgemein davon ausgegangen, dass der toxische Einfluss auf Zellen über einen oxidativen Stress erfolgt, der durch ROS ausgelöst wird. [179] Dabei können die Nanopartikel durch ihre hohe Oberflächenenergie in der Zelle entweder direkt ROS generieren oder deren Erzeugung durch die Störung des biochemischen Gleichgewichts indirekt verursachen. [179] Die direkte Erzeugung der ROS innerhalb der Zelle kann prinzipiell auf zwei Wegen erfolgen, indem entweder elektronenakzeptierende Gruppen mit

³¹ Detaillierte Bestimmungen für Tätigkeiten mit biologischen Arbeitsstoffen können in der „**Richtlinie zur Sicherheit im Unterricht (RiSU)**“ nachgelesen werden, welche seit 1994 durch Beschluss der Kultusministerkonferenz herausgegeben werden. Online verfügbar unter https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/1994/1994_09_09-Sicherheit-im-Unterricht.pdf (zuletzt geprüft am 13.09.2018).

den Elektronen der äußeren Orbitale der Oberflächenatome reagieren oder Energie, die durch die UV/VIS-Strahlung auf die Nanopartikel übertragen wird und deren Elektronen anregen kann, aufnehmen.

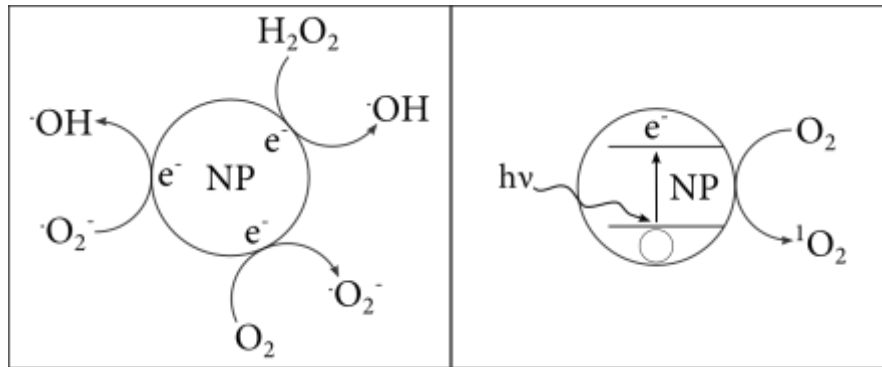


Abbildung 19 - Direkte ROS-Bildung: Reaktion elektronenakzeptierender Gruppen mit den äußeren Elektronen der Oberflächenatome der Nanopartikel (links), Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren in Nanopartikeln durch UV/VIS-Strahlung und die Übertragung der Energie des angeregten Zustandes auf Sauerstoffmoleküle (rechts). Nach YAN et al. [179]

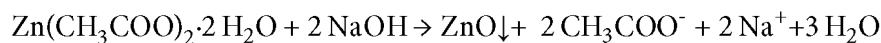
Die indirekte Erzeugung von ROS in der Zelle kann unter anderem über die Störung der Elektronentransportkette in den Mitochondrien oder die Aktivierung von ROS-ähnlichen Enzymen und Rezeptoren. [179]

5.5.1. Herstellung von Zinkoxid- und Silbernanopartikel sowie deren Nachweise

Die verwendeten Zinkoxid- sowie Silbernanopartikel werden in den folgenden Versuchen über eine Fällungsreaktion (Zinkoxidnanopartikel) bzw. elektrolytisch (Silbernanopartikel) hergestellt. In beiden Fällen können nur zu einem geringen Maß Aussagen über die Konzentration, die Anzahl und die exakte Größe der synthetisierten Nanopartikel getroffen werden, lediglich die Größenordnung ist durch verschiedene Nachweise ermittelbar. Auch sind die hergestellten Nanopartikel nicht von ihren Edukten oder möglichen Synthesenebenprodukten zu trennen, sodass deren Einfluss automatisch mitgetestet wird. Um einen möglichen Einfluss der Edukte oder Nebenprodukten auszuschließen, werden diese in der Regel separat ebenfalls auf mögliche Einflüsse überprüft. Da hierbei vorrangig qualitative Einflüsse betrachtet werden und nur zu einem geringen Anteil die Quantität, sollte demnach lediglich darauf geachtet werden, dass innerhalb einer Versuchsreihe identische Lösungen/Suspensionen bzw. vergleichbare Konzentrationen verwendet werden.

Zinkoxidnanopartikel

Die Synthese der Zinkoxidnanopartikel erfolgt durch eine Fällungsreaktion von Zinkacetat-Dihydrat mit Natriumhydroxid, welche beide zuvor in Ethanol gelöst werden. [180]



Die Versuchsdurchführung erfolgt anhand der Beschreibung bei WILKE et al. [181] Die konkreten Einwaagen für die Synthese der Zinkoxidnanopartikel in den folgenden Versuchen sind in der Tabelle 11 aufgeführt. Die erfolgreiche Synthese der Zinkoxidnanopartikel kann mithilfe einer Lichtquelle mit UV-Strahlung über eine blau- bis gelbliche Fluoreszenz nachgewiesen werden. [181, 182]

Tabelle 11 - Einwaagen für Herstellung von Zinkoxidnanopartikel für die Versuche der folgenden Unterkapitel.

Versuch	Zinkacetat-Dihydrat	Natriumhydroxid
5.5.2 Einfluss von Zinkoxidnanopartikeln auf Zellkulturen	2,2 g auf 100 mL Ethanol	0,3 g auf 35 mL Ethanol
5.5.3 Einfluss auf Algenkulturen	2,2 g auf 100 mL Ethanol	0,3 g auf 35 mL Ethanol
5.5.4 Einfluss auf Mikroorganismen	2,2 g auf 100 mL Ethanol	0,07 g auf 18 mL Ethanol

Um für die weiteren Experimente die Konzentration der synthetisierten Nanopartikel annähernd bestimmen zu können, wird davon ausgegangen, dass die Fällungsreaktion vollständig abläuft. Anhand der Reaktionsgleichung ist zu erkennen, dass für die Stoffmenge von Zinkoxid gilt:

$$n_{\text{ZnO}} = \frac{n_{\text{NaOH, Beginn}}}{2} = \frac{m_{\text{NaOH, Beginn}}}{M_{\text{NaOH, Beginn}} \cdot 2}$$

Über die Masse von Natriumhydroxid (siehe Tabelle 11) und die Stoffmenge von Natriumhydroxid (40 g/mol) ergibt sich damit die Stoffmenge von Zinkoxid $n_{\text{ZnO}} = 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$. Das Reaktionsgefäß enthält am Ende der Reaktion 133 mL, sodass sich für die Konzentration des Zinkoxids folgendes ergibt:

$$c_{\text{ZnO}} = \frac{3,75 \cdot 10^{-3} \text{ mol}}{0,133 \text{ L}} = 2,82 \cdot 10^{-2} \frac{\text{mol}}{\text{L}}$$

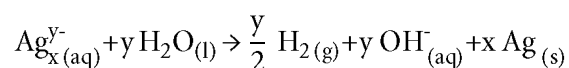
Die Stoffmengen weiterer Komponenten der Synthese lauten wie folgt:

$$n_{\text{Zn(Ac), Ende}} = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

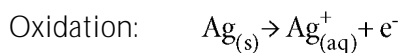
$$n_{\text{NaAc, Ende}} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

Silbernanopartikel

Silbernanopartikel können über verschiedene Reaktionen synthetisiert werden.³² Eine Möglichkeit ist Herstellung über eine kathodische Korrosion (verwendet in Kapitel 5.5.3), bei der durch Korrosion Nanopartikel an der Oberfläche einer Metallelektrode abgeschieden werden. [184] In diesem Fall werden eine Silber- sowie eine Graphitelektrode in einer 1 M Natriumnitrat-Lösung gegeben und für 45 Sekunden eine Wechselspannung von 20 V bei 50 Hz angelegt. [185] Die Nanopartikel werden dabei über eine Clusterbildung erzeugt³³, die aus einer Reaktion der entstandenen anionischen Silberspezies mit Wasser in der Reaktionslösung entstehen:



In Kapitel 5.5.4 werden die Silbernanopartikel elektrolytisch mithilfe einer Silbernitrat-Lösung (10^{-3} M) und zwei Silberelektroden dargestellt. Hierzu wird für 2 Minuten eine Spannung von 9 V angelegt. [186] Dabei laufen folgende Reaktionen an den Elektroden ab, wobei durch Agglomeration Silbernanopartikel in der Lösung entstehen:



Die erfolgreiche Synthese der Silbernanopartikel kann mithilfe eines Laserpointers durch den TYNDALL-Effekt³⁴ nachgewiesen werden.

5.5.2. Einfluss von Zinkoxidnanopartikeln auf Zellkulturen³⁵

Zur Untersuchung des Einflusses von Nanopartikeln auf Zellkulturen werden MDCK-II-Zellen verwendet, bei denen es sich um Epithelzellen handelt, die der Niere eines Cocker Spaniels entnommen wurden. Diese werden häufig als Modell in Experimenten verwendet, da sie eine schnelle Wachstumsrate aufweisen und bereits wenige Tage nach dem Aussähen eine konfluente, homogene Einzelschicht ausbilden und

³² Eine Übersicht über mögliche Synthesewege ist bspw. bei IRAVANI et al. zu finden. [183]

³³ Eine schematische Darstellung der Prozesse, die an der Metallelektrode ablaufen, ist bei VON HOFF et al. zu finden. [185]

³⁴ Für eine Erklärung des TYNDALL-Effekts: siehe unter Deutung in Kapitel 5.3.1.

³⁵ Die in diesem Unterkapitel präsentierten Ergebnisse sind in Zusammenarbeit mit Herrn Philipp LANFERMANN im Rahmen der Qualifikationsarbeit zur „Entwicklung von Schulexperimenten zur Cytotoxizität von Nanopartikeln“ entstanden.

Deformationen optisch deutlich erkennbar sind. [187] Bei einem toxischen Einfluss auf die Zellen kommt es zur Apoptose, bei der eine nukleare und cytoplasmatische Kondensation stattfindet (die Zelle schrumpft und wird kugelförmig) [188] und sich aus der konfluenten Einzelschicht löst.

Zur Beobachtung des Einflusses werden die Zellverbände unter dem Mikroskop betrachtet. In der Regel erfolgt in wissenschaftlichen Experimenten die Bewertung des Einflusses über das Zählen der Zellen in der Einzelschicht und wie sich diese Anzahl über die Zeit verändert. Für eine schulische Anwendung ist dies allerdings aus zeitlichen Gründen nicht geeignet, sodass zur Auswertung der Beobachtungen eine relative Skala eingeführt wird, anhand derer die Einflüsse der Zinkoxidnanopartikel sowie deren Synthesubstanzen verglichen werden können (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12 - Relative Skala zur Bestimmung des Ausmaßes des Einflusses verschiedener Substanzen.

Skalen-Nummer	Bedeutung
0	Keine Effekte erkennbar, Referenz
1	Vereinzelte Zellen zeigen leichte Veränderungen
2	Vereinzelte Zellen zeigen starke Veränderungen (Tod)
3	Einige Zellen sind abgestorben
4	Viele Zellen sind abgestorben
5	Alle Zellen sind abgestorben

Abbildung 20 zeigt beispielhaft mikroskopische Aufnahmen für die Skaleneinteilung zur Beschreibung des Grad der Veränderung der Zellen.

Da, wie im vorherigen Unterkapitel beschrieben, die durch die Fällungsreaktion hergestellten Zinkoxidnanopartikel nicht von der Lösung zu separieren sind, werden neben dem Produkt die Edukte sowie Nebenprodukte hinsichtlich ihres Einflusses überprüft. In der Literatur wird darüber hinaus die toxische Wirkung von Zinkoxidnanopartikeln häufig auf das verstärkte Freisetzen von Zink-Ionen zurückgeführt [189–191]. Daher wird zusätzlich ein besonders gut in Wasser lösliches Zinksalz (in diesem Fall Zinksulfat) hinsichtlich seines Einflusses überprüft. Die Testung des Edukts Natriumhydroxid wird durchgeführt, da die Natrium-Ionen in der verwendeten Konzentration keinen Einfluss auf die Zellen haben und die Hydroxid-Ionen werden durch die verwendete Pufferlösung neutralisiert.

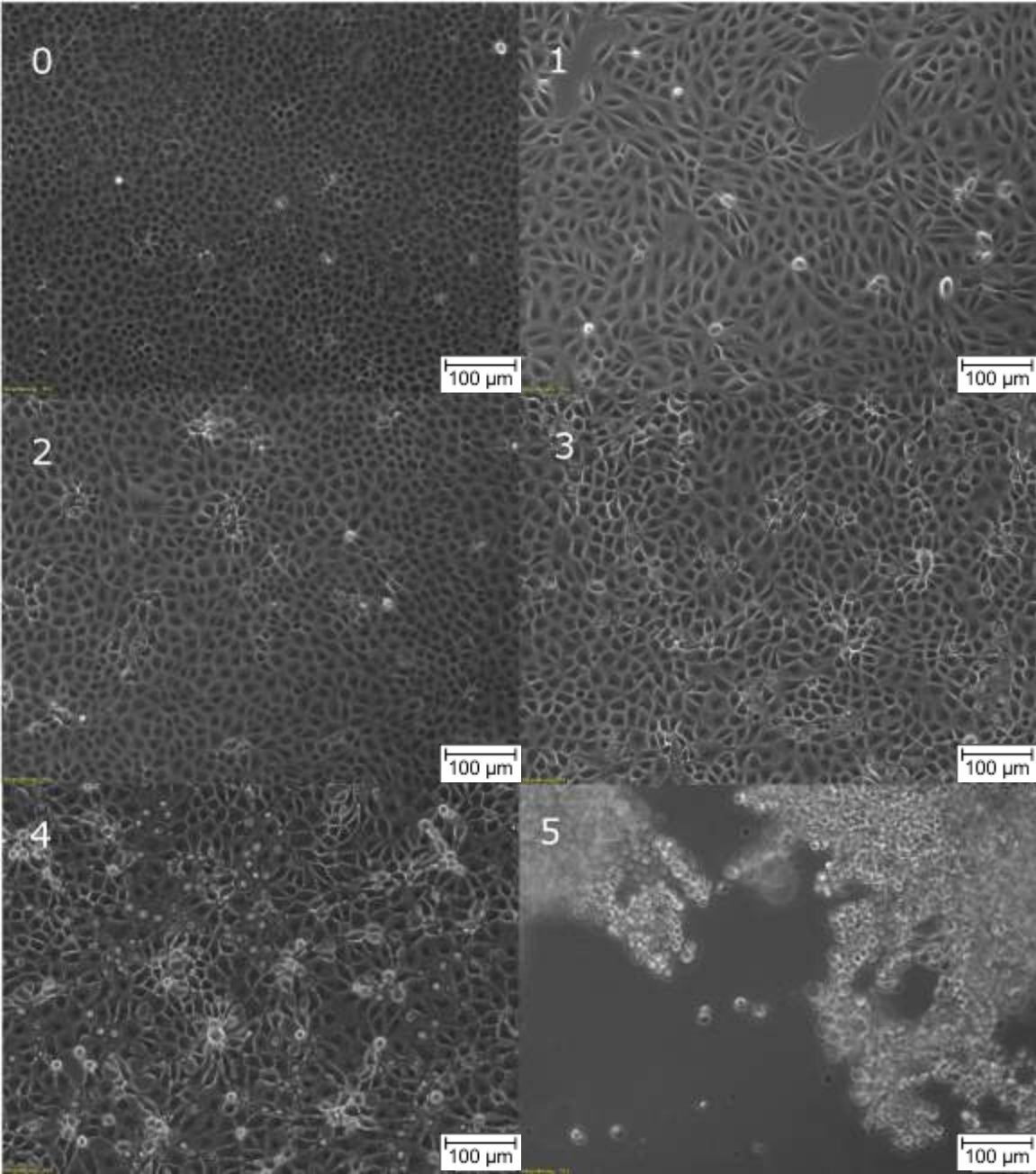


Abbildung 20 - Beispiele für die Skaleneinteilung zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Substanzen auf die Zellen der Linie MDCK-II.

Damit ergeben sich folgende Testsubstanzen:

Tabelle 13 - Zu testende Substanzen rund um die Zinkoxidnanopartikelsynthese für den Einfluss auf die Zellen sowie deren Funktion.

Substanz	Kategorie
Zinkoxidnanopartikel (NP)	Produkt
Natriumacetat (NaAc)	Nebenprodukt
Ethanol (EtOH)	Edukt
Zinkacetat-Dihydrat (ZnAc)	Edukt
Zinksulfat (Zn^{2+})	Gut lösliches Zinksalz

Geräte und Chemikalien

Sterile Werkbank, Mikroliterpipette, Mikroreaktionsgefäß, Handschuhe, Pinzette, Brutschrank (bei 37°C), Inversionsmikroskop (bspw. OLYMPUS IX83, mit integrierter 13-TPC-Kamera), Zellkulturen in Reaktionsschale (μ -Dish 35 mm, IBIDI), Zellmedium (Minimum Essential Medium (LONZA), zusätzlich 10 % fetales Kälberserum sowie 4 mM L-Glutamin und 5 % Kohlenstoffdioxid als Puffer).

Zinkoxidnanopartikel-Lösung (Synthese nach Kapitel 5.5.1), Zinkacetat-Dihydrat, Natriumacetat, Ethanol, Zinksulfat.

Durchführung

Die Durchführungen der Testungen für alle Substanzen finden nach einem identischen Ablauf statt. Zunächst wird eine Medium/Testsubstanz-Mischung in Mikroreaktionsgefäßen hergestellt. Dazu wird die zu testende Stammlösung in einem vorgegebenen Verhältnis zu frischem Zellmedium pipettiert und anschließend mit dem Vortexmischer gut durchgeschüttelt. Es werden folgende Mischungen (Mischverhältnis 1:99) angesetzt³⁶:

³⁶ Die Konzentrationen bzw. Stoffmengen der einzelnen Komponenten sind in Kapitel 5.5.1 unter der Synthese der Zinkoxidnanopartikel aufgeführt. Für das Ansetzen der Zinksulfatlösung werden 0,287 g Zinksulfat in 13,3 mL Wasser gelöst; dies entspricht der Stoffmengenkonzentration an Zinkacetat-Dihydrat, die bei der Nanopartikelsynthese eingesetzt wird.

Tabelle 14 - Mischverhältnisse der Stammlösungen mit dem Zellmedium.

Substanz	Stammlösung	Zellmedium
NP	10 µL	990 µ
ZnAc	10 µL	990 µ
EtOH	10 µL	990 µ
NaAc	10 µL	990 µ
Zn ²⁺	10 µL	990 µ

Anschließend wird mithilfe einer Vakuumpumpe das alte Medium aus der zu untersuchenden Reaktionsschale entfernt und die Medium/Testsubstanz-Mischung hinzu pipettiert. Nach einer gleichmäßigen Verteilung der Mischung in der Reaktionsschale werden diese zurück in den Brutschrank gestellt, anschließend nach 1, 2, 3, 4, 5 sowie zwischen 22-24 Stunden herausgenommen und unter dem Mikroskop betrachtet. Zum Vergleich wird eine Referenzprobe in den Brutschrank gestellt und ebenfalls zu den entsprechenden Zeitpunkten unter dem Mikroskop betrachtet.

Beobachtung

Wie in Abbildung 21 zu sehen, sind bereits nach einigen Stunden Veränderungen der Zellen zu erkennen, welche mit den NP-, ZnAc- sowie Zn²⁺-Lösungen in Berührung gekommen sind. Der Abbildung 22 ist zu entnehmen, dass die Einflüsse über die Zeit bei diesen drei Proben stetig zunehmen und nach 22 bzw. 24 Stunden alle Zellen abgestorben sind.

Im Gegensatz dazu ist innerhalb weniger Stunden kein Einfluss der Proben mit EtOH und NaAc auf die Zellen erkennbar (siehe Abbildung 21). Die EtOH-Lösung zeigt nach 23 Stunden einen leichten Einfluss, während bei der Probe NaAc auch nach 24 Stunden keine Veränderungen zu beobachten sind (siehe Abbildung 22).

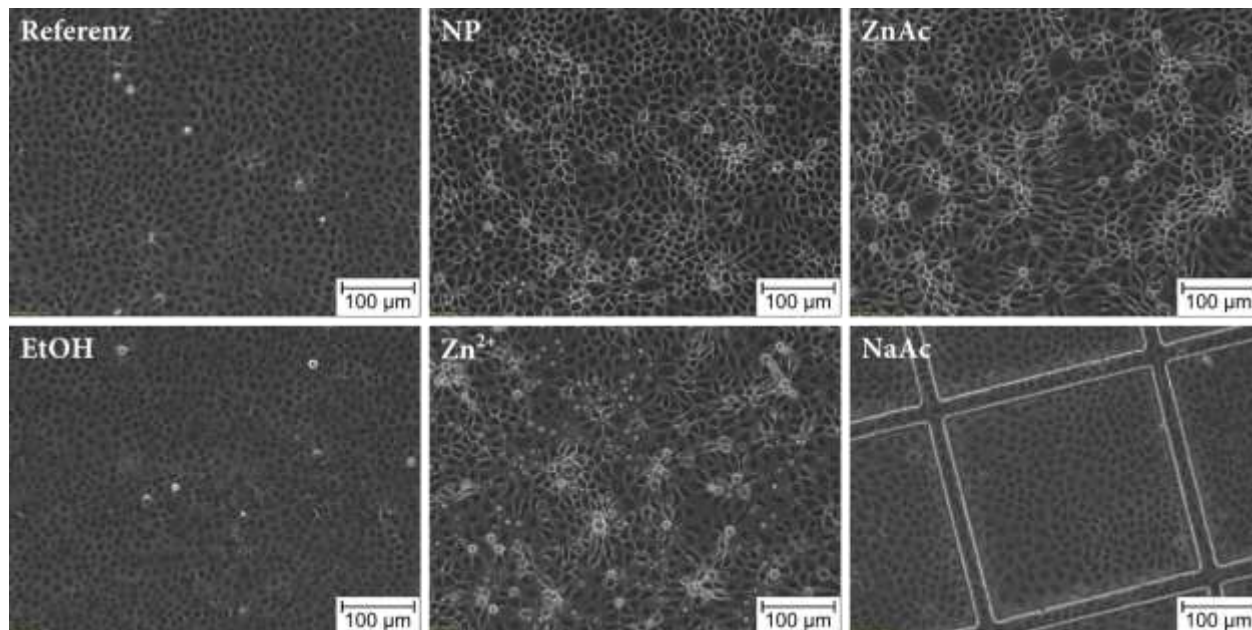


Abbildung 21 - Mikroskopaufnahmen der MDCK-II-Zellen nach fünf Stunden. Abgebildet ist eine Referenzprobe (oben links), sowie unter Einfluss von Zinkoxidnanopartikel (NP, oben mittig), Zinkacetat (ZnAc, oben rechts), Ethanol (EtOH, unten links), Zinksulfat (Zn^{2+} , unten mittig) und Natriumacetat (NaAc, unten rechts – Linien sind durch eine andere Reaktionsschale bedingt).

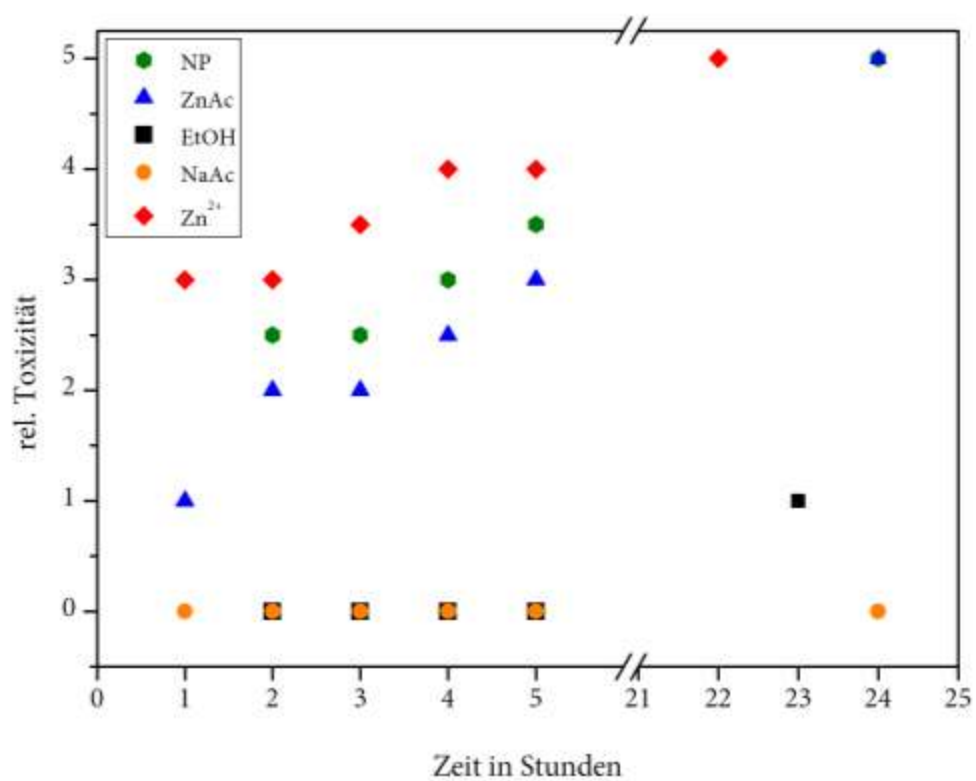


Abbildung 22 - Auftragung der relativen Toxizität der Zinkoxidnanopartikel (NP), Zinkacetat (ZnAc), Ethanol (EtOH), Natriumacetat (NaAc), Zinksulfat (Zn^{2+}) gegen die Zeit in Stunden.

Deutung

Die Deformation sowie die Clusterbildung einzelner Zellen oder Zellenverbänden und die damit einhergehende Auflösung der Zellmembran belegen einen toxischen Einfluss einiger Komponenten der Zinkoxidnanopartikel-Synthese. Das Lösungsmittel Ethanol sowie das Synthesenebenprodukt Natriumacetat scheinen dabei kaum bzw. keinen Einfluss auf die MDCK-II-Zellen zu haben, da nach einem Tag lediglich einige Zellverformungen in der Ethanol-Reaktionsschale zu beobachten sind. Ein Absterben der Zellen ist nicht zu erkennen.

Bei der Zinkacetat-Dihydrat-Lösung sowie bei den Zinkoxidnanopartikeln sind ähnlich starke toxische Einflüsse zu erkennen. Dadurch, dass sich beim Natriumacetat bei den verwendeten Konzentrationen keine Veränderungen beobachten lassen (die Natrium- und Acetat-Ionen damit keinen Einfluss zu haben scheinen), kann die toxische Wirkung von Zinkacetat auf die Zink-Ionen zurückgeführt werden. Der Vergleich mit der toxischen Wirkung der Zinksulfat-Lösung und damit im Besonderen der Zink-Ionen belegen zusätzlich, dass vor allem die vermehrte Freisetzung von Zink-Ionen in Lösung einen toxischen Einfluss auf die Zellen ausüben. Dass diese beim Zinksulfat im Vergleich zu Zinkacetat verstärkt stattfindet, lässt sich über das niedrigere Löslichkeitsprodukt von Zinksulfat (350 g/L, im Vergleich Zinkacetat 430 g/L)³⁷ begründen.

Da die Zinkoxidnanopartikel nicht von den Komponenten der Synthese getrennt werden können, können keine eindeutigen Aussagen über den toxischen Einfluss von den Nanopartikeln selbst getroffen werden. Da allerdings von einer vollständigen Fällungsreaktion ausgegangen wird und das weitere Syntheseprodukt sowie das Lösungsmittel als Einflussfaktoren ausgeschlossen werden können, kann zumindest von einem Einfluss der Nanopartikel ausgegangen werden – auch wenn der Einfluss mithilfe dieses Experiments nicht zwangsläufig quantifiziert werden kann. Wie eingangs angeführt, wird die Toxizität der Zinkoxidnanopartikel häufig auf das Freisetzen von Zink-Ionen zurückgeführt, was die Ergebnisse mit den Zinksulfat- und Zinkacetat-Lösungen bestätigen.

³⁷ Werte für die Löslichkeitsprodukte sind online in der GESTIS-Stoffdatenbank einzusehen unter http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/000000.xml?f=templates&fn=default.htm&vid=gestisdeu:sdbdeu (zuletzt geprüft am 18.09.2018).

5.5.3. Einfluss auf Algenkulturen³⁸

Bei der verwendeten Algenkultur handelt es sich um *CHLORELLA VULGARIS*³⁹, eine einzellige eukaryotische Grünalge, welche eine kugelförmige Form (Durchschnitt von 2,5 bis 12 µm) [192] und eine schnelle Wachstumsrate aufweist. [193] Sie kommt in Süß- und Brachwasser sowie in stehenden und fließenden Gewässern vor und wird in der Industrie aufgrund des hohen Lipid- und Proteinanteils bspw. in Lebensmitteln und Biokraftstoffen verwendet. [194]

Geräte und Chemikalien

Lichtmikroskop (bspw. OLYMPUS BX51 mit integrierter DP71 Kamera), Bildaufnahmesoftware cell[^]d (OLYMPUS), Algenkultur *CHLORELLA VULGARIS*, flüssiger Pflanzendünger, Pipetten (1 mL und 10 mL), 4 Schnappdeckelgläser, durchsichtige Plastikflaschen (0,5 L).

Zinkoxid- und Silbernanopartikel (nach Synthese unter Kapitel 5.5.1), Ethanol, Wasser.

Durchführung

Herstellung der Algensuspension: Mit einem Spatel wird ein Teil der Algenkultur in eine durchsichtige Plastikflasche gegeben, mit etwa 300 mL stillem Wasser aufgefüllt und einige Tropfen flüssiger Pflanzendünger hinzugegeben. Die Plastikflasche wird an einem sonnigen Platz (bspw. Fensterbank) bei Zimmertemperatur für einige Wochen gelagert, um eine ausreichende Algenkonzentration zu erreichen. In regelmäßigen Abständen wird die Flasche leicht geschüttelt, damit sich kein Bodensatz bildet. Zu Versuchsbeginn wird ein Tropfen der Algensuspension als Referenzprobe unter dem Lichtmikroskop betrachtet.

Einfluss von Nanopartikeln: Die Algensuspension wird geschwenkt und vier Schnappdeckelgläser werden jeweils mit etwa 9,50 mL der Suspension gefüllt. In jeweils eines der Schnappdeckelgläser wird zusätzlich 0,5 mL Silbernanopartikel, 0,5 mL Zinkoxidnanopartikel und 0,5 mL Ethanol gegeben; das vierte Schnappdeckelglas enthält als Referenz lediglich die Algensuspension. Die Gläser werden mit den Deckeln abgedeckt (nicht verschlossen) und für eine Woche an einem sonnigen Ort platziert. Nach 24 Stunden sowie

³⁸ Die in diesem Unterkapitel präsentierten Ergebnisse sind in Zusammenarbeit mit Herrn Philipp LANFERMANN im Rahmen der Qualifikationsarbeit zur „Entwicklung von Schulexperimenten zur Cytotoxizität von Nanopartikeln“ entstanden.

³⁹ Diese wurden von der „Sammlung von Algenkulturen der Universität Göttingen“ zur Verfügung gestellt.

nach einer Woche wird jeweils ein Tropfen der Suspensionen auf einen Objektträger gegeben und unter einem Lichtmikroskop betrachtet.

Beobachtung⁴⁰

Die grünliche Suspension lässt zu Beginn des Versuchs unter dem Mikroskop erkennen, dass die Algen gleichmäßig verteilt sind und eine runde Form aufweisen. Nach einem Tag und nach einer Woche lassen sich bei der Referenzprobe keine äußerlichen Veränderungen sowie keine Veränderungen unter dem Mikroskop beobachten (siehe Abbildung 23).

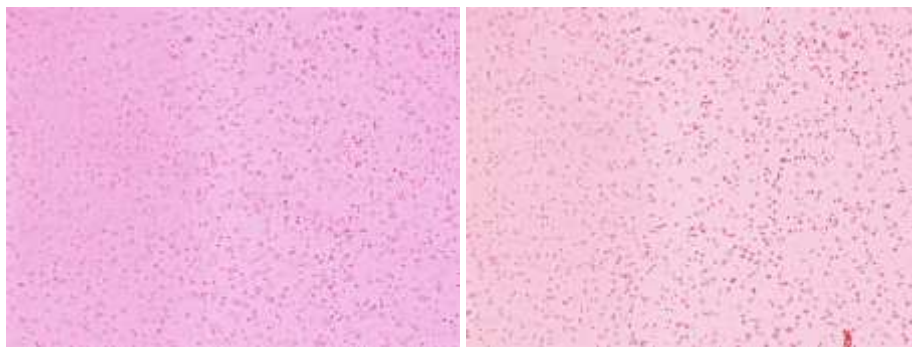


Abbildung 23 - Mikroskopische Aufnahmen der Referenzprobe nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).

In dem Schnappdeckelglas unter Einfluss der Zinkoxidnanopartikel-Lösung ist bereits nach einem Tag zu erkennen, dass die Algen verklumpen. Diese Anhäufungen erscheinen grünlich und sind von einem farblosen Medium umgeben. Unter dem Mikroskop sind diese Verklumpungen ebenfalls nach einem Tag zu erkennen (siehe Abbildung 24 links), nach einer Woche sind diese wieder in kleinere Teile zerfallen (siehe Abbildung 24 rechts).

⁴⁰ Aufgrund eines verwendeten roten Farbfilters besitzen alle mikroskopischen Aufnahmen einen Rotstich.

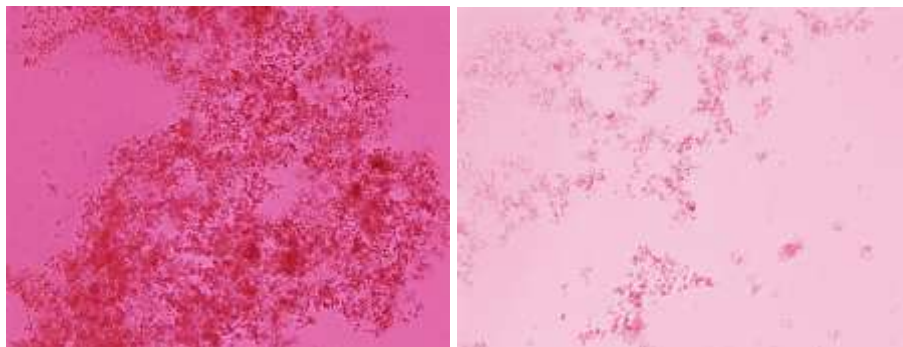


Abbildung 24 - Mikroskopische Aufnahmen der Algen unter Einfluss von Zinkoxidnanopartikeln nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).

Mit dem bloßen Auge und unter dem Mikroskop lassen sich bei der Probe mit Ethanol keine Veränderungen nach einem Tag und nach einer Woche erkennen (siehe Abbildung 25).

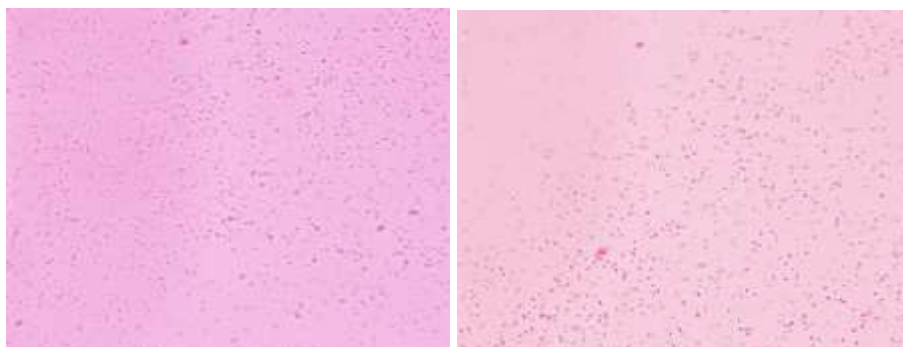


Abbildung 25 - Mikroskopische Aufnahmen der Algen unter Einfluss von Ethanol nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).

Bei der Probe mit den Silbernanopartikeln lässt sich nach einem Tag makroskopisch keine Veränderung feststellen. Nach einer Woche hat sich die Probe entfärbt. Mikroskopisch ist nach einem Tag sowie nach einer Woche keine Veränderung feststellbar (siehe Abbildung 26).

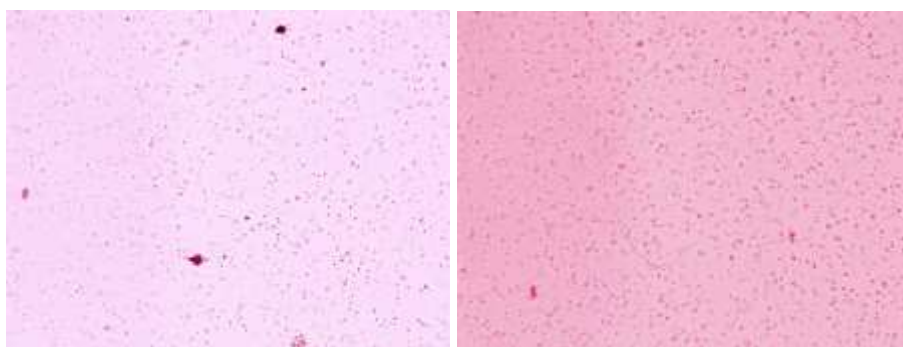


Abbildung 26 - Mikroskopische Aufnahmen der Algen unter Einfluss von Silbernanopartikel nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).

Deutung

Aufgrund der Ähnlichkeit zur Referenzprobe scheint der Ethanol in der verwendeten Menge keinen Einfluss auf die Algen zu haben. Die Zinkoxidnanopartikel scheinen dagegen einen erheblichen Einfluss auf die Algen auszuüben. Das Ansammeln deutet darauf hin, dass die Algen abgestorben sind; der Farbverlust deutet auf eine Zerstörung des Chlorophylls hin. Auch die Silbernanopartikel scheinen das Chlorophyll der Algen anzugreifen, da die Suspension entfärbt ist. Da aber darüber hinaus keine Veränderungen der Suspensionen zu beobachten sind, bspw. in Form von Verklumpungen, scheinen die Silbernanopartikel in der verwendeten Konzentration einen geringeren Einfluss auf die Algenkultur auszuüben als die Zinkoxidnanopartikel.

5.5.4. Einfluss auf Mikroorganismen⁴¹

Die Backhefe (*SACCHAROMYCES CEREVISIAE*) zählt zu den einzelligen eukaryotischen Mikroorganismen, welche bspw. Zucker oder Kohlenhydrate als Energiequellen nutzen, um Arbeit innerhalb der Zelle zu verrichten. [195] Heutzutage werden Mikroorganismen sehr häufig als Modellorganismus für eukaryotische Lebewesen betrachtet [195], da sie leicht zugänglich sind und sich Einflüsse auf deren Stoffwechsel leicht beobachten lassen. Eine dieser Stoffwechselreaktionen ist die alkoholische Gärung, welche in diesem Kapitel im Kontext des Einflusses von Nanomaterialien betrachtet wird.

Geräte und Chemikalien

Kolbenprober (100 mL), Erlenmeyerkolben (50 mL), durchbohrter Stopfen mit Glasrohr, Bechergläser (100 mL, 200 mL), Magnetrührer mit Heizfunktion, Magnetrührstäbchen, 2 Schlauchschellen, Schlauchstück (5 cm), 3 Stative, 4 Doppelmuffen, 4 Stativklammern, 1 Thermometer, Kristallisierschale (200 mL).

Glucose, frische Backhefe (*SACCHAROMYCES CEREVISIAE*), Wasser, Zinkoxid- und Silbernanopartikel (synthetisiert wie unter Kapitel 5.5.1 beschrieben).

⁴¹ Die in diesem Kapitel präsentierten Experimente sind in Zusammenarbeit mit Frau Isabel BOSELT im Rahmen der Qualifikationsarbeit zur „Entwicklung von Schulexperimenten zur Toxizität von Metall- und Metalloxid-Nanopartikeln“ entstanden.

Durchführung

Es wird eine Gasauffang-Apparatur nach folgender Abbildung 27 aufgebaut und auf Dichtigkeit geprüft.

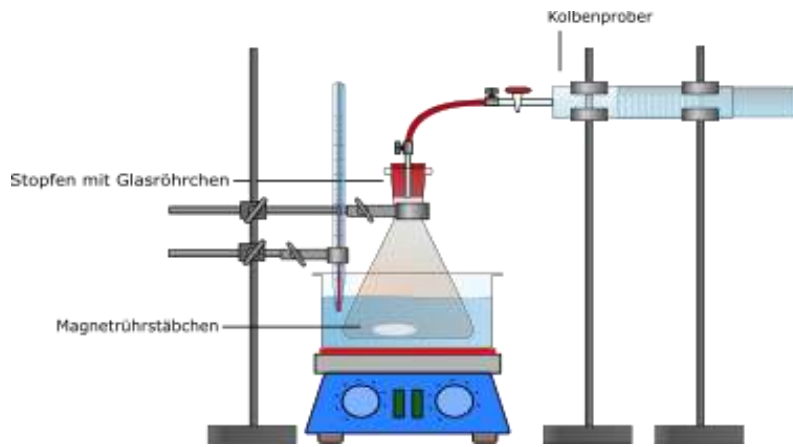


Abbildung 27 – Gasauffang-Apparatur für die alkoholische Gärung.⁴² [196]

In dem 100 mL Becherglas werden 15 g frische Backhefe in 60 mL demineralisiertem Wasser suspendiert. In dem 200 mL Becherglas werden 1,5 g Glucose in 150 mL Wasser gelöst. Das Wasserbad wird mit Leitungswasser gefüllt und auf 35°C erwärmt, um eine optimale Gärung der Hefe zu gewährleisten. Anschließend werden 10 mL Hefe-Suspension sowie ein Magnetrührstäbchen in den Erlenmeyerkolben gegeben. Es werden 20 mL der Glucoselösung hinzugefügt und der Erlenmeyerkolben mit dem Stopfen verschlossen. Innerhalb der nächsten 60 Minuten wird alle 5 Minuten das Volumen am Kolbenprober abgelesen und notiert (Referenz).

Im Anschluss wird der Erlenmeyerkolben gereinigt und der Versuch erneut durchgeführt. Zusätzlich zu der Hefe-Suspension und der Glucoselösung werden diesmal 2,0 mL Silbernanopartikel hinzugegeben. Die Werte werden ebenfalls innerhalb von 60 Minuten alle 5 Minuten notiert. In einem dritten Durchlauf werden anstatt der Silbernanopartikel 2,0 mL Zinkoxidnanopartikel hinzugefügt und ebenfalls das Volumen notiert.

⁴² Mit freundlicher Genehmigung des John Wiley and Sons Verlags (siehe Anhang A.1.4.).

Beobachtung

Ein Gas wird in dem Kolbenprober aufgefangen. Im Verhältnis zur Referenz wird bei dem Ansatz mit den Zinkoxidnanopartikeln weniger Gas produziert. Bei der Probe mit den Silbernanopartikeln wird kein/kaum Gas gebildet (siehe Abbildung 28).

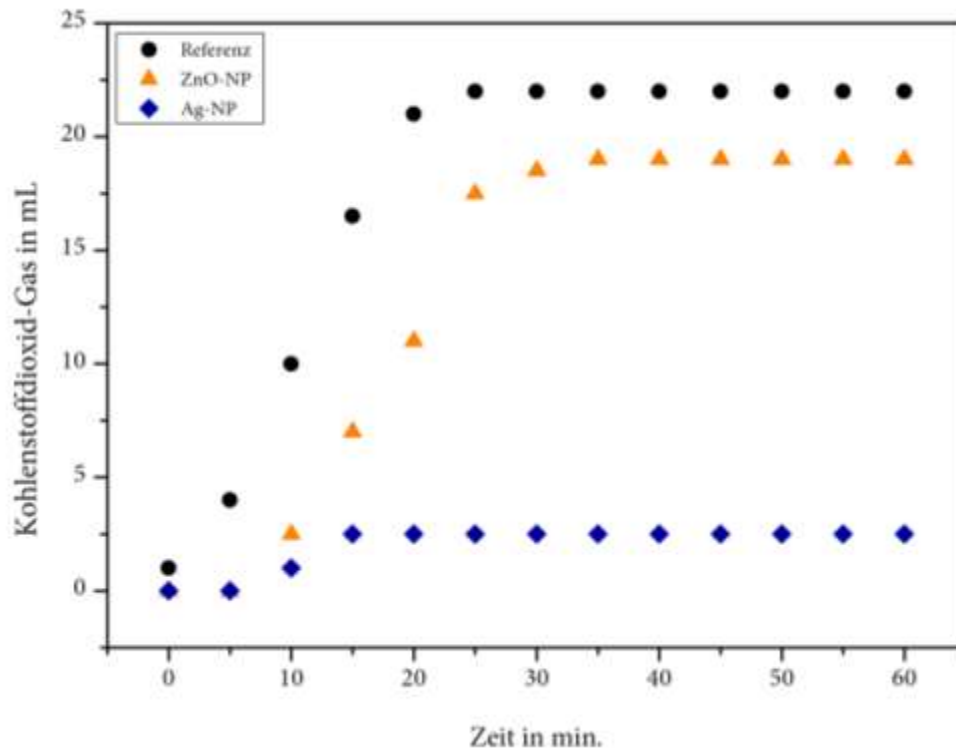
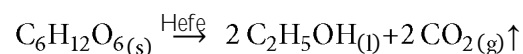


Abbildung 28 - Bildung von Kohlenstoffdioxid-Gas in Abhängigkeit von der Zeit.

Deutung

Bei der Reaktion von Hefe mit Zucker findet die alkoholische Gärung statt. Dabei wird zunächst bei der Spaltung von Glucose (als Glykolyse bezeichnet) Pyruvat gebildet, welches im Anschluss in zwei Schritten zu Ethanol umgesetzt wird. Im ersten Schritt wird Kohlenstoffdioxid-Gas abgespalten, welches im Kolbenprober aufgefangen wird. [197] Vereinfacht kann die Reaktion folgendermaßen dargestellt werden:



Durch das aufgefangene Kohlenstoffdioxid-Gas kann auf den Gärvorgang geschlossen werden, welcher demnach durch den Zusatz von Zinkoxid- oder Silbernanopartikeln beeinflusst wird. Aus den Beobachtungen kann abgeleitet werden, dass in Gegenwart von Zinkoxid- und Silbernanopartikeln die

Kohlenstoffdioxidproduktion bei der alkoholischen Gärung gehemmt wird. Da eine Charakterisierung der Nanopartikel in diesem Kontext allerdings nicht erfolgt (weder Größe, Anzahl noch Konzentration), kann keine Aussage über deren Effektivität gemacht werden. In diesem Fall scheinen die Silbernanopartikel einen negativeren Effekt auf die alkoholische Gärung zu haben, was allerdings auch daran liegen könnte, dass die Konzentration dieser höher ist als die der Zinkoxidnanopartikel.

5.5.5. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von Experimenten zum Einfluss von Nanopartikeln im Chemieunterricht

Die in diesem Kapitel erörterten Experimente sind im hohem Maße geeignet, um interdisziplinär und holistisch im Chemie- und Biologieunterricht der Sekundarstufe II thematisiert zu werden.⁴³ Am Beispiel der elektrolytischen Herstellung der Silbernanopartikel kann dabei auf das Donator - Akzeptor - Basiskonzept eingegangen werden, indem der Bau von Elektrolysezellen beschrieben und die Elektrolyse als Umkehrung der Vorgänge im galvanischen Element gedeutet werden. Durch die Versuche mit den Zellen und Algen können im Biologieunterricht neben toxischen Wirkungen und damit verbunden den verschiedenen Arten von Stofftransport zwischen Kompartimenten (passiver und aktiver Transport) ebenfalls die Unterschiede zwischen prokaryotischen und eukaryotischen Zellen beschrieben werden (beides Kompetenzbereich Fachwissen Kompartimentierung). Der Versuch zum Einfluss der Nanopartikel auf die alkoholische Gärung lässt sowohl aus chemischer als auch biologischer Sicht vertiefend beleuchten. Dabei kann im Chemieunterricht die Stoffklasse der Alkanole näher betrachtet werden (Basiskonzept Stoff - Teilchen) oder **reflektiert werden**, „dass Methanol und Ethanol als Zellgifte wirken.“ [132, S. 19] Darauf aufbauend können **die Schüler** „ihre Kenntnisse über die Oxidation von Ethanol auf physiologische Prozesse an[wenden]: Alkoholabbau im Körper, **Herstellung von Essigsäure.**“ [132, S. 19] Der Schwerpunkt der alkoholischen Gärung kann darüber hinaus im Biologieunterricht auf die Enzymkinetik gelegt werden. Dabei kann die Wirkungsweise von Enzymen als Biokatalysatoren erläutert werden (Kompetenzbereich Fachwissen Stoff- und Energieumwandlung) und deren Einflussfaktoren (bspw. Temperatur und Druck) experimentell bestimmt werden.

⁴³ Die Verknüpfungen zu Basiskonzepten beruhen auf Inhalten des Niedersächsischen Kerncurriculums für die Sekundarstufe II der Fächer Chemie [132] und Biologie [198].

Wie zu Anfang dieses Kapitels angeführt, werden die Experimente unter anderem aus ethischen Gründen an Modellorganismen durchgeführt. Was dies in einem größeren Kontext unter anderem für die chemische Industrie bedeutet, bspw. bei der Erprobung von neuen Medikamenten oder der Entwicklung von Kosmetika, kann als Diskussthema zu einem werteorientierten Chemieunterricht beitragen. Dabei ist es sinnvoll, detaillierter auf die Aussagekraft von Modellexperimenten einzugehen und Fragen zur Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen von einem Organismus auf einen anderen zu diskutieren. Durch die einfache Kultivierung und den vermehrten Einsatz von *CHLORELLA VULGARIS* in Alltagsprodukten wie Nahrungsergänzungsmitteln und Kosmetika [192] bietet sich der Einsatz dieser Alge im schulischen Kontext an und unterstreicht die lokale Bedeutung für Schüler. In diesem Kontext können zusätzlich positive Seiten des Einflusses der Nanopartikel auf die Algen hervorgehoben werden: Studien belegen, dass *CHLORELLA VULGARIS* in der Lage ist, Schwermetall-Ionen zu binden. [199–201] Diese Biosorption könnte dazu genutzt werden, kontaminiertes Wasser zu reinigen, sei es von Schwermetallen oder von Nanomaterialien. All diese Betrachtungsweisen können das kritische Denken und die Problemlösefähigkeit der Schüler fördern.

Da durch die Experimente ein Einfluss von Nanopartikeln auf Zellen, Algen sowie Mikroorganismen nicht ausgeschlossen werden kann, stellt sich nun die Frage, welche Handlungsoptionen für die Schüler in ihrem Alltag besteht, in dem Nanopartikel in vielen Alltagsgegenständen vorhanden sind. Hierzu können vielseitige Diskussionen geführt werden, die zum einen zur Förderung von Methodenkompetenzen beitragen können, aber auch Strategien zu einer partizipativen Entscheidungsfindung an die Hand geben können. Dabei sollten mögliche Umsetzungsratschläge für eine nachhaltige Entwicklung vor allem die direkte Anwendbarkeit im Alltag der Schüler fokussieren.

Die Fülle an Vernetzungen zu den Kriterien für Experimente im Kontext einer BNE im Chemieunterricht zeigen, dass die Versuche dieses Kapitels in einem besonders hohen Maße für die Förderung von BNE-Kompetenzen im Chemieunterricht geeignet sind.

5.6. Experimente zu Polymermembrane⁴⁴

Die Weiterentwicklung der Nanotechnologie kann sich unter anderem durch neuartige Filtersysteme vorteilhaft auf die Reduktion der Schadstoffemission in die Umwelt auswirken. Nanoporöse Polymermembrane können eine effizientere Alternative zu herkömmlichen Filtern für Trinkwassersysteme darstellen oder in Fahrzeugen als Nanopartikel-Emissionsfilter eingesetzt werden. [202]

Polymermembrane können aus verschiedenen Polymeren bestehen, z. B. Polysulfone, Polyether oder Cellulosederivate [203] und können je nach Herstellungsverfahren unterschiedliche Charakteristika wie Porengröße, Beschaffenheit und Filterfunktionen aufweisen. Ein möglicher Herstellungsprozess kann über das Phaseninversions-Verfahren erfolgen, bei dem die Mischungslücke einer Dreikomponentenmischung aus Polymer-Lösungsmittel-Nichtlösungsmittel ausgenutzt wird (siehe Abbildung 29). [203] Dabei wird eine Phasentrennung in einer homogenen Polymerlösung hervorgerufen, entweder durch einen Temperaturwechsel oder durch den Kontakt mit einem Nichtlösemittel in flüssiger oder gasförmiger Phase [204]. Aus der polymerreichen Phase entsteht eine poröse Matrix, aus der polymerarmen werden Poren. [204].

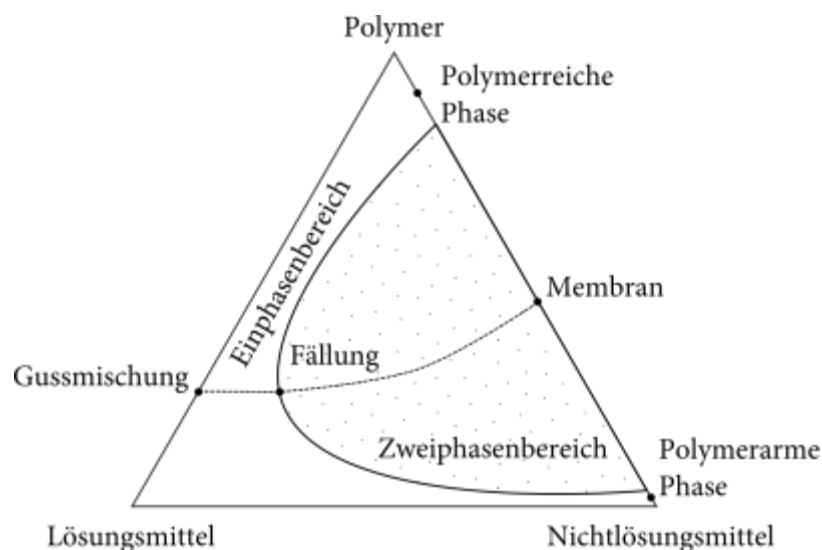


Abbildung 29 - Schematische Darstellung des Phaseninversionsverfahrens zur Herstellung von Membranen im Phasendiagramm (modifiziert nach STRATHMANN et al. [205])

⁴⁴ Die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse sind in Zusammenarbeit mit Frau Laura JUSTUS im Rahmen der Qualifikationsarbeit „Vom Tischtennisball zum Filter: Entwicklung von Schulexperimenten mit Cellulosederivat-Membranen“ entstanden.

In den folgenden Versuchen werden in einem Phaseninversionsverfahren Membrane aus Tischtennisbällen hergestellt (5.6.1 Synthese der Polymermembran) und deren Eigenschaften untersucht. Dazu wird zunächst deren Filtrierfähigkeiten (5.6.2 Filtrationswirkung der Membran) und deren Anfälligkeit gegenüber verschiedenen Einflussfaktoren (5.6.3 Anfälligkeit der Membran gegenüber organischen Lösungsmitteln, pH-Wert und hohen Temperaturen) hin untersucht.

5.6.1. Synthese der Polymermembran

Geräte und Chemikalien

Tischtennisball, Cuttermesser, Becherglas (50 mL), Messzylinder (50 mL), Magnetrührer mit Magnetrührstäbchen, Petrischale, Spatel, großes Wasserbad, Lichtmikroskop, Rasterelektronenmikroskop.

Aceton, destilliertes Wasser.

Durchführung

Ein halber Tischtennisball wird mit dem Cuttermesser zerschnitten und in das Becherglas gegeben. Anschließend werden 10 mL Aceton hinzugefügt (siehe Abbildung 30, links) und auf dem Magnetrührer so lange gerührt, bis sich der Tischtennisball vollständig gelöst hat und sich eine homogene Masse bildet. Anschließend wird diese Gussmischung mit einem Spatel auf die Unterseite einer Petrischale möglichst gleichmäßig aufgetragen (siehe Abbildung 30, zweite von links). Die Petrischale wird dann zum Fällen der Membran in das Wasserbad gelegt (siehe Abbildung 30, zweite von rechts), bis sich diese anfängt von der Petrischale zu lösen. Anschließend wird der Rest der Membran vorsichtig von der Petrischale gelöst (siehe Abbildung 30, rechts).



Abbildung 30 - Membranherstellungsschritte: Einschmelzen des Tischtennisballs (links), Auftragen der zähflüssigen Tischtennisball/Aceton-Mischung (zweite von links), Fällen der Membran im Wasserbad (zweite von rechts), Ablösen der Membran (rechts).

Die gefällte Membran wird unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet.

Beobachtung

Beim Lösen des Tischtennisballs in Aceton bildet sich eine milchig zähflüssige Masse. Diese bleibt beim Auftragen auf der Petrischale kleben. Wird diese ins Wasser gegeben, wird die zähflüssige Masse fest und löst sich von der Petrischale. Im Wasser bleibt eine undurchsichtig weiße, feste Scheibe zurück, welche

flexibel sowie reiß- und knickfest ist. Unter dem Rasterelektronenmikroskop sind einige Poren sowie einige nicht vollständig ausgebildete Poren oder Blasen zu beobachten (siehe Abbildung 31). Diese liegen etwa im 0,5-4 µm (entsprechend 500 bis 4000 nm) Bereich.

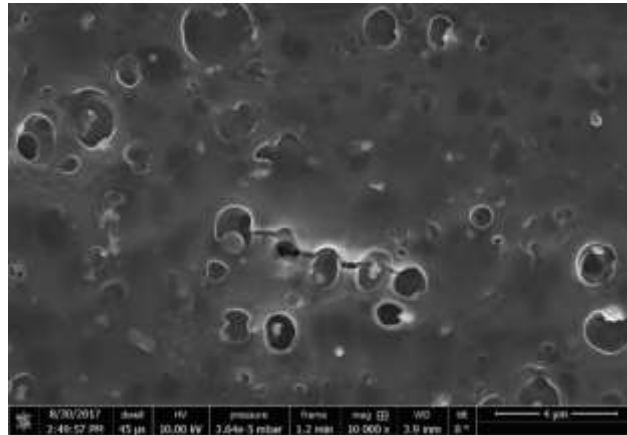


Abbildung 31 - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von der gefällten Membran aus dem Tischtennisball.

Deutung

Tischtennisbälle bestehen aus Zelluloid, welches eine Gruppe von Kunststoffverbindungen aus Cellulosenitrat und dem Weichmacher Campher bezeichnet. [206] Cellulosenitrat ist in Aceton löslich. Es entsteht eine Polymermischung, die sich gut auf der Petrischale verteilen lässt. Im Wasserbad wird das Lösungsmittel Aceton durch das Nichtlösungsmittel Wasser ausgetauscht und das Polymer fällt unter Bildung einer porösen Matrix aus. Die gefällte Membran weist asymmetrische, nano- bis mikrometergroße Strukturen auf, was unter dem Elektronenmikroskop zu erkennen ist.

5.6.2. Filtrationswirkung der Membran

Geräte und Chemikalien

Membran (selbsthergestellt), Tischtennisball (halbiert), 7 Reagenzgläser, 2 Bechergläser (100 mL), 3 Bechergläser (50 mL), Kabelbinder, 2 Stative, 2 Muffen, 2 Klemmen, Reagenzglasständer.

Blumenerde, Sand, Speisestärke, Wasser.

Durchführung

1) Im ersten Teil des Versuchs werden die Filtrationsfunktion des halbierten Tischtennisballs mit der selbsthergestellten Membran verglichen. Dazu wird der halbe Tischtennisball im Stativ mit einer Klemme eingespannt. Ein Reagenzglas wird mit 10 mL Wasser gefüllt und die Membran mithilfe eines Kabelbinders über der Öffnung des Reagenzglases befestigt. Dieses wird kopfüber in das Stativ eingespannt und darunter ein Becherglas platziert. Ebenso wird der halbe Tischtennisball mit 10 mL Wasser befüllt und ein Becherglas darunter gestellt. Es wird die Zeit gemessen, bis das Wasser vollständig im Becherglas ist.

2) Für den zweiten Teil werden Blumenerde, Sand und Speisestärke jeweils in einem Becherglas in Wasser suspendiert. Anschließend werden etwa 5 mL der Suspensionen in jeweils ein Reagenzglas gegeben. Eine selbsthergestellte Membran wird in drei Teile geschnitten und über jeweils eine Öffnung der Reagenzgläser befestigt. Die Reagenzgläser werden umgedreht und die Filtrate in Bechergläsern aufgefangen. Das Filtrat wird in ein Reagenzglas gegeben und mit der Ausgangssuspension verglichen.

Beobachtung

1) Auch über 5 Minuten ist kein Durchdringen des Wassers durch die Tischtennisballschicht zu beobachten (siehe Abbildung 32, links). Bei der selbsthergestellten Membran beträgt die Durchlaufzeit von 10 mL Wasser 122 Sekunden.



Abbildung 32 - Versuchsaufbau und Beobachtung: Das Wasser durchdringt die Tischtennisballschicht nicht (links), durch die Membran tropft das Wasser hindurch (rechts).

2) Bei dem Durchlauf der Speisestärke durch die Membran ist zwischen vorher und nachher kein Unterschied zu erkennen. Die Sandsuspension scheint deutlich gereinigt, das Wasser ist hinterher dennoch

trüb. Die bräunliche Suspension mit der Erde ist hinterher farblos, allerdings etwas trüb (Beobachtung siehe Abbildung 33).

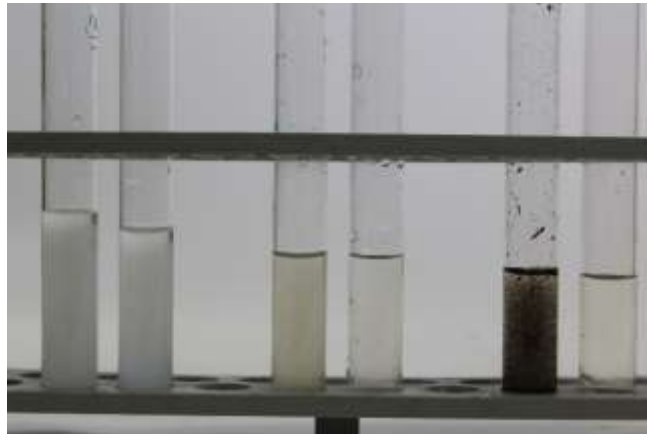


Abbildung 33 - Beobachtung des Filtrationsvermögens, von links: Speisestärke vorher, nachher; Sand vorher, nachher; Erde vorher, nachher.

Deutung

Beim Lösen des Tischtennisballs und Fällen der Membran verändert sich die Struktur der Anordnung der Polymere. Die vorher für Wasser undurchdringbare Zelluloidschicht des Tischtennisballs enthält nach dem Lösen und Fällen, wie oben beschrieben, Poren, durch die das Wasser hindurchdringen kann.

Der zweite Teil des Experimentes zeigt deutlich, dass die Filterfunktion der Membran von der Größe der herauszufilternden Partikeln abhängt. Sand und Erde können die Membran nicht durchdringen, die Stärkemoleküle scheinen feiner zu sein als die Poren der Membran.

5.6.3. Anfälligkeit der Membran gegenüber organischen Lösungsmitteln, pH-Wert und hohen Temperaturen

Geräte und Chemikalien

Membran (selbsthergestellt), 6 Bechergläser (50 mL), 2 Petrischalen, Pinzette, Heizplatte.

Aceton, Ethanol, salzsauer Lösung (1 M), Natronlauge (1 M), destilliertes Wasser.

Durchführung

Die hergestellte Membran wird in acht etwa gleichgroße Teile geschnitten. Sechs davon werden jeweils auf ein Becherglas (1-6) aufgeteilt, die zwei übrigen Stücke werden in jeweils eine Petrischale (7+8) gegeben. In

die Bechergläser wird jeweils so viel Flüssigkeit gegeben, bis die Membran bedeckt ist (ungefähr 10 mL, in alle Bechergläser gleich viel). In zwei Bechergläser (1+2) wird destilliertes Wasser gegeben, in jeweils ein weiteres Aceton (3), Ethanol (4), salzsaure Lösung (5) und Natronlauge (6). Das eine mit Wasser gefüllte Becherglas wird auf eine Heizplatte bei 150°C gestellt und 15 Minuten gekocht. Die Membran in den übrigen Bechergläsern verweilt ebenfalls für 15 Minuten in der jeweiligen Lösung (Aufteilung der Membranstücke siehe Abbildung 34). Die Bechergläser mit salzsaure Lösung und der Natronlauge werden nach 24 und 48 Stunden erneut betrachtet. Die eine Petrischale (8) wird ebenfalls auf die Heizplatte gestellt.

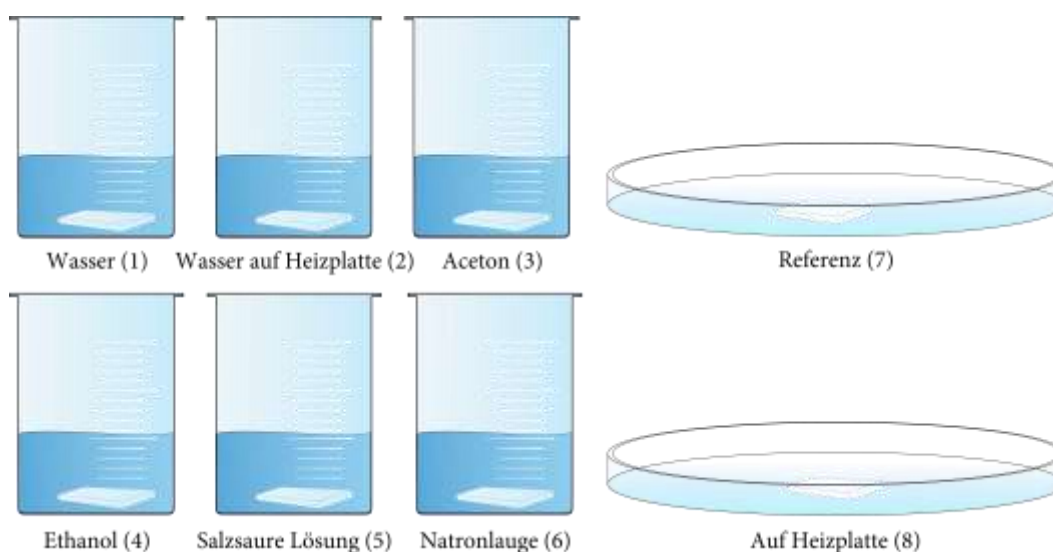


Abbildung 34 - Übersicht der verschiedenen Versuchsansätze.

Die Membranstücke werden anschließend mit einer Pinzette aus den Bechergläsern genommen und mit destilliertem Wasser gründlich abgespült.

Beobachtung

Die Membran in Wasser und die Referenz in der Petrischale lassen keinen Unterschied erkennen. Die Membran in der erhitzten Petrischale wird nach kurzer Zeit schwarz, die Membran im kochenden Wasser wird lediglich etwas fester. In Ethanol löst sich die Membran vollständig innerhalb von 15 Minuten, in Aceton löst sich die Membran innerhalb weniger Minuten. In salzsaure Lösung lassen sich nach 15 Minuten und 24 Stunden keine Unterschiede erkennen, nach 48 Stunden ist die Membran weniger flexibel und reißfest. In Natronlauge lassen sich nach 15 Minuten keine Veränderungen erkennen, nach 24 Stunden hat sich die Membran vollständig gelöst.

Deutung

Aus der Untersuchung der Beständigkeit der hergestellten Membrane gegenüber unterschiedlichen Einflussfaktoren kann auf deren Anwendungsbereiche geschlossen werden. So können Lösungsmittel, der pH-Wert sowie hohe Temperaturen die Einsatzmöglichkeiten begrenzen. Bei hohen Temperaturen zersetzt sich die Membran nach kurzer Zeit vollständig. Das kochende Wasser reicht jedoch nicht aus, um die Membran zu schmelzen. Da Wasser nicht über 100°C erhitzt werden kann, wäre die Membran für die Anwendung in bzw. Reinigung von aquatischen Systemen möglich. Dadurch, dass die Membran durch das Lösen des Tischtennisballs in einem organischen Lösungsmittel hergestellt wurde, ist es logisch, dass sich die Membran in organischen Lösungsmitteln löst. Bei einer Anwendung zur Wasserreinigung hätte dies jedoch kaum einen Einfluss, da organische Lösungsmittel im Normalfall nicht in signifikanten Mengen im Abwasser vorhanden sein sollten. Gegenüber sauren und alkalischen Lösungen ist die Membran unterschiedlich stark anfällig, eine optimale Anwendung erfolgt daher im neutralen Bereich.

5.6.4. Didaktischer Kommentar zum Einsatz von Polymermembrane im Chemieunterricht

Anhand der Versuche kann gezeigt werden, dass aus Alltagsprodukten wie (kaputten) Tischtennisbällen durch „Einschmelzen“ und erneutes Gießen neue Materialien hergestellt werden können. In einer Zeit, in der vermehrt (Plastik-)müll produziert wird, ist es unumgänglich, Recycling-Methoden zu entwickeln, um den „Abfall“ neu zugänglich zu machen. Optimalerweise sollten die Kosten und der Aufwand für solche Methoden möglichst geringgehalten und dabei gleichzeitig ein nutzvoller Output erlangt werden. Damit können diese Experimente im Sinne der Nachhaltigkeit zu einem werteorientierten Chemieunterricht beitragen.

Nicht nur die Thematik der Müllreduktion sowie -verwertung wird die kommenden Generationen vor vielseitige Herausforderungen stellen. Auch das Problem der Bereitstellung von Trinkwasser und die Verunreinigung des Trinkwassers bspw. durch Düngemittel oder Hormone verlangen zwingend nach alternativen Handlungsmöglichkeiten. Hierzu können innovative Filterverfahren eine Lösung sein. Neben der reinen mechanischen Filterfunktion, können Membranen mit Nanopartikeln funktionalisiert werden, die photokatalytisch aktiv sind. Hierzu könnte bspw. Titandioxid verwendet werden, welches photokatalytisch organische Moleküle zersetzen kann [207] und damit beim Einsatz zur Trinkwasseraufbereitung die hormonelle Belastung des Wassers verringern könnte. Die Herstellung von

Membranen über Recyclingprozesse und die Verknüpfung mit Umweltproblemen kann demnach das kritische Denken sowie die Problemlösefähigkeit von Schülern fördern. Gerade durch die Aktualität bspw. der steigenden Glyphosatbelastung im Grundwasser in Deutschland, ist für die Schüler darüber hinaus eine lokale Bedeutung der Thematik zu erkennen und kann bspw. über den Klimawandel und die damit verbundenen Dürreperioden auf globaler Ebene betrachtet werden. Eine mögliche Bekämpfung von Wasserknappheit in Dürrephasen kann z. B. die Entwicklung von effizienten Meerwasserentsalzungsanlagen sein. Die Überlegungen, wie solche Probleme gemeinschaftlich behoben werden können und welche Entscheidungen für eine nachhaltige Entwicklung getroffen werden müssten, fördern die Bewertungskompetenzen der Schüler. Hierzu geführte Debatten, Planspiele oder Zukunftskonferenzen können zu einer Methodenvielfalt beitragen.

Das Recyceln von Gegenständen aus dem alltäglichen Leben von Schülern und die Nützlichkeit der Anfertigung von Membranen als Filtersysteme fokussiert die unmittelbare Anwendbarkeit der Versuche. Mit acetonhaltigem Nagellack ist der Versuch darüber hinaus Zuhause für die Schüler durchführbar.

Das Thema Polymermembran kann alleine über den Umwelt- und Recyclingproblematik interdisziplinär und holistisch im Chemiecurriculum implementiert werden. Darüber hinaus lernen die Schüler bereits in der Sekundarstufe 1 die Filtration als ein einfaches Verfahren zur Stofftrennung kennen, welches Teil des Stoff-Teilchen-Basiskonzeptes ist. [131] Im Basiskonzept Struktur-Eigenschaft wird in der Sekundarstufe 2 darüber hinaus die Polymerchemie mit der Polymerisation und Polykondensation thematisiert. [132] In diesem Kontext lässt sich das Phaseninversionsverfahren als eine weitere Polymerreaktion erörtern.

Die dargestellten Ausführungen zeigen, dass das Thema Polymermembrane geeignet ist, um im Kontext einer BNE im Chemieunterricht behandelt zu werden.

6. Das Projekt „NanoBiNE“

Wie unter Kapitel 4 dargestellt, hat die Nanotechnologie für heutige und kommende Generationen eine besondere Bedeutung und ist darüber hinaus äußerst geeignet, um mit dem Bildungskonzept BNE verknüpft zu werden. Im vorherigen Kapitel wurde daher auszugsweise erarbeitet, wie diese beiden Themenkomplexe im Experimentalunterricht miteinander verknüpft werden können. Die Integration einiger dieser Experimente in den Schulunterricht wäre bereits ein geeigneter erster Schritt, um Teile der Nanotechnologie im schulischen Kontext zu behandeln. Durch die Bindung an ein bestimmtes Schulfach besteht allerdings die Gefahr, dass einige Aspekte durch zeitliche oder fachliche Hürden ausgeklammert werden könnten, sodass eine Thematisierung im Rahmen von (fächerübergreifenden) Projektarbeiten sinnvoll erscheint. [208] Diesem Ansatz folgend entstand Juni 2016 das Projekt „NanoBiNE – Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung“, ein überregionales Kooperationsprojekt der Fachdidaktik Chemie der Georg-August-Universität Göttingen, der Universität Hildesheim, der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg sowie des Leibniz-Instituts für Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik an der Universität Kiel. Dieses wurde von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) im Zeitraum von Juni 2016 bis Mai 2018 gefördert und hatte vorrangig das Ziel, die Bewertungskompetenz sowie das benötigte Fachwissen hinsichtlich einer Technikfolgenabschätzung am Beispiel des Einsatzes von Nanomaterialien zu fördern. Das ist vor allem in dieser Zeit notwendig, in dem sich der technologische und wissenschaftliche Fortschritt rasant fortbewegt und es immer bedeutender wird, dass jeder einzelne an einem gesellschaftlichen Diskurs teilnehmen kann. [209]

Das Projekt hatte folgende übergeordnete Ziele:

- „Verknüpfen von Fachwissen und Aspekten einer Bildung für nachhaltige Entwicklung im Kontext Nanowissenschaften und Nanotechnologie
- Größere Sichtbarkeit umweltrelevanter nanowissenschaftlicher Themen
- Schaffung eines Netzwerks von Schülerlaboren, die Nanowissenschaft mit Bildung für nachhaltige Entwicklung verbinden
- Beiträge zur fachdidaktischen Forschung“ [209]

Diese Ziele sollen mithilfe von vier Bildungsbausteinen (siehe Abbildung 35) erreicht werden.

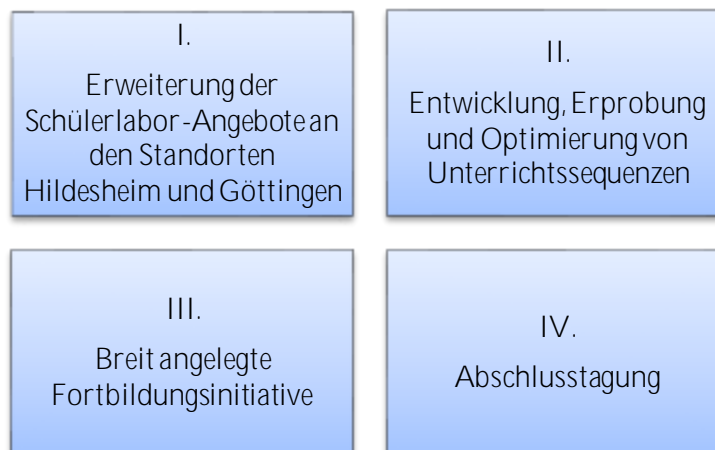


Abbildung 35 - Bildungsbausteine des Projekts NanoBiNE.

Dem Punkt I. entsprechend, lag der Schwerpunkt an der Universität Göttingen auf der Entwicklung bzw. Erweiterung, Durchführung und Evaluierung eines Schülerlabors. An dieser Stelle bot es sich an, die im Rahmen dieser Dissertation entstandenen Experimente sowie Konzepte in den Ablauf des Kurses an der Universität Göttingen einfließen zu lassen. Im Folgenden werden daher die Themenwahl, die Lernziele des Kurses, der Kursablauf sowie die einzelnen Kurselemente vorgestellt.

6.1. Themenwahl für den Schülerlaborkurs

Um sowohl fachliche als auch prozessbezogene Kompetenzen zu fördern, ist es unabdingbar, dass während des Besuches des Schülerlabors ein konkreter Sachverhalt erarbeitet wird. Idealerweise bieten sich hierfür Themen an, die die in Kapitel 3.4.1 angeführten Kriterien für die Auswahl von Themen im Kontext einer BNE erfüllen.⁴⁵ Dass das Thema Nanotechnologie an sich diesen Anforderungen entspricht, wurde bereits diskutiert (vgl. Kapitel 5.1). Um den Schülern den Zugang zur Nanotechnologie und zur BNE zu erleichtern und generell die Naturwissenschaften relevanter und bedeutsamer erscheinen zu lassen, wurde ein Rahmenthema mit einem hohen Alltagsbezug gewählt, welches von Authentizität, Relevanz, einer offenen

⁴⁵ Zur Erinnerung: Diese Auswahl von Themen erfolgt danach, ob es sich 1. um ein „Zentrales lokales und/oder globales Thema für nachhaltige Entwicklungsprozesse“ handelt und es 2. eine „Längerfristige Bedeutung“, 3. „Differenziertheit des Wissens“ sowie 4. „Handlungspotential“ aufweist. Darüber hinaus sollte das Thema mit den im „[...] Unterricht zu erwerbenden Fachkompetenzen verbunden werden können“ sowie „eine Relevanz für die Bildungsziele der Lernenden aufweisen.“ (vgl. Kapitel 3.4.1)

Bewertungslage in Bezug auf gesellschaftlich relevante Fragen sowie einer offenen Diskutierbarkeit geprägt ist. [210–212] Dieses lautet:

„Sollen Zinkoxid- sowie Titandioxidnanopartikel weiterhin in Sonnencreme verwendet werden?“

Gerade in Anbetracht erheblicher Klimaveränderungen, die zu bspw. längeren Hitzeperioden, wie zuletzt im Sommer 2018 in Deutschland, führen können, nimmt der Sonnenschutz für den Menschen an Bedeutung zu (- erfüllt damit das 2. Kriterium der „längerfristigen Bedeutung“). Dieser Sonnenschutz dient als unabdingbares Mittel zur Verhinderung von Verbrennungen oder anderen Krankheiten. Unter anderem durch den Aspekt der Krankheitsprävention stellt das Thema ein „zentrales lokales und/oder globales Thema für nachhaltige Entwicklungsprozesse“ (1. Kriterium) dar.

Auch wenn den Schülern zu Beginn des Kurses nicht bekannt ist, dass Titandioxid- und Zinkoxidnanopartikel in Sonnencreme verwendet werden, so kann dies durch einen Blick auf die Liste der Inhaltsstoffe vieler Sonnencremes mit mineralischen Filtern leicht nachgeholt werden. Durch die Kennzeichnungspflicht von Nanomaterialien in Kosmetika (siehe Kapitel 4.2.3 „Rechtliche Rahmenbedingungen“) wird offensichtlich, dass der Kontakt mit diesen (durch Verwendung von Sonnencreme) kaum vermieden werden kann. Dies führte in den letzten Jahren in den Medien auch zu kritischen Anmerkungen. Werden die Schlagworte „Sonnencreme“ und „Nano“ zusammen in diverse Internetsuchmaschinen eingegeben, so lauten die ersten Überschriften bspw. „Nanopartikel in der Sonnencreme – sind sie gefährlich?“, „Gefährliche Sonnencreme mit Nanoteilchen“, „Umstrittene Nanopartikel in Sonnencremes“ oder „Bestandteil von Sonnencreme – Nanopartikel verändern Hirnentwicklung“.⁴⁶ Zusätzlich beziehen vom „Verband der Chemischen Industrie (VCI)“ über dem „Berufsverband der Deutschen Dermatologen e.V. (BVDD)“ bis hin zum „Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR)“ Stellung zu diesem Thema. Diese Multiperspektivität trägt zu einer „Differenziertheit des Wissens“ (3. Kriterium) bei.

Die Diskussion über Nanopartikel in Sonnencreme kann den Schülern darüber hinaus vor Augen führen, inwieweit die Chemie zu ihrem alltäglichen Leben beiträgt und welchen Einfluss sie auf den Menschen und

⁴⁶ Vier der ersten zehn Treffer der Internetsuche via Google unter den Suchbegriff „sonnencreme nano“ vom 13.08.2018. Ähnliche Ergebnisse sind ebenfalls unter den ersten zehn Treffern der Suchmaschinen Bing oder Yahoo zu finden (zuletzt geprüft am 13.08.2018).

die Umwelt ausübt. Dies ist ein essentieller Bestandteil für die Wahl von geeigneten Kontexten für den Chemieunterricht [213] und eröffnet die Möglichkeit zum Erarbeiten von **eigenem „Handlungspotential“** (4. Kriterium).

6.2. Lernziele des Schülerlabors NanoBiNE am Standort Göttingen

Der Schülerlaborkurs NanoBiNE verfolgt sowohl fachliche Lernziele als auch Lernziele, die im Speziellen mit einer BNE verbunden sind. Dabei dient der Erwerb von Fachinhalten dazu, dass auf deren Grundlage Bewertungskompetenzen gefördert werden können.

Konkret sollen die Schüler im fachlichen Bereich...

- die Größenordnung „Nano“ anhand geeigneter Vergleiche beschreiben
- die besonderen Eigenschaften von Nanomaterialien wie den Lotos-Effekt und Supermagnetismus beschreiben
- die Eigenschaften von Nanomaterialien auf ihr Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis zurückführen
- Quellen natürlicher und künstlicher Nanopartikel nennen
- das Top-Down- sowie Bottom-Up-Verfahren zur Herstellung von Nanopartikeln kennen
- den Einsatz von Titandioxid- und Zinkoxidnanopartikeln in Sonnencreme begründen
- die Funktionsweise von organischen und mineralischen UV-Filtern erklären und vergleichen
- den Einfluss von Nanomaterialien auf Mikroorganismen und Zwiebelzellen deuten.

Neben diesen – vor allem auf den Erwerb von Fachwissen abzielenden Lernzielen – werden mit dem Kurs „BNE-Ziele“ verfolgt, die zu einer Förderung von Bewertungskompetenzen beitragen sollen. In Anlehnung an einzelne Teilkompetenzen nach DE HAAN [38, S. 236f] lauten die BNE-Ziele des entwickelten Kurses wie folgt.

Die Schüler...

Kompetenz zur Perspektivübernahme (T1)

...benennen die Ansätze und Konzepte einer nachhaltigen und gerechten Entwicklung (T.1.1).

...bewerten auf Basis der Informationen aus Perspektivübernahmen differente Gestaltungsnotwendigkeiten sowie Handlungsmuster in Bezug auf den Umgang von Nanopartikeln in Sonnencreme (T.1.3).

Kompetenz zur disziplinübergreifenden Erkenntnisgewinnung (T3)

...**analysieren und beurteilen Interdependenzen** ökologischer, ökonomischer und sozialer Entwicklungen in Bezug auf Nanotechnologie (T.3.10).

Kompetenz zum Umgang mit unvollständigen und überkomplexen Informationen (T4)

...können Risiken und Gefahren nicht nachhaltigen Handelns in Bezug auf den Einsatz von Nanopartikeln in Kosmetika analysieren und beurteilen (T.4.3).

Kompetenz zur Kooperation (G1)

...**benennen und analysieren in Gruppen** **differente Standpunkte zur Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit** auf ihre Hintergründe hin und können in diesem Zusammenhang Kontroversen diskursiv austragen (G.1.1).

Kompetenz zur Bewältigung individueller Entscheidungsdilemmata (G2)

...**beschreiben Lösungsmöglichkeiten für multikriterielle Entscheidungsprobleme, bei denen** **differente** Problemdefinitionen vorliegen und/ oder Ziele der nachhaltigen Entwicklung zueinander in Konkurrenz stehen (G.2.3).

Kompetenz zur Partizipation (G.3.)

...**ermitteln und demonstrieren Verfahren der Verständigung** über Ziele und Prozesse nachhaltiger und gerechter Entwicklung bei normativen und politischen Differenzen (G.3.3).

...können Meinungsverschiedenheiten und Konflikte in Bezug auf Fragen des (nicht) nachhaltigen Einsatzes von Nanopartikeln in Kosmetik konstruktiv bewältigen (G.3.4).

Kompetenz zur Motivation (G4)

... **können ihren persönlichen wie gemeinsamen Umgang mit Dilemmata, Ungewissheiten und Ambivalenzen** in Bezug auf die Verwendung von Nanopartikeln in Sonnencreme erörtern und bewerten (G.4.2).

Kompetenz zur Reflexion auf Leitbilder (E1)

...**beschreiben Lebensweisen, welche** einen nachhaltigen Konsum, eine umwelt- und sozial verträgliche Mobilität und Freizeitgestaltung sowie die Gesundheit sichern und befördern (E.1.1).

Letztendlich soll der Kurs dazu dienen, zu einer Kompetenzerweiterung in Bezug auf eine Technikfolgenabschätzung beizutragen. Dies umfasst sowohl das Wissen über das Potenzial als auch die Risiken von Innovationen aus diesem Bereich, um daraus Konsequenzen für die Anwendung im eigenen Leben ziehen zu können.

6.3. Methodenwahl und Ablauf des Schülerlaborkurses

Der Fokus in der Gestaltung des Schülerlabors lag darauf, ein Szenario bzw. einen Ablauf zu schaffen, welcher die Schüler dazu ermutigt und befähigt, sich mit neuen Sachverhalten kritisch auseinander zu setzen und Entscheidungen zu treffen. In diesem Kontext bietet sich das von MARKS und EILKS entwickelte Konzept für einen gesellschaftskritisch-problemorientierten Chemieunterricht einen geeigneten Rahmen [214], um **„Bewerten Lernen als Kern allgemeiner Bildung und essentielle Voraussetzung für gesellschaftliche Teilhabe“** [215, S. 1] in den Chemieunterricht zu integrieren. Die Umsetzung dieses Konzepts unterstützt dabei durch die Betrachtung verschiedener, überfachlicher Dimensionen, Sichtweisen und Interessen die Förderung von Kompetenzen zur Bewertung und zum Treffen von Entscheidung im Kontext einer nachhaltigen Entwicklung. [151, 214] Hierzu sollen folgende fünf Stufen durchlaufen werden:

1. **„Zugang und Analyse der Kontroverse**
2. Fachliche Klärung unter Einbezug experimenteller Arbeit
3. Wiederaufgreifen der kontroversen Problemlage
4. Erarbeitung und Diskussion verschiedener Perspektiven
5. Metareflexion⁴⁷ [214] (Übersetzung nach FEIERABEND et al. [215, S. 4])

In dem Schülerlabor NanoBiNE handelt es sich dabei – wie oben beschrieben - um die Kontroverse, ob Titandioxid- und Zinkoxidnanopartikel weiterhin in Sonnencreme verwendet werden sollen. Der folgende Aufbau des Kurses dient daher dazu, die Stufen des gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterrichts umzusetzen:

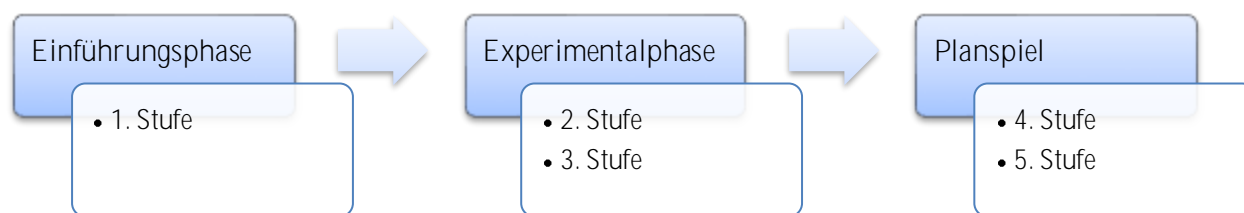


Abbildung 36 - Kursablauf der NanoBiNE.

⁴⁷ Die Metareflexion dient dazu, zu reflektieren, „[...] welche Rolle die Chemie und das Wissen über Chemie in einer solchen Diskussion spielen, wer entsprechende Informationen wie und mit welchen Interessen benutzt.“ [216] S. 35

Im Folgenden werden die einzelnen drei Phasen, welche die fünf Schritte eines gesellschaftskritischen-problemorientierten Unterrichts umfassen, detaillierter betrachtet.

6.3.1. Einführungsphase

Nach MARKS und EILKS erfolgt über den Einstieg der Zugang und die Analyse der Kontroverse. Ziel ist dabei, dass durch den Einstieg das Interesse für den Kurs geweckt werden soll und die Schüler zur aktiven Partizipation motiviert werden. Da das Thema Nanotechnologie kaum in einem Curriculum oder Bildungsplan verankert ist, werden die Schüler aller Voraussicht nach kein bzw. ein geringes Vorwissen in diesem Bereich vorweisen. Daher ist es unabdingbar, dass durch die Einführung eine einheitliche Wissensbasis für alle Schüler geschaffen wird und die unter Kapitel 6.2 angeführten fachlichen Lernziele erarbeitet werden. Um eine Aussage bezüglich der Leitfrage des Kurses treffen zu können, benötigen die Schüler darüber hinaus Metawissen über Bewertungsprozesse, dessen Erlangen ebenfalls in den Einstieg einfließen wird.

Nach einer Begrüßung werden die Schüler direkt mit der Leitfrage konfrontiert, ob Zinkoxid- und Titandioxidnanopartikel weiterhin in Sonnencreme verwendet werden sollen. Erwartungsgemäß werden die Schüler im hohen Maße mit der Frage überfordert sein, da diese im Normalfall ihren Wissenstand übersteigt. Dadurch, dass die Lehrkraft nachdrücklich nach einer Antwort verlangt, werden sich einige Schüler mit Meinungen beteiligen. Im Unterrichtsgespräch werden sich allerdings unmittelbar folgende Fragen direkt oder in einer gemeinsamen Erarbeitung ergeben:

- Was sind Nanopartikel?
- Was sind Titandioxid- und Zinkoxid(nanopartikel)?
- Warum werden diese Substanzen in Sonnencreme verwendet?
- Und warum sollten sie nicht mehr in Sonnencreme eingesetzt werden?

Diese Generierung von Fragen soll einerseits die Aufmerksamkeit der Schüler auf das Thema fokussieren und andererseits zur Förderung des Verstehens beitragen. [217] Gemeinsam mit den Schülern wird im Anschluss erarbeitet, welche Komponenten benötigt werden, um diese Frage zu beantworten und eine „gute“ Entscheidung treffen zu können. Auch wird darauf eingegangen, welchen Einflüssen eine solche Entscheidung unterliegt. Zur Beurteilung von Sachlagen sind demnach folgende Bausteine notwendig:



Abbildung 37 - Vier Bausteine zum Fällen von Entscheidungen.

Eine der wichtigsten Grundlagen für die Bewertung ist das (Experten-)Wissen (1.), das heißt, dass die fachlichen Hintergründe eines Problems bekannt sein müssen. Die Vermittlung dieses Wissens erfolgt im Schülerlaborkurs aufgrund des engen zeitlichen Rahmens anhand eines Lehrervortrags. Im (natur-)wissenschaftlichen Kontext wird dieses Wissen meist (zusätzlich) über das Durchführen und Auswerten von Experimenten erlangt (2.). **Experimente dienen im Chemieunterricht daher auch dazu, „das Wesen der Naturwissenschaft Chemie [...] zu vermitteln.“** [218, S. 292] Das experimentelle Arbeiten wird daher auch in diesem Kurs eine Rolle einnehmen. Soll nun ein Sachverhalt bewertet werden, ist es sinnvoll, sich verschiedene Meinungen bzw. Perspektiven (3.) zu einem Thema einzuholen. Wird bspw. die Anschaffung eines neuen Laptops notwendig, werden vermutlich Erfahrungen und Bewertung von Freunden, Familie oder Fachpersonal eingeholt. Im Kurs erfolgt dies anhand der Durchführung eines Planspiels. Um bei dem Beispiel des Laptops zu bleiben, werden neben diesen Empfehlungen bzw. Perspektiven eigene Kriterien (4.) angelegt, die der neue Laptop erfüllen muss. Bei einer primären Benutzung des Computers für Spiele wird die Graphikkarte einem entscheidenden Faktor darstellen. Wird der Laptop viel mit auf Reisen genommen, spielt ein geringeres Gewicht eine große Rolle. **Als Kriterien für eine „gute“ Entscheidung in Bezug auf die Kursfrage dienen die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit.** Die Argumente der jeweiligen Position sollen demnach kritisch in Bezug zu der ökonomischen, ökologischen und sozialen Komponente beleuchtet werden. Eine detailliertere Beschreibung der Dimensionen der Nachhaltigkeit findet in diesem Moment nicht statt, sondern ist Teil des sich anschließenden Einführungsvortrags.

Die gemeinsam erarbeiteten vier Bausteine werden an der Tafel festgehalten und den Schülern anhand dieser der nun folgende Kursablauf vorgestellt (Kursablauf siehe Abbildung 36). Durch den problemorientierten Einstieg und diese Übersicht soll es den Schülern erleichtert werden, den nun folgenden Vortrag mit dem eben erarbeiteten Bausteinen zu verknüpfen. [219] Darüber hinaus werden die Schüler anschließend in Gruppen eingeteilt und erhalten die Rollenbeschreibung ihrer Position des Planspiels (der genaue Ablauf des Planspiels wird weiter unten beschrieben). Dies dient dazu, dass sowohl der folgende Vortrag als auch die Experimentierphase bereits aus dem eignen Rollenverständnis heraus

betrachtet und reflektiert werden kann. Die Schüler bekommen damit die Möglichkeit, bereits über den Verlauf des Kurses Argumente für ihre Position zu sammeln.

Die inhaltlichen Aspekte des Lehrervortrages dienen der Thematisierung der oben erarbeiteten Fragen bzw. der Erarbeitung der fachlichen Lernziele (siehe Kapitel 6.2). Die Nanodimension wird dabei mit dem Verhältnis von der Größe einer Haselnuss zur Größe der Erde verglichen (entsprechende Vortragsfolie siehe Abbildung 38) sowie über den Vergleich mit dem Durchmesser eines Haares beschrieben.



Abbildung 38 - Darstellung der Nanodimension über verschiedene Vergleiche im Rahmen des Einführungsvortrags.

Nach der Beschreibung der Größendimension wird der Frage nachgegangen, wo Nanopartikel überhaupt vorkommen. Dabei wird in zwei Kategorien unterschieden: natürlich kommende und künstlich hergestellte Nanopartikel. Rußpartikel im nanopartikularen Bereich entstehen z. B. durch die Verbrennung von Holz, Silica im nanopartikularen Bereich durch den Ausbruch von Vulkanen. Beide tragen zum Vorkommen natürlicher Nanopartikel in der Atmosphäre bei. [220] Künstlich hergestellte Nanopartikel wie Silbernanopartikel werden, wie in Kapitel 4.2 beschrieben, unter anderem in medizinischen Instrumenten aufgrund ihrer antibakteriellen Wirkung verwendet. [221] Ferromagnetische Nanopartikel bieten ein hohes Potenzial für die Biotechnologie und Biomedizin. [222] Zur Erläuterung der Herstellung künstlicher Nanopartikel werden die zwei grundsätzlichen Verfahrensprinzipien vorgestellt, das Bottom-Up- und Top-Down-Verfahren. [223]

Um die besonderen Eigenschaften von Materialien mit Nanostrukturen zu verdeutlichen, werden den Schülern Videosequenzen präsentiert, in denen die Superhydrophobie⁴⁸ sowie Supermagnetismus vorgestellt werden. Je nach Klassenstufe bzw. Vorkenntnissen im Bereich der Nanodimension werden diese Eigenschaften lediglich als Materialeigenschaften präsentiert oder weiterführend auf das besondere Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis zurückgeführt (siehe Abbildung 39) Dadurch, dass in Nanomaterialien nahezu alle Atome Oberflächenatome sind, ergibt sich eine hohe Reaktivität und sie damit bspw. für den Einsatz als Katalysatoren äußerst geeignet sind.



Abbildung 39 - Darstellung des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses im Rahmen des Einführungsvortrags.

Zur Überleitung zur Kursfrage wird nun thematisiert, in welchen Alltagsprodukten Nanomaterialien verwendet werden. Neben Wandfarbe, Sportequipment und Deodorant wird Sonnencreme angeführt. Im letzteren dienen Nanopartikel dazu, dass sowohl UVA- als auch UVB-Strahlen physikalisch effektiv filtert werden, dabei kaum Hautirritationen verursachen und – aus ästhetischer Sicht - beim Auftragen keine weiße Schicht auf der Haut hinterlassen. [224] Der Vergleich von physikalischen und chemischen UV-Filtern zeigt darüber hinaus, dass die physikalischen UV-Filter wie Titandioxid oder Zinkoxid einen

⁴⁸ Ausschnitte aus dem Video "The SECOND Official Ultra-Ever Dry Video – Superhydrophobic coating – Repels almost any liquid!" online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=BvTkefJHfC0>

Großteil der UV-Strahlung reflektieren und streuen, wohingegen die chemischen UV-Filter wie Benzophenon die UV-Strahlung in Wärmeenergie umwandeln (siehe Abbildung 40). [225]

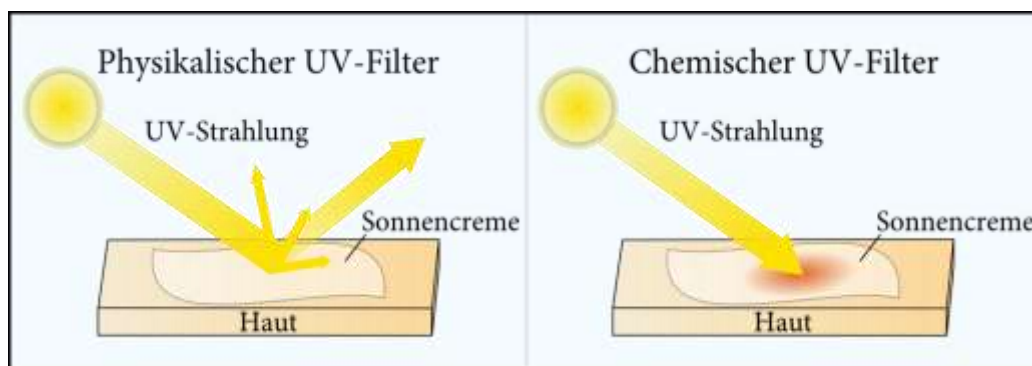


Abbildung 40 - Schematische Darstellung der Funktionsweise physikalischer und chemischer UV-Filter. Der physikalische Filter der Sonnencreme reflektiert und streut die UV-Strahlen (links), die chemischen wandeln die UV-Strahlung in Wärme um (rechts).

Nach dem Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS) werden die physikalischen UV-Filter Titandioxid- und Zinknanopartikel in Sonnencreme bis zu einer Konzentration von 25 % auf intakter Haut als sicher angesehen. [226, 227] Es wird allerdings kritisch angemerkt, dass mit derzeitigen Messmethoden der Nachweis in tieferen Hautschichten oder im Blutkreislauf kaum möglich ist. [226] Damit kann bereits eine kontroverse Debatte über die Verwendung von Nanopartikeln in Sonnencreme eröffnet werden. Um eine Verknüpfung zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit herzustellen, wird der Weg beschrieben, den verwendete Nanopartikel gehen können. Durch bspw. das Auftragen auf die Haut stehen sie im unmittelbaren Kontakt mit dem menschlichen Körper, durch Duschen oder Baden im Meer können diese in die Umwelt gelangen und sich dort anreichern. Darüber hinaus werden Studien präsentiert, die einen möglichen negativen Einfluss von Nanopartikeln auf die Umwelt sowie verschiedener Versuchstiere belegen.⁴⁹ Das letzte fachliche Lernziel, die Deutung des Einfluss von Nanomaterialien auf Mikroorganismen und Zwiebelzellen, wird in die Auswertung der experimentellen Phase erarbeitet.

Zum Abschluss der Präsentation wird eine kurze Zusammenfassung der vorgetragenen Inhalte vorgetragen und das Ziel präsentiert, das für jede neu entwickelte sowie etablierte Technologie - in diesem Fall der

⁴⁹ Einige dieser Studien sind in dieser Arbeit in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 unter „Ressourcenschonung versus mögliche negative Einflüsse auf die Umwelt“ bzw. „Gesundheitliche Aspekte für den Menschen“ zu finden.

Nanotechnologie - gilt: Ein nachhaltiger Umgang mit Nanomaterialien. Dem Vortrag schließt sich die experimentelle Phase an.

6.3.2. Experimentierphase

Da es sich bei der NanoBiNE um ein Schülerlabor aus dem Bereich der Naturwissenschaften handelt, ist ein experimentelles Arbeiten in diesem Kontext essentiell.⁵⁰ Schülerlabore bieten dabei die Möglichkeit, Experimente durchzuführen, die im schulischen Rahmen auf materiellen, finanziellen sowie zeitlichen Gründen nicht möglich sind. In dem Fall der NanoBiNE werden das experimentelle Arbeiten und die daraus gewonnenen Erkenntnisse dafür genutzt, die fachliche Vorbereitung der Diskussion des Planspiels zu unterstützen. Neben der fachlichen Komponente sollten darüber hinaus nach BADER und SCHMIDKUNZ die Faktoren zur Auswahl von Experimenten für den Chemieunterricht (und damit auch für das Schülerlabor) berücksichtigt werden. [218]

Werden die im Kapitel 5 beschriebenen Experimente betrachtet, wird ersichtlich, dass das Experiment zur Überprüfung von Nanomaterialien auf Mikroorganismen (vgl. Kapitel 5.5.4) in diesem Kontext thematisch besonders gut geeignet ist und darüber hinaus die angeführten Kriterien erfüllt. Die alkoholische Gärung ist der Altersstufe der Schüler angemessen⁵¹, ungefährlich für Schüler und knüpft an deren Vorwissen an. Das Experiment ist fehlertolerant, ist mit der vorhandenen Ausstattung durchzuführen und passt vor allem in den zeitlichen Rahmen des Schülerlabors. Die Verwendung des für Schüler relativ komplexen Versuchsaufbaus mit dem Kolbenprober lässt sich durch die Eindeutigkeit der Ergebnisse rechtfertigen.

Die Herstellung von Aerogelen wäre im Rahmen des Kurses zeitlich zu umfangreich, das Erarbeiten der Eigenschaften⁵² ist im Kontext des Kursthemas nicht geeignet. Die photokatalytische Wasserstoffbildung übersteigt ebenfalls den zeitlichen Rahmen des Kurses und ist bezüglich der apparativen Ausstattung⁵³ für einen Klassensatz zu umfangreich. Auch wenn sich passend zur Thematik die Testung des Einflusses der

⁵⁰ Gründe für den Einsatz von Experimenten im naturwissenschaftlichen Unterricht sind sehr vielfältig. Zum einen bilden sie eine charakterisierende Arbeitsweise der Chemie, zum anderen können neben fachlichen Inhalten viele andere Kompetenzen gefördert werden. Begründungen für den Einsatz von Schülerexperimenten sind unter anderem bei HOFSTEIN und LUNETT [228], BADER und SCHMIDKUNZ [218] sowie DI FUCCIA [229] zu finden.

⁵¹ Die alkoholische Gärung ist Teil des Kerncurriculums der Chemie in Niedersachsen. [132]

⁵² Experimente des Kapitels 5.3.

⁵³ Experimente des Kapitels 5.4.

Nanopartikel auf Zellen und Algenkulturen anbietet, ist der in den Kapiteln 5.5.2 und 5.5.3 beschriebene zeitliche Aufwand zu hoch. Beide Versuche zeigen keinen unmittelbaren Einfluss, der innerhalb weniger Stunden zu beobachten wäre. Aufgrund des geringen apparativen Aufbaus würden sich die Algen-Versuche äußerst gut in einer Projektarbeit über mehrere Wochen umsetzen lassen. Die Herstellung von Membranen könnte durch die Verknüpfung zum Recycling in den Kontext der nachhaltigen Entwicklung integriert werden, allerdings übersteigen die theoretischen Grundlagen – wie das Phaseninversionsverfahren – das Schülerwissen bei weitem und könnten den Zugang zur Thematik erschweren.⁵⁴

Da für die Testung des Einflusses von Nanopartikel auf die alkoholische Gärung eben diese benötigt werden, stellen die Schüler zunächst selbstständig Zinkoxidnanopartikel über die oben angeführte Fällungsreaktion (Kapitel 5.5.1) her. Zum Nachweis der erfolgreichen Synthese der Nanopartikel betrachten die Schüler ihre Produkte unter einer UV-Lampe. Die eindrückliche bläuliche bis gelbliche Fluoreszenz weist die erfolgreiche Herstellung nach. Im Anschluss wird nach der Versuchsdurchführung in Kapitel 5.5.4 sowohl der Einfluss der selbstsynthetisierten Zinkoxidnanopartikel als auch bereitgestellter Silbernanopartikel⁵⁵ auf die alkoholische Gärung getestet.

Um einen noch stärkeren Bezug zur menschlichen Haut, auf die die Sonnencreme im Normalfall aufgetragen wird, herzustellen, wird nach WILKE et al. der Einfluss der Zinkoxidnanopartikel auf pflanzliche Zellen untersucht. [181] Hierzu werden kleine Zwiebelstücke in die hergestellte Zinkoxidnanopartikel-Suspension sowie in Ethanol (als Referenz) für einige Minuten eingelegt, was das Auftragen von Sonnencreme auf die Haut darstellen soll. Anschließend werden die Stücke unter dem Wasserhahn gründlich abgespült, um das Abwaschen der Sonnencreme unter der Dusche bzw. im Meer zu simulieren. Abschließend werden die Stücke unter einer UV-Lampe betrachtet. Dabei ist bei den Zwiebelstücken, die in der Zinkoxidnanopartikel-Suspension eingelegt waren, eine gelbliche Fluoreszenz zu beobachten. Dies lässt darauf hindeuten, dass die Zinkoxidnanopartikel nicht gänzlich durch Abwaschen zu entfernen sind, sondern in/an den Zwiebelstücken verbleiben. Parallel wird das Experiment in identischer Versuchsdurchführung mit der Haut von Schweinefüßen durchgeführt, da Schweinehaut unter anderem nach einer Studie von SCHMOOK et al. besondere Ähnlichkeiten zur menschlichen Haut aufweist. [230]

⁵⁴ Experimente des Kapitels 5.6.

⁵⁵ Aus zeitlichen Gründen werden die Silbernanopartikel von der Kursleitung bereits vor Kursbeginn hergestellt.

Es werden zusammenfassend folgende drei Experimentiereinheiten durchgeführt:

Versuch 1 - Herstellung von Zinkoxidnanopartikeln über eine Fällungsreaktion
Versuch 2 - Untersuchung des Einflusses von Zinkoxid- sowie Silbernanopartikeln auf Backhefe
Versuch 3 - Untersuchung des Einflusses von Zinkoxidnanopartikel auf Zwiebel- sowie Schweinehäute

Der Versuch 2 bietet sich dazu an, gruppenteilig zu arbeiten, sodass eine Gruppe einen Referenzversuch (lediglich Hefe und Zucker) durchführen und jeweils eine weitere Gruppe den Einfluss von Zinkoxidnanopartikeln bzw. Silbernanopartikeln auf die alkoholische Gärung untersuchen. In Kapitel 5.5.4 wird der beschriebene Versuch über 60 Minuten durchgeführt. Der Abbildung 22 ist allerdings zu entnehmen, dass das Experiment bereits nach 20 Minuten aussagekräftige Ergebnisse liefert und dementsprechend verkürzt werden kann.

Im Anschluss an die Durchführung der Experimente findet eine gemeinsame Auswertung statt. Dabei werden die Beobachtungen sowie Deutungen der Versuche besprochen. Mithilfe des ersten Versuchs werden erneut Herstellungsverfahren von Nanomaterialien besprochen, sowie mögliche Nachweisreaktionen von einer erfolgreichen Nanopartikelsynthese. Je nach Klassenstufe und Vorwissen der Schüler wird dabei auf das Phänomen der Fluoreszenz (detailliert) eingegangen. Neben der fachlichen Auswertung der zwei weiteren Versuche kann dabei auf die Grenzen von Modellen eingegangen werden.⁵⁶ Dabei geht es zum einen um die Aussagekraft von Modellexperimenten und zum anderen um die Übertragbarkeit von Experimentergebnissen von einem System auf ein anderes. Für Versuch 2 können bspw. keine eindeutigen Aussagen über folgende Ergebnisse getroffen werden:

- Auch wenn die Silbernanopartikel in dem Versuch einen stärkeren Einfluss auf die alkoholische Gärung zu haben scheinen als die Zinkoxidnanopartikel, kann daraus nicht geschlossen werden, dass diese im Allgemeinen toxischer sind. Dies liegt daran, dass im Rahmen des Kurses keine Charakterisierung der verschiedenen Nanopartikel vorgenommen wird. Weder Größe, Anzahl noch Konzentrationen der Nanopartikel werden in diesem Versuch bestimmt, sodass diese quantitativ nicht vergleichbar sind.

⁵⁶ Modellkompetenzen erwerben ist ein zentraler Aspekt des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Daher ist dies vielfach Teil der jeweiligen Kerncurricula bzw. Bildungspläne der einzelnen Länder, wie bspw. dem Niedersächsischen Kerncurriculum der Naturwissenschaften. [131] Dabei geht es sowohl um das Kennenlernen und Anwenden von Modellen als auch um das Verständnis des Einsatzes sowie deren Grenzen.

- Aus den Versuchen lassen sich keine eindeutigen Aussagen über den Wirkmechanismus der Nanopartikel auf die Hefepilze treffen. Es ist unklar, ob bspw. einige Enzyme gehemmt werden oder die Pilze vollständig oder teilweise absterben.
- Mikroorganismen, Pflanzen, Tiere und der menschliche Körper sind verschiedene Organismen. Aus der Hemmung der Produktion von Kohlenstoffdioxid kann daher nicht automatisch auf eine mögliche negative Wirkung auf andere Systeme geschlossen werden.
- Die Übertragbarkeit der Beobachtungen des Einflusses von Zinkoxid- und Silbernanopartikeln auf die alkoholische Gärung kann anhand des Versuchs in Bezug auf Titandioxidnanopartikel kein Rückschluss gezogen werden, da dieser Einfluss nicht überprüft wurde.

Ähnliche Aussagen können dementsprechend über Versuch 3 gemacht werden:

- Die Fluoreszenz der Schweine- und Zwiebelhäute verdeutlicht, dass sich die Nanopartikel nicht einfach abwaschen lassen. Allerdings ist unklar, welche Wirkmechanismen dies zugrunde liegt.
- Unklar ist auch, welchen Effekt die Zinkoxidnanopartikel an oder in Zellen ausüben. Eine Anhaftung der Partikel muss nicht zwangsläufig mit einer schädlichen Wirkung einhergehen.
- Wie in Versuch 2 ist auch hier keine vollständige Übertragbarkeit der Ergebnisse von der Schweine- und Zwiebelhaut auf die menschliche Haut oder die Umwelt gegeben.

Neben der Förderung fachlicher Kompetenzen können anhand dieser Versuche damit Bewertungs-, Kommunikations- sowie Modellkompetenzen gefördert werden.

6.3.3. Planspielphase

Das sich anschließende Planspiel dient nach dem Konzept des gesellschaftskritischen-problemorientierten **Unterrichts der „Erarbeitung und Diskussion verschiedener Perspektiven“** sowie der **„Metareflexion“**. Den Schülern soll damit die Möglichkeit geboten werden, sich aktiv mit der Frage des Kurses „Sollen Zinkoxid- sowie Titandioxidnanopartikel weiterhin in Sonnencreme verwendet werden?“ auseinanderzusetzen, diese zu reflektieren und partizipativ eine nachhaltige Lösung zu finden. Um beeinflussende Faktoren für die Entscheidung kennenzulernen, erhalten die Schüler ein möglichst breitgefächertes Bild über unterschiedliche Perspektiven zur Anwendung von Zinkoxid- und Titandioxidnanopartikeln in Sonnencreme. Dabei sollen die Schüler so tief in ihre Rollen eintauchen können, dass sie das Szenario des

Planspiels als ein soziales, räumliches und zeitliches Übungsfeld wertschätzen und zu einer aktiven Teilnahme zur Vertretung ihrer Rollenposition befähigt werden. [231]

Der Rahmen des Planspiels wird möglichst authentisch gewählt. Dazu wurde sich für das Szenario des NanoDialogs entschieden. „Der NanoDialog [wurde] im Rahmen des Nano-Aktionsplans der Bundesregierung seit 2006 federführend durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)⁵⁷ durchgeführt“ und deren „Aufgabe war es, den Austausch gesellschaftlicher Interessengruppen zu Chancen und Risiken von Nanotechnologien zu unterstützen und damit einen Beitrag für einen verantwortungsvollen und nachhaltigen Umgang mit Nanomaterialien zu leisten.“ [232] Die Betonung liegt hierbei auf „war“, da dieser im Jahr 2011 von den FachDialogen abgelöst wurde, um ein fachspezifischeres und somit effizienteres Arbeiten zu gewährleisten. Der NanoKommission gehörten von 2009-2011 sechzehn verschiedene Institutionen an. Um beim NanoDialog ökologische, ökonomische und gesellschaftliche Perspektiven zu berücksichtigen, wurden von den real anwesenden Institutionen vier für das fiktive Planspiel übernommen: „Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND)“, die „Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. (VB)“, „der Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI)“ sowie „Evonik Industries“⁵⁸. Hinzukommen drei weitere Rollen: die „Deutsche Dermatologische Gesellschaft (DDG)“, die „Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA)“ sowie das „Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR)“. Eine weitere Rolle wird von Vertretern des „Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)“ eingenommen, welches in dem Szenario, wie beim realen NanoDialog, den Austausch anleitet und am Ende eine Entscheidung bezüglich der Fragestellung des Kurses trifft. Tabelle 15 zeigt eine Übersicht der acht verschiedenen Rollen und gibt stichpunktartig deren Inhalt, Position (bezüglich der Frage neutral, positiv oder negativ eingestellt) sowie die Dimension wieder, die durch die Rolle vorrangig angesprochen wird.

⁵⁷ Vom 17.12.2013-14.03.2018 das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), daher auch im Planspiel als solches bezeichnet.

⁵⁸ Zu dem Zeitpunkt des Beitritts „Evonik Degussa GmbH“.

Tabelle 15 - Rollenübersicht für das Planspiel des NanoDialogs.⁵⁹

Rolle	Inhalt	Position	Vorrangige Dimension
„BMUB“	<ul style="list-style-type: none"> Leitung des NanoDialogs, Anhörung aller Positionen Beachtung aller drei Dimensionen in der Entscheidungsfindung Begründung des Ergebnisses 	neutral	Alle drei
„BUND“	<ul style="list-style-type: none"> Mögliche krebserregende Wirkung auf den Menschen Schädliche Wirkung für Tiere und Pflanzen Anreicherung von Nanopartikeln in Böden, Gewässer und Luft Ausreichende Daten für eine sichere Verwendung liegen nicht vor 	negativ	Ökologisch
„VB“	<ul style="list-style-type: none"> Nanopartikel weisen neuartige physikalisch-chemische Eigenschaften auf Auswirkungen auf Mensch und Umwelt unbekannt, schlecht kalkulierbares Risiko Kinder sind sensible Verbrauchergruppe, daher sollte auf Nanopartikel verzichtet werden 	negativ	Sozial
„VCI“	<ul style="list-style-type: none"> Wachsender Nanotechnologiesektor führt zu mehr Arbeitsplätzen Innovationen tragen zum wirtschaftlichen Erfolg Deutschlands bei Verbot von Nanopartikeln in Sonnencreme kann zur Abwanderung von Unternehmen führen 	positiv	Ökonomisch
„Evonik Industries“	<ul style="list-style-type: none"> Profitables Wirtschaftswachstum und damit verbesserte Lebensqualität durch Nanomaterialien Nanopartikel seit Jahren bekannt und in Produkten fest verarbeitet Ressourceneffizienz, Gesundheit, Umweltschutz, Produktqualität, Komfort durch Nanotechnologie 	positiv	Ökonomisch
„DDG“	<ul style="list-style-type: none"> Titandioxidnanopartikel in Sonnencreme dienen als effektiver UV-Filter Senken das Hautkrebsrisiko, ohne Allergien hervorzurufen Hohe Lichtschutzfaktoren werden derzeit nur mit Nanopartikel erreicht 	positiv	Sozial
„DWA“	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Titandioxidnanopartikelkonzentrationen weisen auf eine schädliche Wirkung des Ökosystems hin Titandioxidnanopartikel im Klärschlamm werden auf Deponien verbrannt oder auf Felder gebracht 	negativ	Ökologisch
„BfR“	<ul style="list-style-type: none"> Positiv: Sicherer Hautkrebschutz bei gesunden Hautzellen Negativ: Potentiell schädliche Wirkung von fotokatalytischen Nanopartikeln in Haarfollikeln Neutral: viele Wissenslücken in Bezug auf Langzeitwirkungen für Mensch und Umwelt 	neutral	Sozial/ Ökologisch

⁵⁹ Die angegebenen Inhalte und Positionen sind fiktiv und spiegeln nicht zwangsläufig die Position der jeweiligen Institution wider. Die Institutionen wurden aufgrund der Schaffung eines authentischen Rahmens gewählt und die Statements angelehnt an die jeweiligen Internetauftritte entwickelt.

Der Ablauf des Planspiels umfasst folgende Schritte:

1. Einfinden in die Rolle (findet in der Einführungsphase anhand der Rollenkartestatt)
2. Erarbeitung der Rollenargumente in Kleingruppen anhand des Informationsmaterials
3. Austausch der Positionen und Argumenten im Plenum unter Anleitung des BMUB
4. BMUB zieht sich für eine Entscheidungsfindung zurück und präsentiert anschließend eine Empfehlung
5. Reflexion und Metareflexion des Planspiels

Im ersten Schritt des Planspiels erhalten die Schüler eine Übersicht über ihre Rolle. Ihnen wird daher schon von Beginn des Kurses an verdeutlicht, welche Einstellung ihre Rolle zur Kursfrage einnehmen wird und können daher im Laufe des Kurses bereits Argumente für ihre Position sammeln. Im zweiten Schritt schlüpfen die Schüler nun vollständig in ihre Rollen und erarbeiten in Kleingruppen ihre Argumente. Der dritte Schritt kann je nach zeitlichen Kapazitäten der Lerngruppe entweder mündlich erfolgen oder die Positionen werden schriftlich festgehalten. Im vierten Schritt reflektieren die Vertreter des BMUB die präsentierten Informationen und entwickeln anhand der eigenen, vorher festgelegten Kriterien eine Entscheidung. Während dieser Zeit verlassen die anderen Schüler bereits ihre Rollen und analysieren, wie sie sich persönlich – unabhängig von ihrer Rollenposition – zu diesem Thema positionieren würden. Anschließend stellen die Vertreter des BMUB ihre Empfehlung vor und begründen ihre Entscheidung. In der abschließenden Reflexion wird zum einen die Entscheidung des BMUB aus Sicht der unterschiedlichen Rollen betrachtet sowie aus der eigenen Perspektive der Schüler. Zusätzlich werden mögliche Schwierigkeiten und Probleme benannt und analysiert, die die Schüler sowohl bei der Übernahme ihrer Rolle hatten als auch bei einer Entscheidungsfindung.

Tabelle 16 - Ablauf sowie der Inhalte jeder Phase des Schülerlabors des Projekts NanoBiNE. Darüber hinaus ist die Stufe der jeweiligen Phase entsprechend des gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterrichtskonzepts vermerkt.

Phase	Inhalt	Stufe
Begrüßung, Fragebogen (Pretest)	Die Schüler kommen an und werden vom Kursleiter begrüßt. Die Schüler füllen den Fragebogen aus.	-
Einführungsphase I	Die Frage des Kurses „Sollen Zinkoxid- sowie Titandioxidnanopartikeln weiterhin in Sonnencreme verwendet werden?“ wird präsentiert und gemeinsam werden Kriterien für eine gute Entscheidungsfindung entwickelt.	1. Zugang und Analyse der Kontroverse
Planspiel NanoDialog I	Die Rollenkarten werden den Schülern zugeteilt und sie lesen die Beschreibung ihrer Rollenposition.	1. Zugang und Analyse der Kontroverse
Einführungsphase II	Einführungsvortrag zum Thema Nanotechnologie und Nachhaltigkeit wird präsentiert.	2. Fachliche Klärung
Experimentierphase	Die Schüler erhalten eine Sicherheitsbelehrung und führen anschließend in Gruppen die drei Versuche durch.	2. Fachliche Klärung unter Einbezug experimenteller Arbeit
Sicherung der Experimentierphase	Besprechung der Beobachtungen erfolgt gemeinsam im Plenum. Diskussion und Vertiefung der Ergebnisse.	2. Fachliche Klärung unter Einbezug experimenteller Arbeit
Planspiel NanoDialog II	Neben den Rollenkarten erhalten die Schüler nun auch Informationsmaterial zu ihren Rollen. Dieses wird bearbeitet und Argumente herausgearbeitet.	3. Wiederaufgreifen der kontroversen Problemlage 4. Erarbeitung verschiedener Perspektiven
Planspiel NanoDialog III	Argumente der einzelnen Gruppen werden unter Anleitung des BMUBs vorgestellt. Nachfragen und Diskussionen schließen sich an. BMUB stellt die Empfehlung vor. Reflexion des Planspiels.	4. Diskussion verschiedener Perspektiven 5. Metareflexion
Fragebogen (Posttest), Verabschiedung	Die Schüler füllen erneut den Fragebogen aus, es wird sich für die Teilnahme bedankt und die Schüler werden verabschiedet.	-

7. Erhebung von Schülerperspektiven zur Nanotechnologie und Nachhaltigkeit

Die Durchführung einer Befragung von Schülern im Rahmen der NanoBiNE lässt sich mithilfe von zwei Hauptargumenten begründen. Zum einen kann hiermit ein Teil zu der chemiedidaktischen BNE -Forschung beigetragen werden, die nachweislich kaum vorhanden ist (siehe Kapitel 3.5). Zum anderen ermöglicht sie eine Evaluation des Schülerlabors und kann einen Beitrag zu Untersuchung der Wirksamkeit von Interventionen im Rahmen von Schülerlaboren für die Förderung einer BNE leisten.

Die Erhebung ist in zwei Teile gegliedert. Zum einen sollen Hypothesen überprüft werden, die größtenteils aus dem Vorreiter der BNE - der Umweltbildung - stammen und für den Rahmen der NanoBiNE angepasst wurden. Diese werden in diesem Kapitel vorgestellt und in Kapitel 9.1 - 9.3 ausgewertet. Zum anderen schließt sich aufgrund des explorativen Charakters der Erhebung nach der Präsentation der Ergebnisse (Kapitel 8) eine Hypothesengenerierung (Kapitel 9.4) an, die sich aus dem vorliegenden Untersuchungsmaterial ableiten lassen.

7.1. Hypothesen der Umweltbildung

Folgende Hypothesen bieten sich an, innerhalb der Schülerlaborkurses getestet zu werden.

7.1.1. Hypothese 1: Die Schüler verknüpfen mit dem Begriff Nachhaltigkeit vorrangig ökologische Aspekte.

Eine theoretische Grundlage für diese Hypothese ist bspw. in der Arbeit „**Fachliche Vorstellungen und Schülervorstellungen zum Thema Nachhaltigkeit**“ von BLOEMEN zu finden. [233] Dort weist die qualitative Inhaltsanalyse des „**Leitbild[s] einer nachhaltigen zukunftsverträglichen Entwicklung**“ der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages eine „**Überbetonung ökologischer Aspekte**“ [233, S. 97] auf. „Die ökologische Dimension erfährt im Vergleich zur ökonomischen und sozialen Dimension eine zu starke Gewichtung.“ [233, S.97] In der Analyse des Text „**Nachhaltigkeit als gesellschaftlicher Konsens?**“ von ROGALL wird Folgendes festgehalten:

„Eine ökologische Fahrinne gibt den Spielraum für ökonomische und ökologische Entwicklungen vor und orientiert sich an der Tragfähigkeit der Umwelt, so dass die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit nicht als gleichberechtigt angesehen werden dürfen.“ [233, S. 105]

Lernerperspektiven ergaben in diesem Kontext, dass der Nachhaltigkeitsbegriff folgende Aspekte aufweist:

- „In einer nachhaltigen Entwicklung wird die Zukunft geschützt und die Erde nicht ausgebeutet.“ [233, S. 63]
- „Nachhaltigkeit bedeutet, das heutige Leben so zu gestalten, dass auch noch kommende Generationen auf der Erde in vernünftigen Verhältnissen leben können. Dabei dürfen Ressourcen der Erde nur in dem Maße entnommen werden, wie sie sich gleichzeitig regenerieren kann.“ [233, S. 55]
- „Die heutige Generation muss die Erde schützen, um die Lebensgrundlage zukünftiger Generationen sicher zu stellen.“ [233, S. 45]

Auch wenn hier bereits Aspekte der sozialen Dimension benannt werden (generationsübergreifend, „vernünftige Verhältnisse“ schließen bspw. Frieden mit ein), stellen diese Beispiel ebenfalls die ökologische Dimension in den Vordergrund (Umweltschutz, Ressourcenschonung).

Auch bei RIECKMANN wurde in einer explorativen Delphi Studie das Verständnis nachhaltiger Entwicklung erhoben, bei der von 80 gegebenen Antworten die häufigste Zuordnung (16-mal) zur Kategorie „ökologisch verträgliche Lebensweise“ erfolgt. [234] Eine von PETSCH et al. durchgeführte Befragung zu Handlungsfeldern im Rahmen des Transfer-21 zeigt, dass die

„Experimental- und Kontrollgruppe [...] sich in der Verteilung der Themenfelder nicht [unterscheiden.]. [D]er Schwerpunkt liegt eindeutig im ökologischen Bereich und die fokussierten Themen beziehen meist **Energiesparmaßnahmen ein.**“ [235, S. 57]

All diese Befunde erscheinen vor dem Hintergrund des Ursprungs des Begriffs Nachhaltigkeit (aus der Forstwirtschaft) und der nachhaltigen Bildung (aus der Umweltbildung weiterentwickelt) nicht sonderlich überraschend. Eine Testung der Hypothese soll feststellen, ob dieser ökologische Schwerpunkt auch bei den teilnehmenden Schülern vorhanden ist und ob dieser sich über die Messzeitpunkte verändert.

7.1.2. Hypothese 2: Ohne Wissen zur Nachhaltigkeit erfolgt keine Handlungsbefähigung.

Ein Teil der Begründung für diese These wurde bereits unter dem aktuellen Forschungsstand (Kapitel 3.5) aufgeführt, als Barrieren für ein nachhaltiges bzw. umweltfreundlicheres Handeln. RIEß benennt dabei als

eine mögliche Barriere einen „Mangel an einer oder mehrerer Wissensformen: faktisches „Umweltwissen“, „Handlungswissen“, „Wirksamkeitswissen“ und „soziales Wissen“.“ [46, S. 65]

Ebenso benennen STENGEL et al. fehlendes Wissen als Barriere für einen nachhaltigen Lebensstil. Dabei lauten die zwei zentralen Schritte: „vom Nichtwissen zum Wissen, [...] vom Wissen zum Handeln.“ [236, S. 29] Der zweite Schritt bedeutet zwar nicht, dass „Wissen“ in ein bestimmtes Handeln resultiert, es bildet jedoch die Grundlage für ein nachhaltiges Handeln. In Kapitel 3.5 wurden darüber hinaus bereits die Merkmale eines Umweltbewusstseins vorgestellt, welches sich nach MALONEY und WARD aus dem Umweltwissen, der Umwelteinstellung und dem Umweltverhalten zusammensetzt. [48] Auch dies zeigt, dass Wissen und Handeln im Kontext von Nachhaltigkeit eng miteinander verknüpft sind.

Wenn von einem Wissenszuwachs im Rahmen des Besuchs des Schülerlabors ausgegangen wird, bedeutet dies, dass die Schüler nach dem Kurs verstärkt dazu befähigt wären, Beispiele nachhaltigen Handelns benennen zu können, als zu Beginn des Kurses.

7.1.3. Hypothese 3: Die Schüler sehen die Verantwortung einer nachhaltigen Entwicklung nicht bei sich selbst.

Diese Hypothese basiert auf den Barrieren drei und vier, die RIEB für ein erschwertes nachhaltiges bzw. umweltfreundliches Handeln anführt (vgl. Kapitel 3.5). Dabei wird zusammengefasst, dass Schüler eine „ausgeprägte externe Verantwortungsattribution“ [46, S. 65] aufweisen können sowie „negative Kontrollüberzeugungen [...] und unzutreffende Handlungsergebniserwartungen“. [46, S. 65] Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass die Schüler keine Verantwortung für eine nachhaltige Entwicklung bei sich selbst sehen und deren eigenes Handeln keine signifikanten Auswirkungen (sowohl positiv als auch negativ) hat. Sollte es nicht möglich sein, die Schüler dafür zu sensibilisieren, dass das eigene Handeln sehr wohl einen Einfluss hat und jeder selbst seinen Beitrag leisten kann, werden sie die nachhaltige Entwicklung nicht als bedeutsam für ihr (alltägliches) Leben wahrnehmen.

Für die Erhebung stellt sich damit die Frage, wen die Schüler in der Pflicht sehen, die Ziele einer nachhaltigen Entwicklung umzusetzen und ob sich diese Verantwortungszuschreibung über verschiedene Messzeitpunkte verändert.

7.2. Methodenwahl und Fragebogenentwicklung

Da die Erhebung im Rahmen des Schülerlabors stattfand und dessen Durchführung zeitlich begrenzt ist, wurde sich für die Entwicklung eines Fragebogens entschieden. Diese Methode bietet eine effektive Möglichkeit, Einstellungen, Meinungen sowie Positionen zum Thema Nachhaltigkeit und Nanotechnologie zu erfassen. [237] Um den Erfolg eines BNE-Transfers zu überprüfen, sind nach GRÄSEL Längsschnittstudien in einem Pre-Post-Follow-Up-Designs empfehlenswert. [238] Daher wurde sich für eben dieses Forschungsdesign entschieden.

Pre- und Posttests sind bis auf eine Frage identisch, im Posttest wird lediglich zusätzlich die Rolle im Planspiel als ein zusätzliches Merkmal erhoben. Laut Faustregel nach GRÄF sollte die Fragenanzahl 25 nicht übersteigen, sodass sich im Pre- und Posttest für einen Umfang von 22 Fragen entschieden wurde. [239] Da der Follow-Up-Test auf die Überprüfung einer nachhaltigen Wirksamkeit der Intervention abzielt, wurde er vier bis sechs Wochen nach dem Besuch des NanoBiNE-Schülerlaborkurses durchgeführt. Dadurch, dass der Follow-Up-Test in der Schule durchgeführt wurde, wurde er auf acht Fragen gekürzt.

Der Fragebogen besteht aus einem quantitativen und qualitativen Teil. Für den quantitativen Teil werden geschlossene Fragen mit einer 5-stufigen verbalen Charakterisierung nach LIKERT [240] als Antwortmöglichkeit gewählt. In Tabelle 17 ist die Kodierung der Skala dargestellt, wobei die Erhöhung des numerischen Wertes einer Erhöhung der Zustimmung entspricht.

Tabelle 17 - Verbale Charakterisierung sowie Kodierung der gewählten Likert-Skala und der Option „weiß ich nicht“.

Verbale Charakterisierung	trifft voll und ganz zu	trifft eher zu	teils teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu	Weiß ich nicht
Kodierung	5	4	3	2	1	6

Nach ROHRMANN sind diese Bewertungsschritte geeignet, um als äquidistant angesehen zu werden. [241] Um zu vermeiden, dass die Schüler bei Unsicherheit oder Unwissenheit nach BORTZ zur „Tendenz zur Mitte“ [240] neigen, wurde als separates Auswahlkriterium „weiß ich nicht“ (Kodierung „6“) gewählt.

Der qualitative Teil des Fragebogens besteht aus offenen Fragen. Dieses offene Antwortformat bietet den Schülern die Möglichkeit, ihre eigenen Vorstellungen und Meinungen zu den Themen Nanotechnologie und Nachhaltigkeit zu verbalisieren. [237, 242] Auch soll vermieden werden, dass durch vorgegebene

Antwortmöglichkeiten bspw. **zum Verständnis der „Nachhaltigkeit“, die Meinungen der Schüler** in eine Richtung beeinflusst werden und diese stattdessen frei assoziieren können. [242]

Um mit einer höheren Wahrscheinlichkeit eine Antwort bei komplexen Fragen zu erhalten, wird zusätzlich **eine Mischform zwischen offenen und geschlossenen Fragen gewählt, die „vorgegebene Antwortkategorien haben, aber zusätzlich eine offene Kategorie enthalten.“** [237, S. 53] Diese halboffenen Antwortformate bieten den Vorteil, dass zum einen eine Positionierung hinsichtlich einer Fragestellung erreicht werden kann (durch Auswahl einer vorgegebenen Antwortmöglichkeit), jedoch über das Anführen einer Begründung zusätzliche Informationen in Erfahrung gebracht werden können. Wie bei den halboffenen Fragen sollte deren Anzahl ebenfalls zugunsten einer handhabbaren Auswertung begrenzt sein.

Zusammenfassend wird für den Pre- und Posttest ein Fragebogen mit 15 geschlossenen, drei halboffenen und vier offenen Fragen entwickelt. Der Follow-Up-Test besteht aus drei geschlossenen, drei halboffenen und zwei offenen Fragen.⁶⁰

7.3. Ablauf der Datenerhebung unter Beachtung der Gütekriterien von Testverfahren

Um die Gütekriterien von Testungen (Objektivität, Reliabilität und Validität) zu gewährleisten, wurden folgende Maßnahmen unternommen. Eine Objektivität in der Durchführung, sollte dadurch erreicht werden, dass der Ablauf des Tests nach einem identischen Muster stattfindet. Der Pretest wurde nach einer kurzen Begrüßungsphase durchgeführt. Die Schüler wurden darauf hingewiesen, dass es sich bei dem vorliegenden Fragebogen um keinen Test, sondern explizit um eine Befragung handelt. Es wurde darauf aufmerksam gemacht, dass es bei der Befragung keine richtigen oder falschen Antworten gibt, sondern dass die Meinungen, Positionen und Einstellungen der Schüler von Interesse sind. Daher wurde darum gebeten, dass jeder Schüler für sich alleine arbeitet. Auch wurde die Bedeutsamkeit der Teilnahme jedes einzelnen Schülers an der Erhebung (Teilnahme an Forschung, Unterstützung des Promotionsvorhabens) sowie die Anonymität der Teilnehmenden herausgestellt, was die Schüler zu einem gewissenhaften Ausfüllen des Fragebogens motivieren sollte. Der Posttest erfolgte nach Durchführung des Schülerlabors. Beide Erhebungen fanden in denselben Räumlichkeiten und in einem identischen Zeitrahmen statt, auch wenn die Tageszeit je nach Ankunft der Schüler variiert. Für den Follow-Up-Test können über die räumlichen

⁶⁰ Die Fragebögen des Pre-, Post- und FollowUp-Tests sind im Anhang A.2. zu finden.

und zeitlichen Rahmen kaum Aussagen gemacht werden. Einige dieser Tests wurden von der Kursleitung vor Ort in der jeweiligen Schule durchgeführt, die restlichen Testhefte wurden per Post versandt und anschließend vor Ort abgeholt oder von der Lehrkraft zurückgeschickt. Der zeitliche Umfang wurde den Lehrkräften vorgegeben, es kann aber nicht überprüft werden, ob dieser auch eingehalten wurde. Die Auswertung sowie Interpretation der Erhebung wurde in einem engen Austausch von drei verschiedenen Personen durchgeführt. So wurden die Arbeitsweisen sowie die Ergebnisse untereinander überprüft und Grenzfällediskutiert.

Da die durchgeführte Erhebung einen hohen explorativen Charakter hat und Veränderungen im Antwortverhalten über den Verlauf der Erhebungen ausdrücklich erwünscht sind, können nur im geringen Maße Aussagen über die Reliabilität und Validität getroffen werden. Die Tatsache, dass es sich bei einem Großteil der Fragen um geschlossene Fragen mit voll standardisierten Skalenniveau handelt und sie schriftlich festgehalten sind, trägt dazu bei, dass die Genauigkeit der Messung erhöht wird.⁶¹ Auch eine Erhöhung der Objektivität trägt zu einer verbesserten Reliabilität bei. [240] Bei der Entwicklung des Fragebogens wurde in einem intensiven Austausch darüber diskutiert, inwieweit durch die Fragen das gemessen wird, was in Bezug auf die Fragestellungen von Interesse ist. Da in diesem Bereich allerdings kaum geeignete Literatur vorliegt, ist es schwer, adäquate Aussagen über die Validität zu treffen.

⁶¹ Abgeleitet von den „Praxistipps“ zur Erhöhung der Reliabilität nach der Wirtschaftspsychologischen Gesellschaft. [243]

8. Darstellung und Analyse der Ergebnisse der Erhebung⁶²

Im folgenden Kapitel werden die erhobenen Daten präsentiert und analysiert. Dabei wird zunächst die untersuchte Stichprobe beschrieben (Kapitel 8.1), welcher sich die Darstellung der Analyse der geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests anschließt (Kapitel 8.2).

Die Auswertung der offenen Fragen erfolgt mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING. [244] Die offenen Frage 04 und 05 des Pre- und Posttests stimmen dabei mit den Fragen 06 und 08 im Follow-Up-Test überein, sodass diese gemeinsam ausgewertet werden. Da die Frage 06 des Pre- und Posttests inhaltlich der Frage 05 sehr stark ähnelt und eine separate Betrachtung nicht zielführend erscheint, werden diese beide Fragen bei der Auswertung als eine Einheit betrachtet (Kapitel 8.3). Um die Darstellung der Ergebnisse der offenen Fragen des Pre- und Posttests zu vervollständigen, wird abschließend die Frage 07 thematisiert (Kapitel 8.4).

Als nächste Einheit werden die halboffenen Fragen des Pre- und Posttests betrachtet. Die Frage 09 des Pre- und Posttests hat sich aufgrund ihrer Formulierung im Zuge der Auswertung als ungeeignet erwiesen, sodass diese Frage komplett aus der Analyse gestrichen wird. Es folgt also zunächst die Präsentation der Frage 10 des Pre- und Posttests (Kapitel 8.5). Die halboffene Frage 08 des Pre- und Posttests stimmt mit der Frage 05 des Follow-Up-Tests überein, sodass in dem darauffolgenden Abschnitt ein Vergleich des Antwortverhaltens über die zeitliche Entwicklung zur Bewertung der Verwendung von Sonnencreme mit Nanopartikeln analysiert wird (Kapitel 8.6).

Da der Follow-Up-Test nicht identisch zum Pre- und Posttest konzipiert wurde, werden im letzten Teil dieses Kapitels die geschlossenen und die noch fehlenden halboffenen Fragen des Follow-Up-Tests separat präsentiert (Kapitel 8.7).

⁶² Die der Analyse zugrundeliegenden Rohdaten sowie die einzelnen Ergebnisse jedes durchgeführten Tests sind auf beiliegender CD zu finden.

Die Datenanalyse erfolgt mit dem Programm „IBM Corp. Released 2017. SPSS Statistics for Windows, Version 25.0. Armonk, NY: IBM Corp.“, die Auftragungen werden mit „Origin (OriginLab, Northampton, MA)“ angefertigt.

8.1. Stichprobenbeschreibung

Innerhalb von knapp 13 Monaten besuchten insgesamt 273 Schüler aus 14 verschiedenen Lerngruppen den Schülerlaborkurs der NanoBiNE. Das Projekt wurde an 138 Real-, Haupt- und Gesamtschulen sowie Gymnasien in einem Umkreis von 100 km von Göttingen beworben. Die teilnehmenden Schulen (siehe Abbildung 41) stammten aus der Stadt Göttingen (acht), Südniedersachsen (jeweils einmal aus Goslar und Holzminden) sowie Nordhessen (zweimal Kassel, einmal Melsungen und einmal Eschwege).



Abbildung 41 - Geographische Einordnung der teilnehmenden Schulklassen an dem Schülerlaborkurs der NanoBiNE.⁶³

Von den Schülern wurden insgesamt vier Merkmale erhoben – Geschlecht, Alter, Schulform sowie Jahrgangsstufe. In Abbildung 42 sind die prozentualen Zusammensetzungen der Merkmale dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass der Großteil – 80,96 % - der Schüler der Mittelstufe (also der neunten und zehnten Jahrgangsstufe) zuzuordnen ist. Dementsprechend liegt der Altersdurchschnitt der Schüler bei 15,5 Jahren. Die Geschlechteraufteilung ist annähernd halb-halb (46,89 % Mädchen, 52,38 % Jungen) und die Anzahl der teilnehmenden Gymnasiasten liegt etwas über der Zahl der teilnehmenden Gesamtschüler (152 Gymnasiasten, 121 Gesamtschüler). Die Schüler der Gesamtschulen stammen sowohl aus Realschulen als auch Gymnasialzweigen. Eine genauere Differenzierung dieser Gruppe fand innerhalb der Datenerhebung nicht statt.

⁶³ Karte modifiziert nach Vorlage von simplemaps, online verfügbar unter <https://simplemaps.com/resources/svg-de> (zuletzt geprüft am 05.11.18).

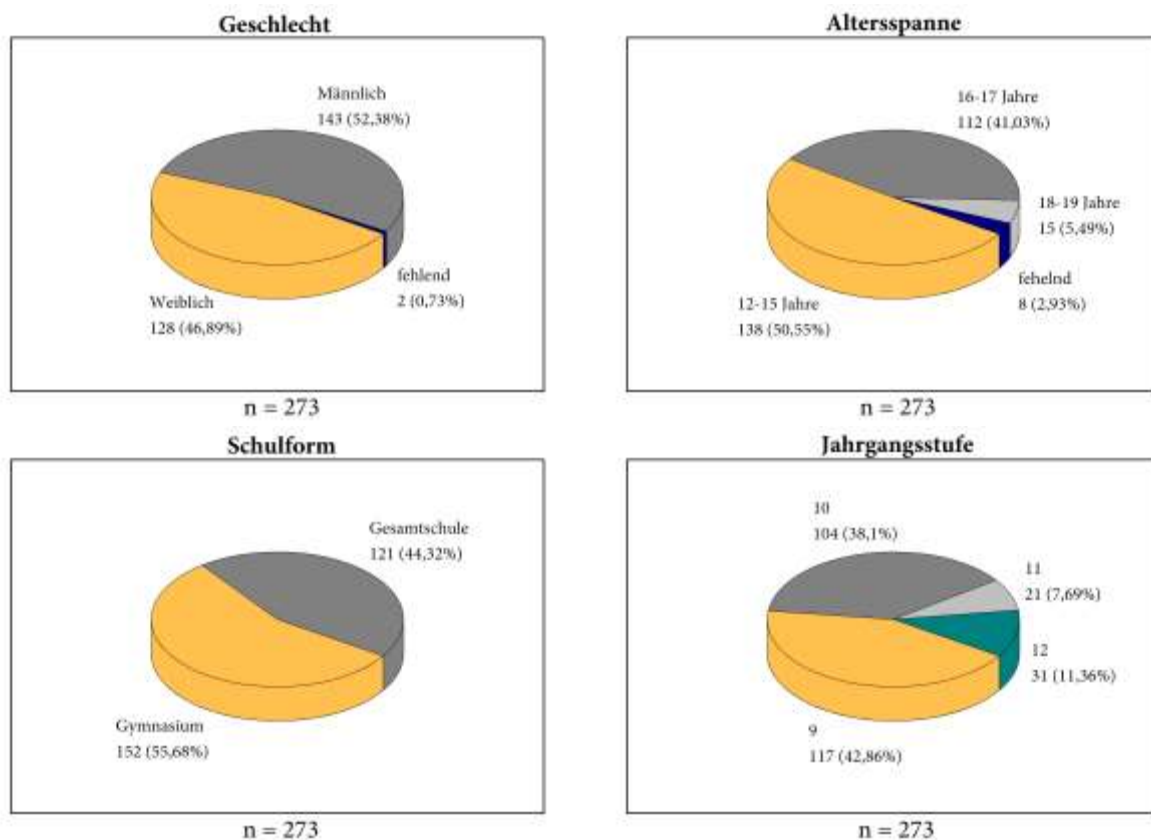


Abbildung 42 - Graphische Darstellung der prozentualen Zusammensetzung der Merkmale der Stichprobe.

Die Rücklaufquote des Follow-Up-Tests beträgt 76,6 %, was einer Anzahl von 209 Teilnehmenden umfasst. Dabei ändern sich Zusammensetzung der Merkmalsausprägungen nur geringfügig. Es nahmen 52,2 % Jungen und 47,4 % Mädchen⁶⁴ mit 54,1 % vom Gymnasium und 45,9 % von der Gesamtschule teil. Der Anteil der Mittelstufenschüler war dabei im Vergleich zum Pre- und Posttest leicht erhöht (9. Klasse 49,3 %, 10. Klasse 39,2 %, 11. Klasse 3,3 % und 12. Klasse 8,1 %), sodass der Altersdurchschnitt auf 14,9 Jahre herabgesetzt wurde.

⁶⁴ Die fehlende Differenz ergibt sich durch fehlende Angaben.

8.2. Quantitative Analyse der geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests

Im diesem Unterkapitel werden die 15 geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests analysiert.⁶⁵ Dabei wird zunächst das allgemeine Antwortverhalten betrachtet. Anschließend werden die Häufigkeitsverteilungen der jeweiligen Frage angeführt und die Mittelwerte statistisch verglichen. Generell ist bei der Interpretation der Ergebnisse darauf zu achten, dass es beim Ausfüllen von Fragebögen mehrere Einflussfaktoren vorhanden sind, die das Ergebnis verzerren können. Diese umfassen bspw. eine „absichtliche Verstellung“, „soziale Erwünschtheit“, „Akquieszenz“, „Bevorzugung von extremen, unbestimmten oder besonders platzierten Antwortkategorien“ oder auch eine „Verfälschung der Tendenz, zu raten, oder aufgrund einer raschen Bearbeitung des Fragebogens“. [237, S. 64ff] Auch liegt bei einem identischen Pre-Posttest-Design die Vermutung nahe, dass die Befragten im Posttest mit dem Messinstrument bereits vertrauter sind.

8.2.1. Allgemeines Antwortverhalten

Zu Beginn der Analyse wird das Antwortverhalten im Pre- und Posttest in Bezug auf die geschlossenen Fragen betrachtet. Dabei werden die drei Kategorien „Antwort“, „weiß ich nicht“ und „fehlend“ betrachtet (siehe Tabelle 19). „Antwort“ bedeutet in diesem Fall, dass eine Option der fünfstufigen Likert-Skala ausgewählt wurde. Das Item 22.4 wird dabei aus der Wertung herausgenommen.⁶⁶ Zu einer vereinfachten Interpretation der Ergebnisse wird eine Farbskala angelegt, die die Differenzen im Antwortverhalten farblich codiert (siehe Tabelle 18). Aus den oben angeführten Gründen wird festgelegt, dass das Antwortverhalten vom Pre- zum Posttest nur dann eine aussagekräftige Veränderung darstellt, wenn die Differenz der relativen Häufigkeiten über 10 % liegt. Die weiteren Abstufungen erfolgen in 10 %-Schritten.

Tabelle 18 - Ratingskala und Farbkodierung der Intensität der Änderung des Antwortverhaltens.

Bereich	Veränderung	Farbe
0-10 %	Nicht aussagekräftig	Rot
10-20 %	Schwach	Blau
20-30 %	Mittel	Lila
30-40 %	Stark	Grün
Ab 40 %	Extrem stark	Gelb

⁶⁵ Es handelt sich um die 15 geschlossenen Fragen, wobei die Frage 22 in fünf Teilfragen unterteilt ist (22, 22.1, 22.2, 22.3 und 22.4).

⁶⁶ Item 22.4.: „Der verantwortungsvolle Umgang mit Nanomaterialien liegt in der Pflicht von: andere: _____“ und die dazugehörige Likert-Skala. Wenn keine andere Institution/Personengruppe oder ähnliches genannt wurde, konnte dementsprechend auch kein Kreuz auf der Likert-Skala gesetzt werden.

Es ergibt sich folgendes Antwortverhalten für die einzelnen Fragen:

Tabelle 19 - Antwortraten für die geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests. Das Vorzeichen „+“ bei der Veränderung steht für eine Zunahme, das Vorzeichen „-“ für eine Abnahme der jeweiligen Häufigkeit.

Frage	Auswahl	Pretest		Posttest		Veränderung
		Häufigkeit	%	Häufigkeit	%	%
01	Antwort	209	76,56	270	98,90	+22,34
	weiß ich nicht	64	23,44	1	0,37	-23,07
	fehlend	10	0,00	2	0,73	+0,73
02	Antwort	195	71,43	270	98,90	+27,47
	weiß ich nicht	77	28,21	1	0,37	-27,84
	fehlend	1	0,37	2	0,73	+0,36
03	Antwort	227	83,15	263	96,34	+13,19
	weiß ich nicht	43	15,75	7	2,56	-13,19
	fehlend	3	1,10	3	1,10	0
11	Antwort	195	71,43	255	93,41	+21,98
	weiß ich nicht	72	26,37	16	5,86	-20,51
	fehlend	6	2,20	2	0,73	-1,47
12	Antwort	95	34,80	224	82,05	+47,25
	weiß ich nicht	174	63,74	45	16,48	-47,26
	fehlend	4	1,47	4	1,47	0
13	Antwort	218	79,85	256	93,77	+13,92
	weiß ich nicht	50	18,32	13	4,76	-13,56
	fehlend	5	1,83	4	1,47	-0,36
14	Antwort	209	76,56	249	91,21	14,65
	weiß ich nicht	63	23,08	19	6,96	-16,12
	fehlend	1	0,37	5	1,83	+1,46
15	Antwort	208	76,19	261	95,60	+19,41
	weiß ich nicht	63	23,08	7	2,56	-20,52
	fehlend	2	0,73	5	1,83	+1,1
16	Antwort	155	56,78	257	94,14	+37,36
	weiß ich nicht	113	41,39	12	4,40	-36,99
	fehlend	5	1,83	4	1,47	-0,36
17	Antwort	90	32,97	222	81,32	+48,35
	weiß ich nicht	179	65,57	45	16,48	-49,09
	fehlend	4	1,47	6	2,20	+0,73
18	Antwort	69	25,27	186	68,13	+42,86
	weiß ich nicht	197	72,16	81	29,67	-42,49
	fehlend	7	2,56	6	2,20	-0,36
19	Antwort	73	26,74	215	78,75	+52,01
	weiß ich nicht	194	71,06	51	18,68	-52,38
	fehlend	6	2,20	7	2,56	+0,36
20	Antwort	98	35,90	228	83,52	+47,62

	weiß ich nicht	169	61,90	34	12,45	-49,45
	fehlend	6	2,20	11	4,03	+1,83
21	Antwort	124	45,42	246	90,11	+44,69
	weiß ich nicht	143	52,38	20	7,33	-45,05
	fehlend	6	2,20	7	2,56	+0,36
22	Antwort	218	79,85	242	88,64	+8,79
	weiß ich nicht	38	13,92	9	3,30	-10,62
	fehlend	17	6,23	22	8,06	+1,83
22.1	Antwort	216	79,12	226	82,78	+3,66
	weiß ich nicht	37	13,55	8	2,93	-10,62
	fehlend	20	7,33	39	14,29	+6,96
22.2	Antwort	205	75,09	228	83,52	+8,43
	weiß ich nicht	49	17,95	8	2,93	-15,02
	fehlend	19	6,96	37	13,55	+6,59
22.3	Antwort	217	79,49	226	82,78	+3,29
	weiß ich nicht	34	12,45	9	3,30	-9,15
	fehlend	22	8,06	38	13,92	+5,86

Es ist zu erkennen, dass sich das Antwortverhalten deutlich verändert. Für jede Frage steigt die Antwortrate (erkenntlich durch den positiven Wert) **und die „weiß ich nicht“-Auswahl** nimmt ab (erkenntlich durch den negativen Wert). Bei sechs Fragen sind extrem starke Änderungen im Antwortverhalten zu beobachten, was über einem Drittel der Fragen entspricht. In weniger als einem Drittel findet keine aussagekräftige Veränderung statt. Das restliche Drittel befindet sich zwischen einer schwachen bis starken Veränderung.

Die „fehlenden“ Angaben unterliegen keinen aussagekräftigen Veränderungen und die absoluten Werte sind konstant niedrig. Ausgenommen von letzterem sind die Werte der Frage 22-22.3, bei denen die „fehlenden“ Antworten bei bis zu 15 % liegen.

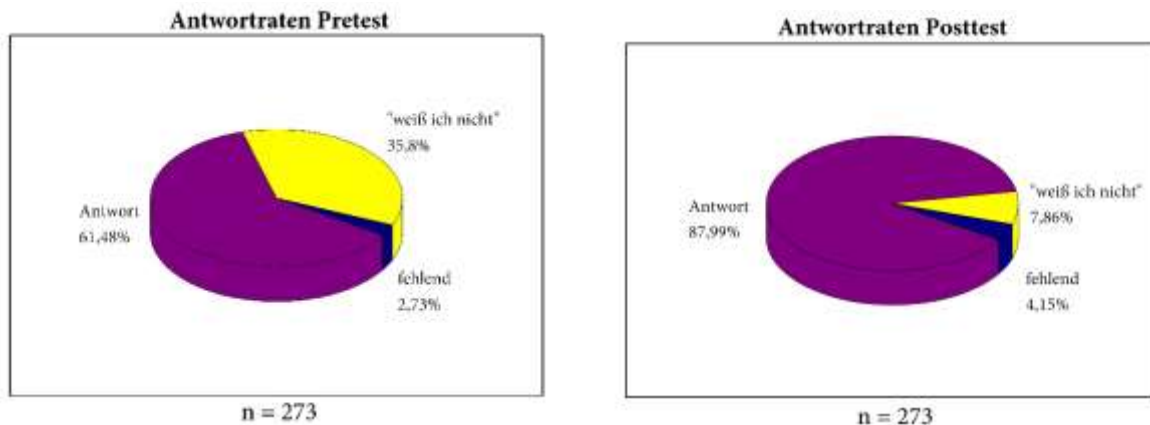


Abbildung 43 - Graphische Darstellung des durchschnittlichen Antwortverhaltens bezüglich der geschlossenen Fragen im Pre- und Posttest.

In der Abbildung 43 ist ebenfalls deutlich zu erkennen, dass sich das durchschnittliche Antwortverhalten über alle geschlossenen Fragen des Pre- und Posttest stark verändert. Gaben im Pretest im Durchschnitt knapp 36 % an, keine Antwort zu den gestellten Fragen zu wissen, waren es im Posttest nur knapp 8 %. Der Anteil der Schüler, die keine Antworten ankreuzten oder eine ungültige Angabe machten (bspw. durch Ankreuzen von zwei Antwortmöglichkeiten) nahm vom Pre- zum Posttest leicht zu (von 2,73 % auf 4,15 %). Der Anteil an gültigen, gegebenen Antworten konnte demnach von knapp 61 % auf 88 % erhöht werden.

Für das Antwortverhalten können vier Fälle definiert werden, die von Relevanz sind. Dabei beschreibt Fall 1 die durchschnittliche Häufigkeit der Teilnehmenden, die sowohl im Pre- als auch im Posttest über alle geschlossenen Fragen eine Antwort ausgewählt haben, Fall 2 diejenigen, die im Pretest „weiß ich nicht“ ausgewählt haben und im Posttest eine Antwort gewählt haben, Fall 3 genau umgekehrt diejenigen, die im Pretest eine Antwort gegeben haben und im Posttest „weiß ich nicht“ angekreuzt haben und im Fall 4 diejenigen, die sich sowohl im Pre- als auch im Posttest für die Auswahl „weiß ich nicht“ entschieden haben. Mithilfe der Definition dieser vier Fälle soll überprüft werden, ob gegenläufige Effekte im Antwortverhalten vorliegen. Würde bspw. der Anteil des 2. Fall hoch sein, aber ebenfalls der Anteil von Fall 3 von Bedeutung sein, so würde dies bedeuten, dass sich im Posttest zwar ein Teil der „weiß ich nicht“-Fraktion am Ende positionieren kann, es allerdings auch Schüler gibt, die ihre „Positionierungsbefähigung“ verlieren.

Tabelle 20 - Definition und die durchschnittlich relative Häufigkeit der vier Fälle.

	Pretest	Posttest	Durchschnitt relative Häufigkeit ⁶⁷
Fall 1	Antwort	Antwort	58,91 %
Fall 2	Weiß ich nicht	Antwort	28,92 %
Fall 3	Antwort	Weiß ich nicht	1,79 %
Fall 4	Weiß ich nicht	Weiß ich nicht	4,76 %

Tabelle 20 zeigt, dass Fall 1 für über die Hälfte der Schüler (etwa 59 %) zutrifft und Fall 2 für knapp 29 %. Auf lediglich circa 2 % der Schüler trifft der Fall 3 zu, auf etwa 5 % der Fall 4. Damit lassen sich keine signifikant bedeutenden, gegenläufigen Effekte im Antwortverhalten beobachten.

⁶⁷ Die fehlenden 5,62 % der Fall-Häufigkeiten ergeben sich aus fehlenden Angaben im Pre- oder im Posttest oder in beiden.

8.2.2. Mittelwertvergleiche der Messwerte

Um zu überprüfen, ob ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Messwerten des Pre- und Posttests besteht, können verschiedene statistische Analyseverfahren verwendet werden. Die Wahl geeigneter Testinstrumente hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem vom Skalenniveau, der Verteilung der Daten, dem Stichprobenumfang sowie von der Tatsache, ob es sich um eine abhängige oder unabhängige Stichprobe handelt.

Die Likert-Skala ist eine Ordinalskala, die in der vorliegenden Arbeit in Übereinstimmung mit KÜHNEL und KREBS [245], DE WINTER und DODOU [246] sowie KUCKARTZ et al. [247] auf eine Intervallskalierung angehoben wird. Dies ermöglicht die Ermittlung bspw. von Mittelwerten und die Durchführung analytischer Verfahren wie dem t-Test. Dadurch, dass der Pre- und Posttest identisch sind und von denselben Probanden zu zwei verschiedenen Messzeitpunkten ausgefüllt werden, handelt es sich um eine abhängige (auch verbunden oder gepaart genannte) Stichprobe. Da für alle Fragen der Stichprobenumfang bei $n > 30$ liegt, kann nach dem zentralen Grenzwerttheorems davon ausgegangen werden, dass die Daten normalverteilt sind. [248]

Zum Vergleich der Mittelwerte wird der t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt. Zur Absicherung der Befunde wird ebenfalls der Wilcoxon-Test durchgeführt, der für abhängige, ordinalskalierte oder nichtnormalverteilte intervallskalierte Variablen verwendet wird. [248] Verglichen wird dabei stets nur der unter Kapitel 8.2.1 aufgeführte Fall 1 (Antwort im Pretest, Antwort im Posttest), da jeweils nur gültige Werte miteinander verglichen werden können. Das heißt, dass sich für jedes Fragenpaar ein unterschiedlicher Stichprobenumfang ergibt. Für den Fall 2 („weiß ich nicht“ im Pretest, Antwort im Posttest) wird zum Vergleich jeweils der Mittelwert im Posttest mit angegeben (in Tabelle 21 als „PostNeu“ gekennzeichnet). Der Fall 3 und Fall 4 können in diesem Konstrukt nicht berücksichtigt werden.

In der Tabelle 21 ist farblich markiert, ob der Mittelwert des Fall 2 eher mit dem Mittelwert des Pre- oder des Posttests übereinstimmt. Dazu wird jeweils die Differenz von „PostNeu“ mit dem jeweiligen Mittelwert „Pre“ oder „Post“ gebildet, wobei die niedrigere Differenz farblich markiert ist.

Tabelle 21 – Mittelwerte aller geschlossener Fragen im Pre- und Posttest für den Fall 1 („Pre“ und „Post“) sowie die Mittelwerte im Posttest für den Fall 2 („PostNeu“).

	Frage	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung
Paar 1	Pre01	207	2.74	0.761
	Post01	207	4.30	1.087
	PostNeu01	63	4.14	0.840
Paar 2	Pre02	193	2.38	1.103
	Post02	193	4.17	0.786
	PostNeu02	77	4.17	0.785
Paar 3	Pre03	222	3.80	0.975
	Post03	222	4.75	0.756
	PostNeu03	41	4.22	0.759
Paar 4	Pre11	187	3.14	1.169
	Post11	187	3.71	1.174
	PostNeu11	68	3.43	0.935
Paar 5	Pre12	83	3.04	0.993
	Post12	83	3.30	0.880
	PostNeu12	141	3.21	0.770
Paar 6	Pre13	210	3.62	1.189
	Post13	210	4.03	1.126
	PostNeu13	46	3.46	1.149
Paar 7	Pre14	198	4.19	0.914
	Post14	198	4.15	0.883
	PostNeu14	51	3.67	0.973
Paar 8	Pre15	201	3.98	0.980
	Post15	201	4.55	0.818
	PostNeu15	60	4.10	1.272
Paar 9	Pre16	148	3.26	1.235
	Post16	148	4.54	0.723
	PostNeu16	109	4.30	0.811
Paar 10	Pre17	84	3.13	0.979
	Post17	84	3.46	0.950
	PostNeu17	138	3.40	0.986
Paar 11	Pre18	58	3.09	1.159
	Post18	58	3.14	1.067
	PostNeu18	128	3.23	0.984
Paar 12	Pre19	63	2.90	0.928
	Post19	63	3.57	0.962
	PostNeu19	152	3.20	0.986
Paar 13	Pre20	89	3.54	0.867
	Post20	89	4.17	0.829
	PostNeu20	139	3.81	0.916
Paar 14	Pre21	114	3.55	0.842
	Post21	114	4.08	1.006

Paar 15	PostNeu21	132	4.05	0.911
	Pre22	205	3.84	1.093
Paar 16	Post22	205	4.18	1.103
	PostNeu22	37	4.43	0.929
	Pre221	195	4.18	1.014
	Post221	195	4.36	0.950
Paar 17	PostNeu221	31	3.77	1.257
	Pre222	191	3.76	1.107
	Post222	191	4.15	1.119
Paar 18	PostNeu222	37	3.81	1.198
	Pre223	196	4.23	0.908
	Post223	196	4.56	0.703
	PostNeu223	29	3.83	1.416

Es ist zu erkennen, dass es kein einheitliches Bild für die Gruppe des Fall 2 gibt. Knapp in der Hälfte der Fälle ist der Mittelwert „PostNeu“ näher an dem Mittelwert „Pre“ als an dem Mittelwert „Post“.

Bei der Durchführung des t-Tests sowie beim Wilcoxon-Test wird die Irrtumswahrscheinlichkeit p ausgegeben, die Rückschlüsse auf die Signifikanz zulässt. Diese gibt letztendlich an, inwieweit die Änderung des Mittelwerts vom Pre- zum Posttest nicht zufällig entstanden ist. Die Signifikanzniveaus werden in die folgenden Kategorien, abgebildet in Tabelle 22, eingeteilt:

Tabelle 22 - Einteilung der Irrtumswahrscheinlichkeiten p . [248, S. 177]

Irrtumswahrscheinlichkeit	Bedeutung	Symbolisierung
$p > 0.05$	nicht signifikant	ns
$p \leq 0.05$	signifikant	*
$p \leq 0.01$	sehr signifikant	**
$p < 0.001$	höchst signifikant	***

Mit der Signifikanz alleine kann allerdings keine Aussage über die Effektstärke des Mittelwertvergleichs getroffen werden, da diese stark von der Stichprobengröße abhängt. [249] Das heißt, dass

„eine relativ große Mittelwertsdifferenz nicht statistisch bedeutsam [wird], falls die untersuchte Stichprobe zu klein ist, während andererseits bei statistischen Analysen mit sehr großen Stichproben schon relativ kleine Mittelwertsdifferenzen statistisch bedeutsam werden können.“ [249, S. 218]

Mithilfe der Effektstärke kann also eine „standardisierte Form eines Mittelwertunterschieds“ [249, S. 218] berechnet werden. Dies kann unter anderem über die Berechnung von Cohen's d erfolgen, in der „[...] die Differenz zwischen zwei Mittelwerten an der Streuung relativiert [wird].“ [249, S. 218], Die Berechnung erfolgt anhand folgender Formel:

$$d = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sigma_x}$$

Die erhaltenen Werte können anschließend nach COHEN [250] wie folgt interpretiert werden:

Tabelle 23 - Einteilung und Interpretation der Effektstärke nach COHEN. [250]

Cohens d	0.0 - 0.1	0.2 – 0.4	0.5 -0.7	≥ 0.8
Interpretation	Kein Effekt	Kleiner Effekt	Mittlerer Effekt	Großer Effekt

Tabelle 24 zeigt die Signifikanzen des t-Tests sowie des Wilcoxon-Test sowie das für den t-Test zugehörige Cohen's d .

Tabelle 24 - Signifikanzen des t- und Wilcoxon-Tests für die geschlossenen Fragenpaare des Pre- und Posttests sowie das aus den t-Test-Ergebnissen berechnete Cohen's d .

Paar	Frage	t-Test		Wilcoxon
		Signifikanz (2-seitig)	Cohen's d_z	Signifikanz (2-seitig)
1	Pre01- Post01	0.000***	1,45	0.000***
2	Pre02- Post02	0.000***	1,54	0.000***
3	Pre03- Post03	0.000***	0,80	0.000***
4	Pre11- Post11	0.000***	0,49	0.000***
5	Pre12- Post12	0.028*	0,24	0.020*
6	Pre13- Post13	0.000***	0,39	0.000***
7	Pre14- Post14	0.586	0,04	0.712
8	Pre15- Post15	0.000***	0,53	0.000***
9	Pre16- Post16	0.000***	0,96	0.000***
10	Pre17- Post17	0.018*	0,26	0.013*
11	Pre18- Post18	0.784	0,04	0.853
12	Pre19- Post19	0.000***	0,55	0.000***
13	Pre20- Post20	0.000***	0,61	0.000***
14	Pre21- Post21	0.000***	0,43	0.000***
15	Pre22- Post22	0.000***	0,30	0.000***
16	Pre221- Post221	0.016*	0,17	0.008**
17	Pre222- Post222	0.000***	0,35	0.000***
18	Pre223- Post223	0.000***	0,37	0.000***

Es ist zu erkennen, dass nach den Signifikanzwerten beider Tests die Paare 1-4, 6, 8-9, 12-15 sowie 17-18 höchst signifikant, Paar 5 und 10 signifikant sowie Paar 7, 11 und 19 nicht signifikant sind. Lediglich bei dem Paar 16 stimmt das Signifikanzniveau der beiden Tests nicht überein. Das Paar 16 ist nach dem t-Test signifikant ($p .016$) und nach dem Wilcoxon-Test sehr signifikant ($p .008$). Den Werten für die Effektstärke zufolge, liegt bei den Paaren 1, 2, 3 und 9 ein großer Effekt vor, bei den Paaren 8, 12 und 13 ein mittlerer Effekt, bei den Paaren 4, 5, 6, 10, 14, 15, 17 und 18 ein kleiner Effekt und bei den Paaren 7, 11 und 16 kein Effekt.

8.2.3. Korrelationskoeffizient r nach Pearson für die geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests

Um mögliche vorliegende Zusammenhänge (Korrelationen) zwischen verschiedenen Fragen zu erkennen, wird der Korrelationskoeffizient r nach Pearson⁶⁸ für die geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests bestimmt. Dabei werden Werte zwischen -1 und $+1$ ausgegeben, „wobei ein Betrag nahe 1 einen starken und ein Betrag nahe bei 0 einen schwachen Zusammenhang bedeutet.“ [248, S. 426] Ein negativer Wert deutet dabei auf einen gegenläufigen Zusammenhang hin. [248] Darüber hinaus können die Werte nach folgender Einteilung quantifiziert werden:

Tabelle 25 - Einteilung des Korrelationskoeffizienten r sowie deren Interpretation. [248] S. 426

Wert	Interpretation
bis 0,2	Sehr geringe Korrelation
bis 0,5	Geringe Korrelation
bis 0,7	Mittlere Korrelation
bis 0,9	Hohe Korrelation
über 0,9	Sehr hohe Korrelation

Neben den Korrelationswerten wird ebenfalls die Irrtumswahrscheinlichkeit p mit ausgegeben. Im Folgenden werden die stärksten Zusammenhänge ($r \geq .400$) präsentiert.

⁶⁸ Der Korrelationskoeffizient nach Pearson kann für intervallskalierte und normalverteilte Variablen berechnet werden.

Tabelle 26 - Zusammenhängende geschlossene Fragen des Pre- und Posttests ab $r \geq .400$, *** $p < .001$.

Paar	r	Paar	r	Paar	r
Pre01-Pre02	.635***	Pre12-Pre15	.588***	Pre221-Post221	.449***
Pre03-Pre11	.414***	Pre12-Pre18	.636***	Pre222-Post222	.513***
Pre03-Pre13	.441***	Pre13-Post13	.596***	Pre223-Post223	.434***
Pre11-Pre13	.443***	Pre15-Pre18	.456***	Post01-Post02	.429***
Pre11-Pre15	.489***	Pre19-Pre20	.569***	Post03-Post13	.413***
Pre11-Post11	.499***	Pre22-Post22	.459***	Post20-Post21	.422***
Pre12-Pre14	.450***	Pre221-Pre222	.419***	Post221-Post222	.511***
				Post222-Post223	.402***

8.2.4. Faktorenanalyse der geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests

Um die Datenmenge zu reduzieren und stark korrelierende Variablen zusammenzufassen, kann eine explorative Faktorenanalyse durchgeführt werden.⁶⁹ [248] Hierbei werden Fragen, die eine statistische Nähe aufweisen, zu einer Komponente zusammengefasst. Mithilfe der Berechnung von Cronbachs Alpha werden die einzelnen Komponenten hinsichtlich ihrer Reliabilität, also ihrer internen Konsistenz, überprüft. Die Durchführung der Faktorenanalyse des Pre- und Posttests ergibt jeweils fünf Komponenten (siehe Tabelle 27 und Tabelle 28).

Tabelle 27 - Komponenten der Faktorenanalyse des Pretests.

	Komponente				
	1	2	3	4	5
Pre12	0,908	0,008	-0,032	-0,117	-0,085
Pre14	0,792	0,209	0,051	0,366	-0,121
Pre18	0,782	0,001	-0,160	-0,130	-0,090
Pre15	0,780	0,423	0,074	0,130	0,036
Pre16	0,658	0,094	0,007	0,423	0,248
Pre13	0,143	0,841	-0,262	0,008	0,047
Pre03	0,015	0,747	0,314	0,148	-0,206
Pre11	0,374	0,742	-0,062	-0,114	0,408
Pre20	-0,008	-0,232	0,886	0,148	0,076
Pre19	-0,044	0,186	0,789	-0,265	0,096
Pre01	-0,066	0,081	0,234	0,794	0,087
Pre17	-0,137	0,000	0,260	-0,595	0,464
Pre21	-0,089	0,018	0,169	-0,469	-0,136
Pre02	-0,097	0,030	0,107	0,209	0,942
Cronbachs Alpha	.835	.710	.534		.177
	ohne Pre16		ohne Pre21		
	.840		.723		

Der Komponente 4 kann nur eine Frage zugeordnet werden, sodass diese keinen Faktor darstellt. Die Komponente 5 weist ein „inakzeptables“ Cronbachs Alpha auf und stellt damit auch keinen Faktor dar. Die Komponente 3, ohne Pre21, und die Komponente 2 haben ein Cronbachs Alpha von über .7 auf, was einen

⁶⁹ Die Fragen 22-223 werden aus der Zuteilung herausgenommen, da diese nicht dem Fragenformat der übrigen geschlossenen Fragen entsprechen.

„akzeptablen“ Wert darstellt. Am stärksten ist die interne Konsistenz für die Komponente 1 ohne Pre16 und ist mit einem Cronbachs Alpha von .835 „hoch“.

Tabelle 28 - Komponenten der Faktorenanalyse des Posttests. Die farbliche Kodierung erfolgt anhand der Farbeinteilung der Faktoren des Pretests in Tabelle 27.

	Komponente				
	1	2	3	4	5
Post20	0,764	0,030	-0,020	0,169	0,019
Post17	0,755	-0,192	0,056	-0,220	0,080
Post19	0,722	0,054	0,324	-0,025	-0,158
Post21	0,688	0,210	0,063	0,257	0,016
Post13	-0,038	0,790	0,166	-0,038	0,175
Post11	-0,065	0,780	0,173	-0,018	0,054
Post03	0,203	0,602	-0,048	0,263	-0,002
Post16	0,198	0,033	0,764	0,132	-0,150
Post15	0,161	0,374	0,732	-0,123	0,048
Post14	-0,128	0,055	0,594	0,146	0,573
Post02	-0,017	-0,077	0,117	0,853	-0,023
Post01	0,150	0,188	-0,032	0,775	0,028
Post18	0,112	-0,012	-0,080	-0,182	0,791
Post12	-0,074	0,213	-0,016	0,136	0,747
Cronbachs Alpha	.689	.606	.505	.601	.423

Da die Komponenten 3 und 5 des Posttests im Pretest zu einem Faktor zusammengefasst, wurde ebenfalls das Cronbachs Alpha für diese beiden Komponenten zusammen berechnet. Der berechnete Wert liegt bei .531 und liegt damit höher als der Wert der jeweiligen einzelnen Komponenten 3 und 5, allerdings weiterhin im niedrigen Bereich (> .5). Cronbachs Alpha liegt für die Komponenten 1, 2 und 4. im fragwürdigen (> .6) Bereich.

8.3. Qualitative Inhaltsanalyse der offenen Fragen nach MAYRING

Um eine strukturierte Auswertung der offenen Fragen vorzunehmen, wird als Analyseverfahren die „Qualitative Inhaltsanalyse“ nach MAYRING [244] gewählt. Der allgemeine Ablauf der qualitativen Inhaltsanalyse einer induktiven Kategorienbildung lautet dabei wie folgt:

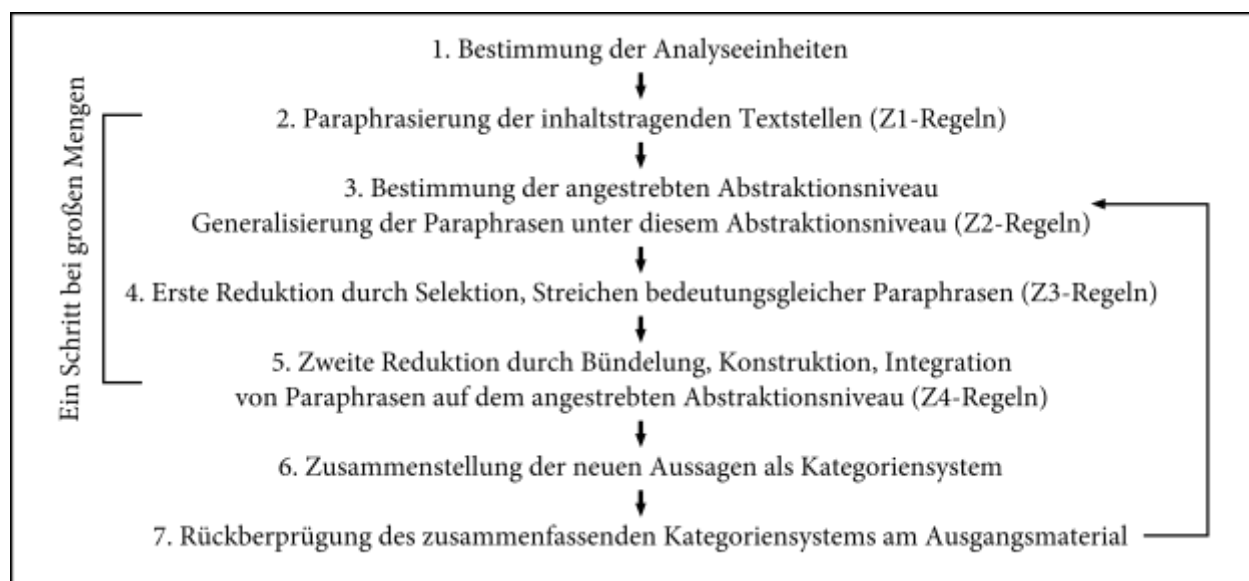


Abbildung 44 - Ablaufmodell zusammenfassender Inhaltsanalyse nach MAYRING [244 S. 70].

Diese Methode reduziert in sieben Schritten das Ausgangsmaterial (die Analyseeinheit), sodass über Paraphrasierung, Generalisierung und Reduktion letztendlich ein Kategoriensystem entwickelt werden kann. Dieses abstrahiert das Ausgangsmaterial im hohen Maße und lässt letztendlich eine quantitative Analyse der auftretenden Kategorien zu. Ziel dabei ist die Entwicklung bzw. Überprüfung eines Kategoriensystems, was demnach sowohl induktiv als auch deduktiv erfolgen kann. Die Wahl zwischen diesen beiden Wegen hängt davon ab, ob aus theoretischen Vorüberlegungen bereits Kategorien entwickelt werden können oder ob der Ausgangspunkt beim Forschungsinteresse liegt. [251] Die angegebenen Z-Regeln geben dabei konkrete Handlungsanweisungen, mithilfe derer die Analyseeinheiten untersucht werden können.⁷⁰

⁷⁰ Diese Z-Regeln lauten für „Z1: Paraphrasierung“ bspw.: „Z1.1: Streiche alle nicht (oder wenig) inhaltstragenden Textbestandteile wie ausschmückende, wiederholende, verdeutlichende Wendungen! Z1.2: Übersetze die inhaltstragenden Textstellen auf eine einheitliche Sprachebene! Z1.3: Transformiere sie auf eine grammatikalische Kurzform.“ [244] S. 72 Alle weiteren Z-Regeln können ebenfalls bei MAYRING [244] S. 72 nachgelesen werden.

Da die drei offenen Fragen 04-06 im Pre- und Posttest bzw. die Fragen 06 und 08 im Follow-Up-Test der Überprüfung der Hypothese 1: „Die Schüler verknüpfen mit dem Begriff Nachhaltigkeit vorrangig ökologische Aspekte“ (siehe Kapitel 7.1.1) dienen, folgt, dass in diesem Fall die drei zu untersuchenden Kategorien vorgegeben sind: Ökologie, Ökonomie und Soziales. Innerhalb dieser Kategorien werden allerdings durch die vierte Stufe der Reduktion Subkategorien gebildet, die sich aus den Erhebungsdaten in einer induktiven Vorgehensweise ergeben. Aufgrund des höchst explorativen Charakters der Erhebung wird zudem die Option offengelassen, Kategorien außerhalb des Nachhaltigkeitskonstruktes zu ermitteln. Damit müssten gegebenenfalls weitere Kategorien zu den drei vorgegebenen hinzugefügt werden.

Dem Ablaufplan unter Abbildung 44 folgend, ergibt sich für die Frage 04: „Erkläre einem Freund stickpunktartig, was du unter Nachhaltigkeit verstehst. Nachhaltigkeit ist ...“ beispielhaft folgende Vorgehensweise für die Bildung der Subkategorien (dem Reduktionsschritt entsprechend) sowie die Zuordnung zu den Kategorien:

Tabelle 29 - Exemplarischer Ablauf für die Vorgehensweise zur qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING.

Nr.	Analyseeinheit/ Erhebungsdaten	Paraphrase	Generalisierung	Reduktion/ Subkategorie	Kategorie
6	keine unnötige Verschwendung von Ressourcen. Überflüssige Umweltverschmutzung zu vermeiden.	Keine Ressourcenverschwendung, keine Umweltverschmutzung	Ressourcen sparen Umweltbewusstsein	Rohstoffe Umweltschutz	Ökologie Ökologie
49	etwas von etwas nehmen, sodass in Hinblick auf den Restbestand noch genügend für die Zukunft erhalten bleibt (z.B. Tiere, die sich vermehren) → nicht etw. im Überfluss nehmen/ Rücksicht auf Umwelt	Nur so viel von etwas nehmen, dass ausreichend für die Zukunft vorhanden bleibt. Nicht im Überfluss konsumieren. Rücksicht auf die Umwelt nehmen.	Ressourcen für die Zukunft sparen Ressourcen für die Zukunft sparen Sparsamer Konsum Umweltbewusstsein	Zukunft Rohstoffe Sparsamkeit Umweltschutz	Soziales Ökologie Soziales Ökologie
59	etwas vorausdenklich lange zu erhalten	Etwas lange erhalten	Produktqualität	Produktion	Ökonomie
234	Umweltbewusst handeln	Umweltbewusst handeln	Umweltbewusstsein	Umweltschutz	Ökologie

Wie zu erkennen ist (siehe Tabelle 29), werden die doppelt auftretenden Subkategorien gestrichen, um eine übersichtlichere Unterscheidung zwischen bereits vorhandenen und neuen Subkategorien zu erhalten. Ebenfalls ist dem Beispiel zu entnehmen, dass einer Analyseeinheit gegebenenfalls mehr als eine Subkategorie zugeordnet werden können. In einigen Fällen wurden auch gar keine Angaben gemacht. Damit entspricht die Anzahl der Aussagen nicht automatisch der Anzahl der Schüler.

Da Frage 05 und 06 sehr ähnlich sind, werden diese in der Auswertung gemeinsam betrachtet. Es ergibt sich für die Fragen 04 sowie 05 und 06 zusammen für den Pre- und Posttest und den entsprechenden Fragen im Follow-Up-Test folgendes Antwortverhalten:

Tabelle 30 - Antwortverhalten für die Frage 04 sowie Frage 05/06 im Pre- und Posttest.

	Pre04	Post04	FU06	Pre0506	Post0506	FU08
Anzahl	446	491	283	512	330	235
Antworten						
Keine Antwort	67	43	64	90	75	87
Verweis auf	-	27	-	-	46	-
Pretest						
Nennung Nano	-	6	-	-	49	7

Im Posttest wird in einigen Fällen bei der jeweiligen Frage ein Verweis zum Pretest angeführt. Dieser Verweis wird im Posttest als eigene Kategorie gewertet. Die Angaben des Pretests fließen dementsprechend nicht automatisch in die Angaben des Posttests ein. Im Pretest und Follow-Up-Test werden zu den zwei Fragen keine Bezüge zur Nanotechnologie genannt, im Posttest ist es bei der Frage 04 insgesamt sechsmal der Fall, bei Frage 05 und 06 insgesamt fünfzigmal.

Es ergeben sich für die Frage 04 folgende Subkategorien, die den drei Dimensionen folgendermaßen zugeordnet wurden (siehe Tabelle 31):

Tabelle 31 - Subkategorien der drei Dimensionen, Beispiele aus den Erhebungsdaten sowie die Anzahl der Nennungen für die Frage 04 im Pre- und Posttest (Pre/Post) sowie der Frage 06 im Follow-Up-Test (FU). Die mit einem *-markierten Subkategorien sind im Posttest neu hinzugekommen.

Subkategorie	Beispiele aus den Erhebungsdaten	Anzahl Pre	Anzahl Post	Anzahl FU
Ökologie				
Ökologisch	wenn man ökologisch lebt; ökologische Nachhaltigkeit	9	68	27
Umweltschutz	Nachhaltigkeit ist umweltschonend; wenn es der Umwelt nicht schadet	103	65	60
Energie	Erneuerbare Energien einsetzen; nicht auf fossile Energien setzen	17	5	6
Rohstoffe	Es werden nur Ressourcen verwendet, die genug vorhanden sind; nachwachsende Rohstoffe	49	39	17
Müll	nicht so viel Müll verursachen; wenn man etwas recycelt	35	15	18
	insgesamt	213	192	128
Ökonomie				
Ökonomisch	wenn man ökonomische Aspekte beachtet; ökonomisches Handeln	12	73	27
Produktion	Produkte umweltbewusst und arbeitertgerecht produzieren; Produkte, die sich gut halten	47	30	22
Konsum	Wiederverwendbare Materialien; Vielleicht mal Produkte aus der Region kaufen	52	7	8
Arbeitsplätze*	Wahrung, Schaffung von Arbeitsplätzen; wenn z.B. Arbeitsplätze erhalten werden	-	12	-
	insgesamt	111	122	57
Soziales				
Zukunft	Handlungen, die die Zukunft verändern, vielleicht auch verbessern; wenn man etwas tut und es auch danach noch Auswirkungen hat	62	77	65
Gerechtigkeit	Arbeiter fair behandeln; alle Menschen haben genug	19	18	3
Sparsamkeit	Ressourcen müssen so genutzt werden, dass sie nie ganz "aufgebraucht" sind; keine Verschwendung	41	8	8
Sozial*	soziale Aspekte berücksichtigen; ob man richtig entscheidet mit einem guten Gewissen	-	74	22
	insgesamt	122	177	64

Da die drei Dimensionen Ökologie, Ökonomie und Soziales eng miteinander verknüpft sind und gemeinsam zu einer nachhaltigen Entwicklung beitragen (vgl. Kapitel 3.1), ist eine eindeutige Zuordnung der Subkategorien zu den drei Dimensionen kaum möglich. Die Subkategorie „Konsum“ könnte bspw. in alle drei Dimensionen einsortiert werden. Im Bereich der Ökologie kann der Konsum als eine Schonung von Ressourcen betrachtet werden, im Kontext der Ökonomie wird die wirtschaftliche Seite des Konsums

fokussiert. In die Dimension Soziales eingeordnet, kann dieser als bewusst praktizierter Lebensstil ausgelegt werden. Die Zuordnung im Rahmen dieser Auswertung erfolgt anhand der Zuteilung der „Seiten der Nachhaltigkeit“ nach DE HAAN, welche in Kapitel 3.1 in Tabelle 1 dargestellt ist. Demzufolge zählen die Subkategorien „Produktion“ und „Konsum“ zu der Seite Ökonomie, welche in diesem Fall um die Subkategorien „Ökonomisch“ und „Arbeitsplätze“ ergänzt werden. In Analogie zu der Seite Ökologie können „Ökologische Ressourcen“ mit „Rohstoffe“ gleich gesetzt werden, „Handlungsregeln für den Umgang mit Natur“ mit „Umweltschutz“ und „Müll“. Ergänzt wird dies um die Komponenten „Ökologisch“ und „Energie“. Letzteres wird dem Bereich der Ökologie zugeordnet, da „Energie“ meist in dem Kontext von „Erneuerbaren Energien“ und „Ressourcenschonung“ genannt wird. Die Subkategorie „Gerechtigkeit“ kann mit dem „Gerechtigkeitskonzept“ verglichen werden, „Sparsamkeit“ mit „Suffiziente Lebensformen“. Ergänzt wird die Dimension Soziales um die Subkategorien „Zukunft“ und „Sozial“. Für die Frage 04 ergeben sich im Pre- und Posttest folgende Zusammensetzung für die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit:

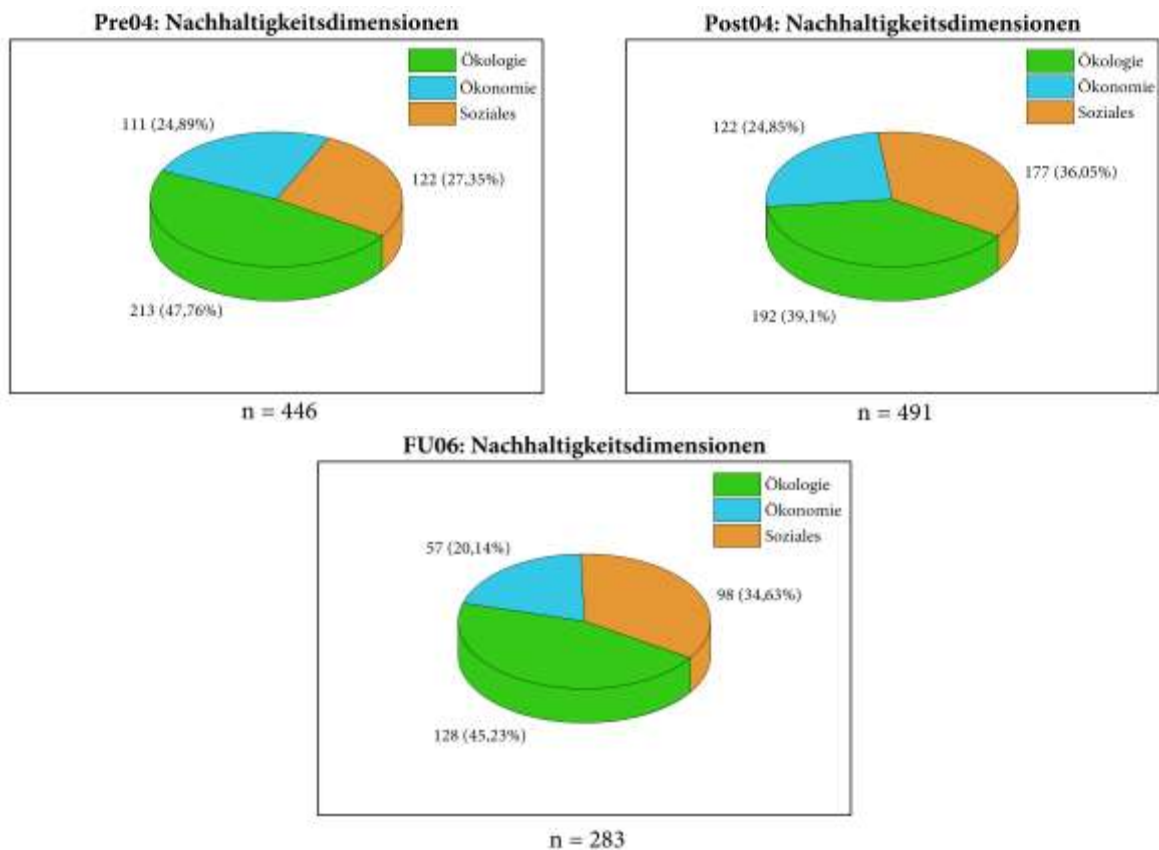


Abbildung 45 – Graphische Darstellung der Zusammensetzung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit für die Frage 04 im Pre- und Posttest bzw. Frage 06 im Follow-Up-Test.

Für die Fragen 05 und 06 ergeben sich zusammen folgende Subkategorien, die analog zu Frage 04 den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zugeordnet werden können.

Tabelle 32 - Subkategorien der drei Dimensionen, Beispiele aus den Erhebungsdaten sowie die Anzahl der Nennungen für die Fragen 05/06 im Pre- und Posttest (Pre/Post) sowie die Frage 08 im Follow-Up-Test (FU). Die mit einem *-markierte Subkategorie ist im Posttest neu hinzugekommen, die mit **-markierte Subkategorie ist nur im Pretest vorhanden.

Subkategorie	Beispiele aus den Erhebungsdaten	Anzahl Pret	Anzahl Post	Anzahl FU
Ökologie				
Umweltschutz	Mehr für die Umwelt tun; Durch das Nutzen von Umweltschonenden Dingen	26	33	15
Energie	Solarplatten installieren; Ich versuche möglichst energiesparend zu leben	22	11	19
Rohstoffe	Ressourcen schonen; Auf Stromverbrauch achten, Wasserverbrauch beachten.	61	22	5
Müll	Weniger Müll verursachen; Mülltrennung, Abfälle richtig entsorgen	90	56	52
Plastik	Stoffbeutel statt Plastiktüten; Plastik versuchen zu vermeiden.	63	28	27
	insgesamt	262	150	118
Ökonomie				
Produktion**	langhaltende Produkte kaufen; Unterstützung von Produkten mit hoher Lebensdauer (keine Billigproduktionen, die schnell zerfallen und viel Müll zurücklassen)	10	-	2
Konsum	versuche regionale/Bioproducte zu kaufen; kein Tropenholz in z.B. Möbeln	88	81	25
Ernährung	Vegetarisch, versuche selber zu kochen; kein Fleisch aus Massentierhaltung	41	19	23
	insgesamt	139	100	50
Soziales				
Engagement	indem man Wissen weitergibt; politische Machthaber unterstützen, die bewusst in Zukunft führen	23	25	4
Sparsamkeit	man nimmt seinen eigenen Becher für Kaffee-to-go; nicht so viel neue Sachen kaufen (sparsam leben)	30	11	33
Transport	Fahrradfahren statt mit dem Auto/Bus; Produkte mit langem Transportweg vermeiden	58	31	28
Gesundheit*	auf die eigene Gesundheit und die "Gesundheit" der Umwelt achten;	-	13	2
	insgesamt	111	80	67

Es ist zu erkennen, dass sich sehr ähnliche Subkategorien zu der Frage 04 ergeben. Im Bereich der Ökologie fehlt die Subkategorie „Ökologisch“, durch die häufige Nennung von „Plastik“ wird diese als eigene Subkategorie zusätzlich aufgenommen. Im Bereich der Ökonomie fallen die Subkategorien „Ökonomisch“ und „Arbeitsplätze“ weg. Für die Kategorie Ökonomie kommt die Subkategorie „Ernährung“ hinzu. Diese wird bei Ökonomie einsortiert, da es sich in diesem Kontext ebenfalls um einen bewussten Konsum handelt und eine Untereinheit hiervon bildet. Da die „Ernährung“ allerdings relativ häufig genannt wurde, erscheint eine eigene Subkategorie sinnvoll. Die Subkategorien der Kategorie „Soziales“ verändern sich zur Frage 04 am stärksten. Lediglich die Subkategorie „Sparsamkeit“ ist in beiden Fällen vorhanden. Diese werden bei den Fragen 05 und 06 um die Subkategorien „Engagement“, „Transport“ und „Gesundheit“ erweitert. Da es sich im Fall der Fragen 05 und 06 um konkrete Anwendungsbeispiele von Nachhaltigkeit handelt, ist es nachvollziehbar, dass sich die abstrakten Konstrukte der Frage 04, „Zukunft“, „Gerechtigkeit“ und „Sozial“ hin zu verstärkt anwendungsbezogenen Subkategorien wandeln. Für die Fragen 05 und 06 ergeben sich im Pre- und Posttest folgende Zusammensetzung für die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit:

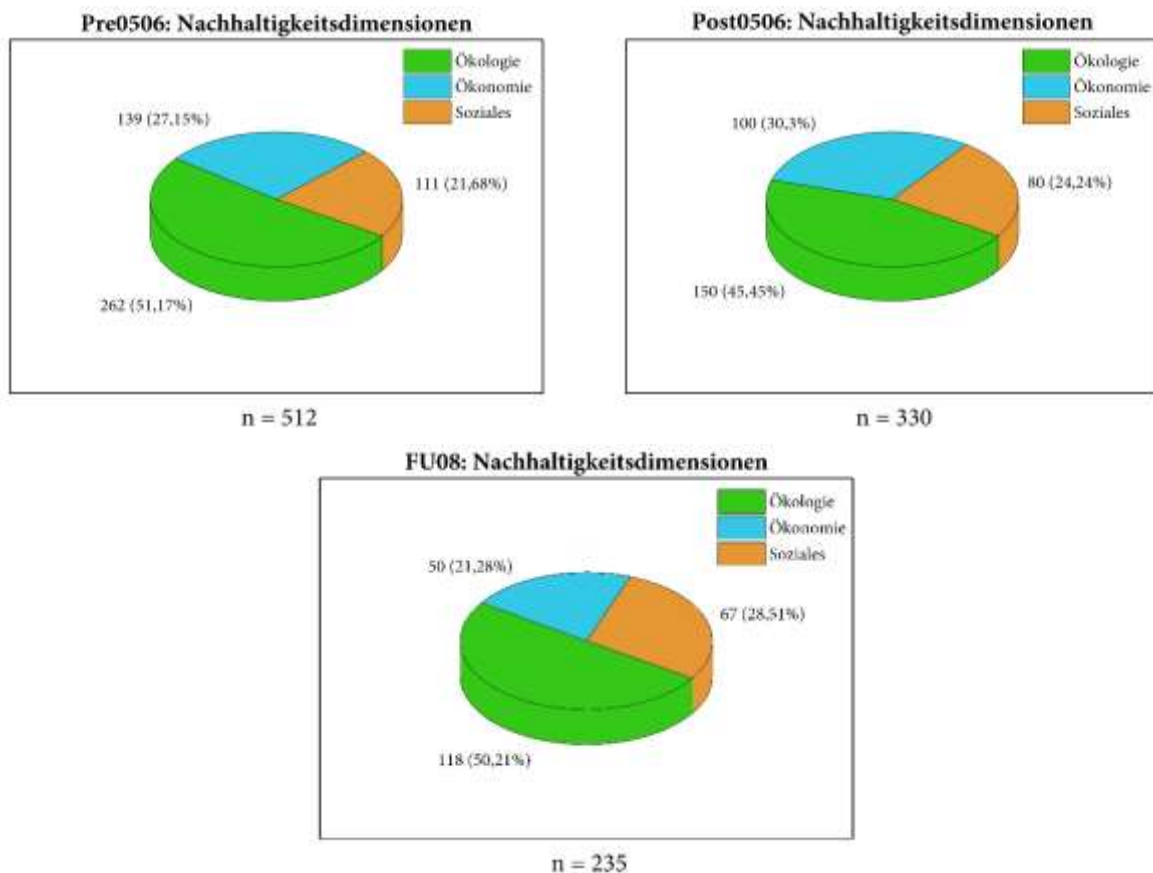


Abbildung 46 - Graphische Darstellung der Zusammensetzung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit für die Fragen 05 und 06 im Pre- und Posttest bzw. der Frage 08 im Follow-Up-Test.

Zur Betrachtung der oben genannten Hypothese, werden die Ergebnisse aus Frage 04-06 des Pre- und Posttests bzw. die Fragen 06 und 08 des Follow-Up-Tests zusammengefasst und gemeinsam betrachtet (Abbildung 47):

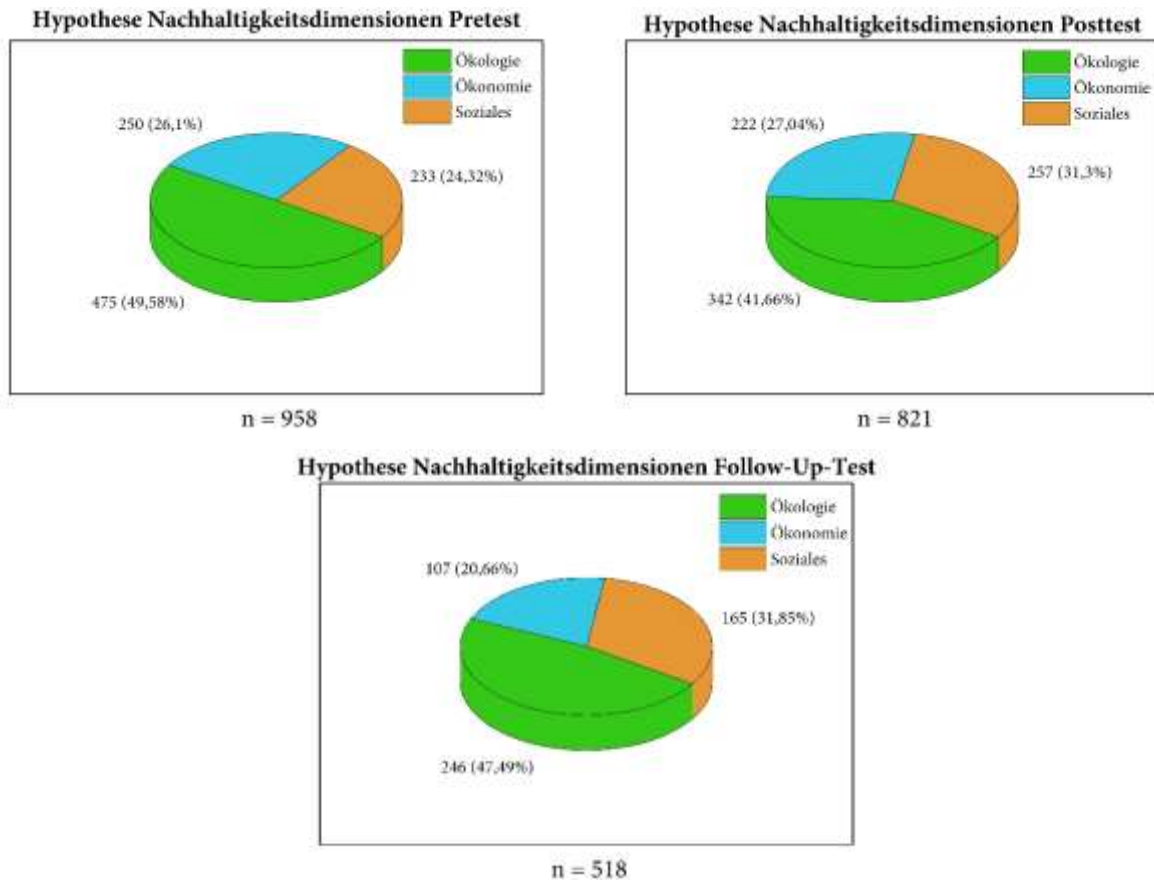


Abbildung 47- Graphische Darstellung der Fragen 04-06 des Pre- und Posttests bzw. der Fragen 06 und 08 des Follow-Up-Tests in Bezug auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit für den Pre- und Posttest.

Allgemein ist zunächst festzuhalten, dass alle gegebenen Antworten auf die Fragen 04-06 im Pre- und Posttest bzw. die Fragen 06 und 08 des Follow-Up-Tests einer Subkategorie und damit einer der drei Kategorien zugeordnet werden können. Lediglich vereinzelte Antworten wurden als „keine Antwort“ gewertet, wenn deren Sinnhaftigkeit nicht erkannt werden konnte (bspw. bei der Angabe, Nachhaltigkeit ist... „wenn etwas nachhaltig ist, also wenn etwas nicht zu 100% gemacht wird“ oder „langsam“).

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass im Pretest etwa 50 % der gegebenen Antworten der ökologischen Dimension zugeordnet werden können, die restliche Hälfte wird zu etwa jeweils 25 % auf die ökonomische und die soziale Dimension aufgeteilt. Im Posttest überwiegt die ökologische Dimension weiterhin mit knapp

42 %, die beiden anderen Dimensionen nehmen dementsprechend etwas zu (Ökonomie etwa 27 %, Soziales etwa 31 %).

8.4. Analyse der Frage 07 des Pre- und Posttests

In der Frage 07 geht es darum zu erfahren, welche Fragen die Schüler in Bezug zur Nachhaltigkeit haben. Sie werden im Pre- und Posttest also dazu aufgefordert, drei Fragen zur Nachhaltigkeit zu benennen. Insgesamt wird die folgende Anzahl an Fragen gestellt:

Tabelle 33 - Anzahl der gestellten Fragen zur Nachhaltigkeit.

	Keine Frage	Genau 1 Frage	Genau 2 Fragen	Genau 3 Fragen	Fragen insgesamt	Durchschnittliche Anzahl an Fragen pro Person
Pretest	138	39	42	54	285	1,04
Posttest	204	19	17	15	98	0,36

Die Fragenanzahl insgesamt hat vom Pre- zum Posttest um knapp 200 Fragen abgenommen. Dabei können die gestellten Fragen vorwiegend fünf Kategorien zugeordnet werden (Beispielfragen aus den Erhebungsdaten):

1. Akteure der Nachhaltigkeit: Wie viele Leute handeln nachhaltig? Was tun die Politik/die Wirtschaft)? Machen alle Länder mit?
2. Konzept der Nachhaltigkeit: Was ist Nachhaltigkeit? Wieso sollte man nachhaltig leben? Welche Vor- und Nachteile gibt es?
3. Handlungsmöglichkeiten: Wie kann ich nachhaltig handeln? Kann man alltägliche Produkte nachhaltiger gestalten? Wie kann man darauf aufmerksam machen?
4. Auswirkungen: Was passiert, wenn wir nichts ändern? Ist das wichtig für die Umwelt/den Klimawandel? Wie beeinflusst es das Leben?
5. Entwicklung: Welche Entwicklung gab es in den letzten Jahren? Welche Projekte sind geplant? Seit wann gibt es den Nachhaltigkeitsgedanken?

Dabei zielen im Pretest die beiden am häufigsten genannten Fragen zum einen auf die Definition von Nachhaltigkeit ab (47 Nennungen) und zum anderen auf konkrete Handlungsmöglichkeiten (53 Nennungen). Im Posttest gab es noch fünf Nachfragen zur Definition und 17 Fragen zu Handlungsoptionen. Letzteres ist damit ebenfalls der bedeutendste Einzelaspekt im Posttest.

Vermutlich dem Kursthema geschuldet, werden im Pretest 18 Fragen dahingehend gestellt, welcher Zusammenhang zwischen Nachhaltigkeit und Nanotechnologie besteht. Im Posttest wird 12-mal die Verbindung zwischen Nachhaltigkeit und Nanotechnologie hergestellt, dieses Mal in vielen Fällen allerdings konkreter (Beispiele: „Gibt es Gesetze, die zum Einsatz von Nanopartikeln Schutz bieten?“, „Wie schädlich sind Nanopartikel für die Umwelt und Gesundheit?“).

8.5. Analyse der halboffenen Fragen des Pre- und Posttest

Wie am Anfang des Kapitels erwähnt, wurde die Frage 09 aus der Auswertung herausgenommen. Die Frage 08 wird separat im folgenden Kapitel betrachtet, sodass an dieser Stelle lediglich die Frage 10 beleuchtet wird. Bei der Frage, ob die Schüler den Kontakt mit Nanomaterialien im Alltag versuchen zu vermeiden oder zu verstärken, ergibt sich folgende quantitative Zusammensetzung (Abbildung 48):

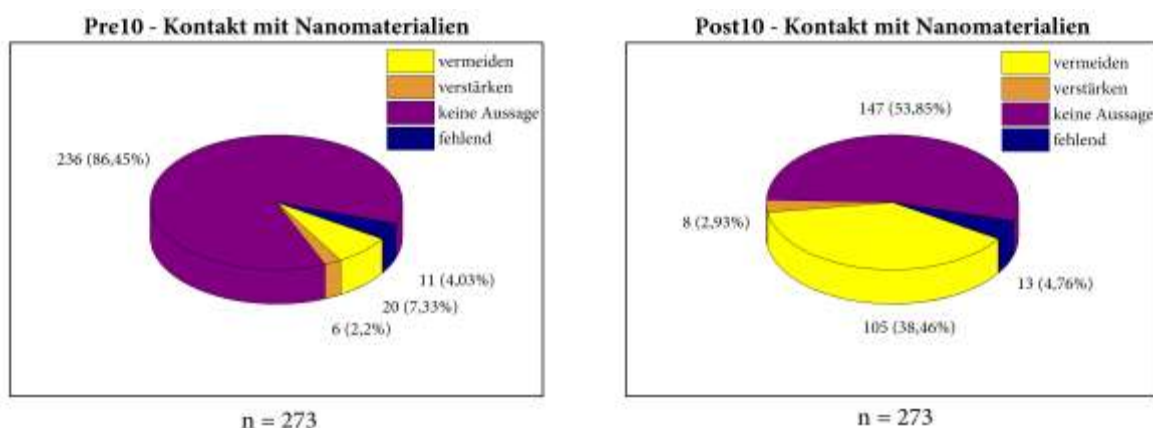


Abbildung 48 - Graphische Darstellung der Ergebnisse zur Frage 10 des Pre- und Posttests.

Die Begründungen für die Auswahl sollten ebenfalls mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING untersucht werden. In einer ersten Analyse zeigte sich allerdings, dass das Material nicht so umfangreich ist, sodass eine siebenschrittige Analyse nicht sinnstiftend erschien. Die Begründungen werden dementsprechend direkt vom Ausgangsmaterial zu Kategorien zusammengefasst. Aufgrund der Vielfalt der Aussagen, werden in Tabelle 34 lediglich die Kategorien aufgeführt, die mindestens fünfmal genannt werden und von Bedeutung sind⁷¹.

⁷¹ Als unbedeutend wird bspw. angesehen, dass lediglich ein Verweis auf die vorherige Frage gemacht wird. Ebenso unbedeutend ist es, wenn keine Angaben gemacht wurden.

Tabelle 34 – Kategorien der Begründungen der Frage 10 im Pre- und Posttest. In Klammern steht die Anzahl der Nennungen.

	vermeiden	verstärken	keine Aussage
Pre	Risiken (17)	Vorteile (5)	Unkenntnis (199) Desinteresse (8)
Post	Risiken (46) Gesundheit (35) Fehlende Studien (14) Umwelt (12)	Vorteile (6)	Desinteresse (38) Unkenntnis (36) Abwägen (22) Unumgänglich (22) fehlende Studien (10) Sensibilisiert (7)

Die Antwortoption „Keine Aussage“ ist sowohl im Pretest (86 %) als auch im Posttest (54 %) die meist angekreuzte Auswahlmöglichkeit. Es kann außerdem festgehalten werden, dass ein Großteil der im Pretest angekreuzten „keine Aussage“-Antworten darauf zurückzuführen ist, dass die Schüler kaum Kenntnisse über Nanomaterialien ausweisen. Die in die Kategorie „Unkenntnis“ fallenden Begründungen (insgesamt 199) wie weil „ich nicht weiß, wo Nanopartikel enthalten sind und ob sie schädlich sind“ oder auch weil „ich noch nie bewusst damit konfrontiert wurde“ belegen dies. Im Posttest reduziert sich die Anzahl der Nennungen, die in diese Kategorie fallen, sehr stark (36). Am häufigsten wird statt der „Unkenntnis“ nun „Desinteresse“ genannt, was in der Regel verkürzt dafür steht, dass bewusst keine Veränderung im Konsumverhalten vorgenommen wird. Beispiele hierfür sind: weil „mir das egal ist“, weil „ich mein Leben weiterführe wie vorher“ oder auch weil „es mich nicht interessiert“ (158). Der Anteil an der Auswahl „verstärken“ ist sowohl im Pre- als auch im Posttest sehr gering (2-3 %).

Die Antwortmöglichkeit, den Kontakt mit Nanomaterialien im Alltag zu „vermeiden“ nimmt von 7 % im Pretest auf 38 % im Posttest zu. Dabei werden im Pretest Argumente angeführt, die (potentielle) Risiken für den Menschen und die Umwelt ins Auge fassen: weil „ich Nanopartikel als (teilweise) gesundheitsschädlich einstufe“ oder weil „ich finde, dass man der Umwelt nicht noch zusätzlich schaden sollte“. Im Posttest nimmt die Anzahl an Aussagen zu möglichen Risiken zu und teilen sich zusätzlich differenzierter in „Gesundheit“ und „Umwelt“ auf. Ergänzt werden diese Kategorien um „Fehlende Studien“.

8.6. Analyse der Sonnencremeempfehlung für Pre-, Post- und Follow-Up-Test

Die Frage 08 des Pre- und Posttests sowie die Frage 05 des Follow-Up-Tests spiegeln in indirekter Weise die Frage des Schülerlabors wider, indem die **halboffene Frage** gestellt wird: „Ein Freund von dir benutzt im Sommer Sonnencreme mit Nanopartikeln. Würdest du ihm die Verwendung empfehlen oder ihm davon **abraten?**“ Im Folgenden wird sowohl das Antwortverhalten quantitativ ausgewertet als auch die Begründungen mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING kategorisiert und anschließend quantifiziert.

8.6.1. Quantitative und qualitative Auswertung der Sonnencremeempfehlung

Es ergibt sich folgende prozentuale Verteilung der angekreuzten Antworten über die drei Messzeitpunkte:

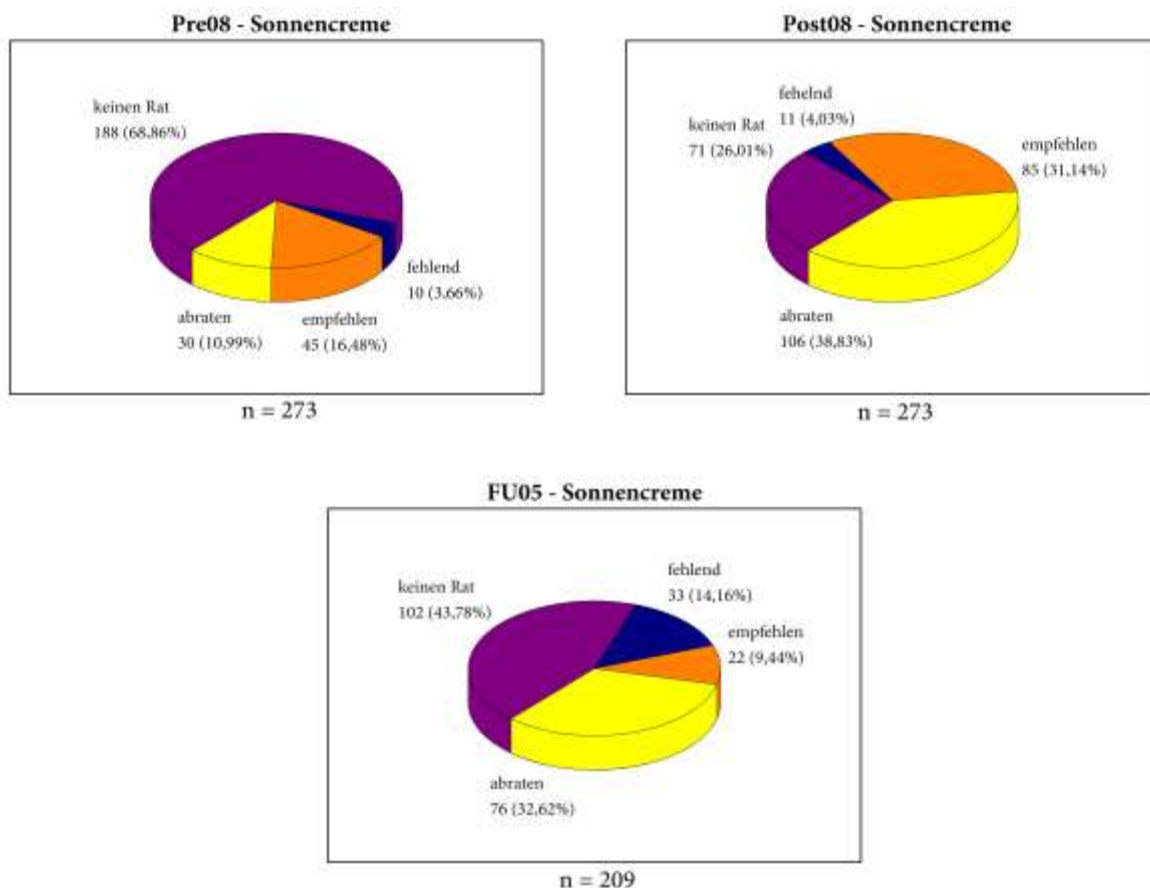


Abbildung 49 - Graphische Darstellung der prozentualen Verteilung des Antwortverhaltens zur Frage 08 des Pre- und Posttests bzw. Frage 05 des Follow-Up-Tests.

Im Pretest geben über zwei Drittel (69 %) an, „keinen Rat“ geben zu können. Das letzte Drittel teilt sich annähernd zur Hälfte in „abratens“ (11 %) und „empfehlen“ (16 %) auf. Im Posttest ergibt sich in etwa eine Drittel-Verteilung für alle drei Antwortmöglichkeiten („keinen Rat“ – 26 %, „abratens“ – 39 %, „empfehlen“ – 31 %), wobei die häufigste Wahl das „Abraten“ ist. Im Follow-Up-Test reduziert sich der Anteil an „empfehlen“ wieder auf knapp 10 %, der Anteil „keine Antwort“ steigt auf 44 % an und „abratens“ nimmt leicht ab (33 %).

Die Begründungen für die gewählte Antwort werden erneut mithilfe der qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING kategorisiert. Aufgrund der Vielfalt der Aussagen werden in Tabelle 35 lediglich die Kategorien aufgeführt, die mindestens fünfmal genannt werden und von Bedeutung sind.⁷²

Tabelle 35 - Kategorien der Begründungen der Frage 08 im Pre- und Posttest bzw. der Frage 05 im Follow-Up-Test. In Klammern steht die Anzahl der Nennungen.

	abratens	empfehlen	keinen Rat
Pre	Umwelt (17) Gesundheit (7)	Hautschutz (29) Vorteile (7)	Unkenntnis (175)
Post	Gesundheit (40) Risiken (25) Umwelt (24) Fehlende Studien (19) Alternativen (12)	Hautschutz (42) Vorteile (29)	Abwägen (23) Eigenverantwortung (19) Fehlende Studien (9) Aufklärung (8) Risiken (5)
FU	Risiken (27) Umwelt (20) Fehlende Studien (18) Gesundheit (17) Alternativen (5)	Vorteile (11) Hautschutz (8)	Eigenverantwortung (36) Unkenntnis (27) Aufklärung (10) Abwägen (7)

Im Pretest ist deutlich zu erkennen, dass der Großteil der gegebenen Antworten auf Unkenntnisse in Bezug Nanotechnologiesowie die Anwendung von Nanopartikeln in Sonnencreme zurückzuführen sind (weil „ich keine Ahnung habe, was diese Partikel bewirken“, weil „ich nicht genau weiß, welche Vorteile und Nachteile die Nanopartikel in der Creme haben“). Die Empfehlung der Sonnencreme wird am häufigsten auf den allgemein wichtigen Punkt des Hautschutzes zurückgeführt (weil „Sonnencreme wichtig ist!“, weil „er keinen Sonnenbrand bekommen soll“). Der Aspekt der „Vorteile“ bezieht sich im Pretest auf einen positiven

⁷² Als unbedeutend wird bspw. angesehen, wenn keine Angabe gemacht wird.

Nutzen von Nanopartikeln (weil „die Nanopartikel zu einem höheren Sonnenschutz beitragen“, weil „Nanopartikel z.B. antibakteriell wirken können“). Das Abraten wird meist mit negativen Auswirkungen für die Umwelt und die Gesundheit verknüpft (weil „Nanopartikel ins Wasser (Grundwasser, Meer etc.) gelangen können und Tiere sie verzehren“, weil „die Nanopartikel (häufig Plastikteilchen) nicht von der Kläranlage ausgefiltert werden können und ins Meer gelangen, wo sie z. B. Strände verunreinigen“).

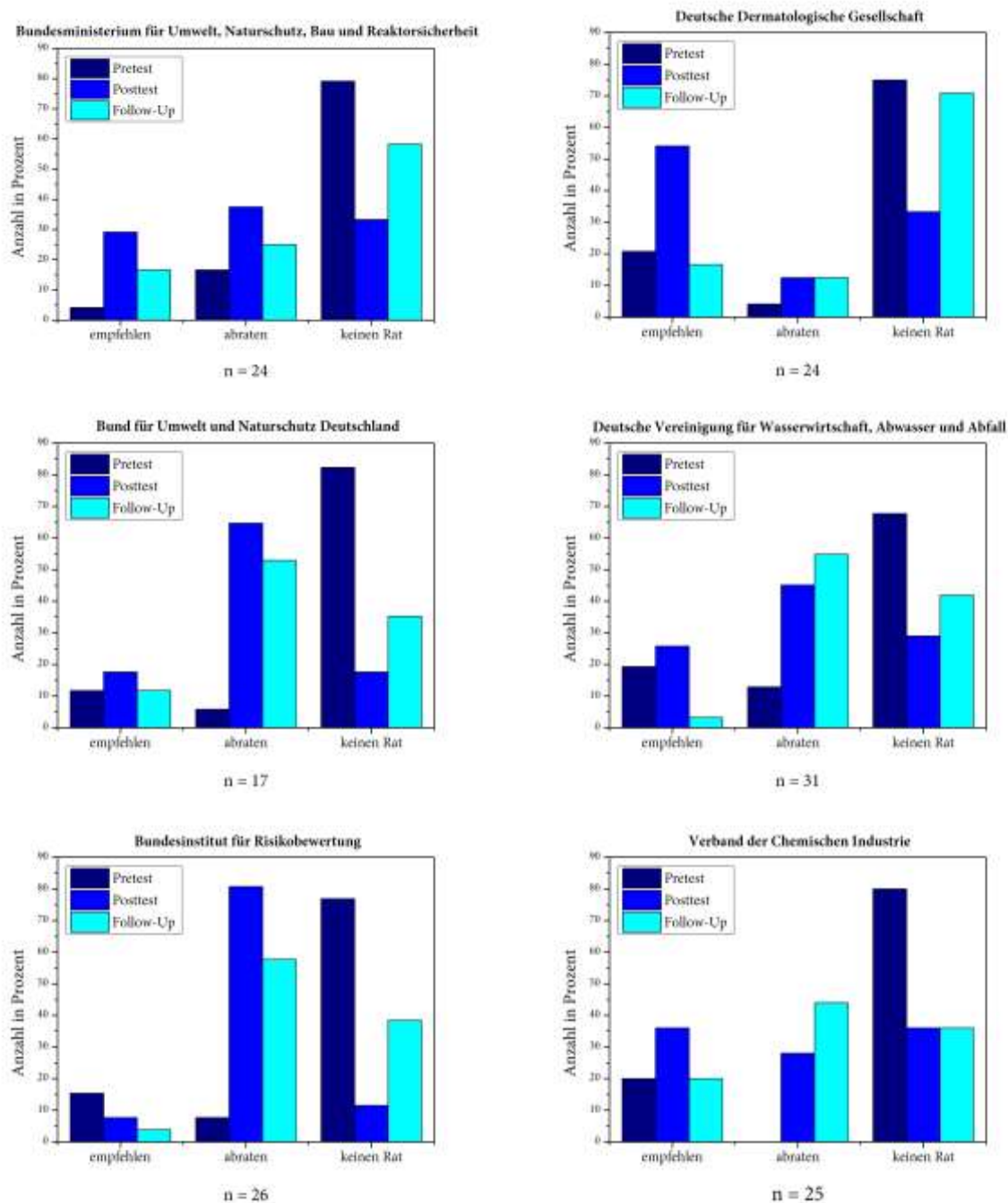
Im Posttest ist die Kategorie „Unkenntnis“ nicht mehr zu finden. Die meist genannten Argumente für „keinen Rat“ gehen in Richtung des Abwägens und der Eigenverantwortung (weil „Nano-Partikel noch nicht genug erforscht sind aber gut gegen UV-Strahlung helfen und NP evtl. schädigend sein können und er daher sich eine eigene Meinung bilden sollte“, weil „es seine Entscheidung ist, es ist nicht bewiesen, dass diese schädlich ist, aber ohne könnte er Hautkrebs bekommen“). Die Kategorien für das „Empfehlen“ bleiben für den Posttest identisch, die Vorteile werden allerdings spezifischer benannt (weil „es so zu sehr viel höheren Lichtschutzfaktoren kommt“, weil „es schnell auf die Haut einzieht und die Sonnenstrahlen abwendet“). Im Bereich des „Abratens“ können die bereits bestehenden Kategorien „Umwelt“ und „Gesundheit“ um „Risiken“ ergänzt werden, die alle drei auf mögliche Gefahren hinweisen. Auch wird darauf verwiesen, dass es bisher keine Studien gibt, die einen risikofreien Einsatz von Nanomaterialien garantieren und dass es „nanofreie“ Alternativen gibt.

Im Follow-Up-Test kommen keine neuen Kategorien hinzu, bei der Begründung für „keinen Rat“ fallen lediglich die Nennungen zu „fehlenden Studien“ sowie zu „Risiken“ weg. Dafür wird an dieser Stelle wieder die „Unkenntnis“ angeführt (weil „ich vergessen hab, was Nanomaterialien sind“, weil „ich mich damit nicht gut auskenne und keine falschen Informationen weitergeben will“).

8.6.2. Sonnencremeempfehlung in Abhängigkeit der Planspielposition

Im Rahmen des Planspiels nehmen die Schüler verschiedene Rollen ein, die sich bezüglich der Verwendung von Titandioxid- und Zinkoxid-Nanopartikeln in Sonnencreme unterschiedlich positionieren. Um zu testen, ob und inwiefern die eingenommene Rolle daher einen Einfluss auf diese Entscheidung hat, wird das Antwortverhalten für den Pre- Post- und Follow-Up-Test in Abhängigkeit der jeweiligen Rolle betrachtet. Um eine Vergleichbarkeit innerhalb einer Gruppe zu gewährleisten, werden an dieser Stelle nur die Personen betrachtet, deren Daten zu allen drei Messzeitpunkten erhoben wurden und gültige Angaben gemacht haben.

Dabei ergeben sich die folgenden Zusammenhänge:



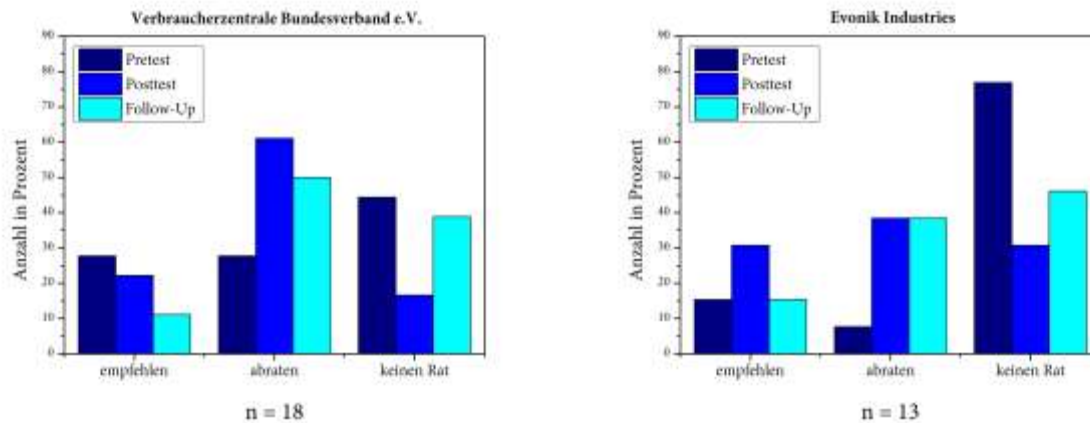


Abbildung 50 - Sonnencremeempfehlung in Abhängigkeit von der eingenommenen Rolle im Planspiel über alle drei Messzeitpunkte.

Es zeigt sich, dass sich die Schüler im Pretest unabhängig von der eingenommenen tendenziell dafür entscheiden, „keinen Rat“ zu geben. Für den Posttest ergibt sich ein differenzierteres Bild: Für die Vertreter der „BMUB“, des „VCI“ sowie „Evonik Industries“ sind die Antworten annähernd gleichverteilt zwischen den drei Antwortmöglichkeiten; der „BUND“, das „BfR“, die „DWA“ sowie die „VB“ entscheiden (deutlich) zum „abraten“ der Verwendung; lediglich die „DDG“ positioniert sich deutlich zu einer Empfehlung der Verwendung von Sonnencreme mit Nanopartikeln. Im Follow-Up-Test weichen diese Tendenzen wieder auf und es erfolgt erneut die verstärkte Auswahl der „keinen Rat“-Antwort.

8.7. Quantitative und qualitative Analyse des Follow-Up-Tests

Da ein Teil der Fragen des Follow-Up-Tests zu denen des Pre- und Posttests verschieden ist, werden diese Ergebnisse des Follow-Up-Tests separat betrachtet. Dabei handelt es sich um die drei geschlossenen Fragen 01-03 (FU01-03) sowie um die halboffenen Fragen 04 (FU4) und 07 (FU7).

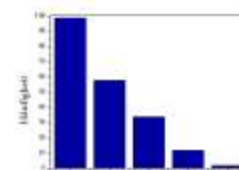
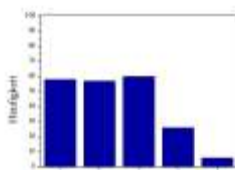
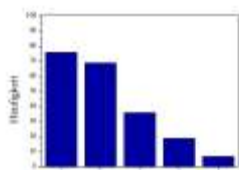
Wie bereits in Kapitel 8.1 beschrieben, beträgt der Stichprobenumfang des Follow-Up-Tests 209 Teilnehmende. Die drei geschlossenen Fragen des Follow-Up-Tests zielen auf die aktive Auseinandersetzung mit dem Thema Nanotechnologie im Alltag nach der Kursteilnahme ab. Frage 02 sollte darüber hinaus erfragen, inwiefern die Teilnehmenden selbst aktiv in der Aufklärung über das Thema Nanotechnologie geworden sind.

Es ergeben sich für diese drei Fragen folgende Häufigkeitsverteilungen:

Tabelle 36 – Häufigkeitsverteilungen der Fragen FU01, FU02, FU03 sowie deren graphische Darstellung.

		FU01		FU02		FU03	
	Kodierung	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent
Gültig	1	76	36,4	58	27,8	99	47,4
	2	69	33,0	57	27,3	58	27,8
	3	36	17,2	60	28,7	34	16,3
	4	19	9,09	26	12,4	12	5,7
	5	7	3,3	6	2,9	2	1
	Gesamt	207	99,0	207	99,0	205	98,1
Fehlend	6	2	1	1	0,5	3	1,4
	fehlend	0	0,0	1	0,5	1	0,5
Gesamt		209	100,0	209	100,0	209	100,0

Graphische Darstellung (Skizzen)



Für die drei geschlossenen Fragen des Follow-Up-Tests wird im Schnitt nur in 0,96 % der Fälle „weiß ich nicht“ angekreuzt, der Durchschnitt der fehlenden Angaben beträgt 0,32 %.

Tabelle 37 - Modus, Median und Mittelwerte für FU01-FU03.

	FU01	FU02	FU03
n	207	207	205
Modus	1	3	1
Median	2,00	2,00	2,00
Mittelwert	2,13	2,37	1,89
Standardabweichung	1,159	1,130	1,087

Die beiden halboffenen Fragen 04 und 07 des Follow-Up-Tests zielen ebenfalls auf Veränderungen seit dem Kurs ab. Dabei geht es in Frage 04 um das Konsumverhalten von Produkten mit Nanomaterialien und in Frage 07 generell um ein nachhaltigeres Verhalten.

Für die Frage 04 und 07 des Follow-Up Test ergeben sich folgende Häufigkeitsverteilungen:

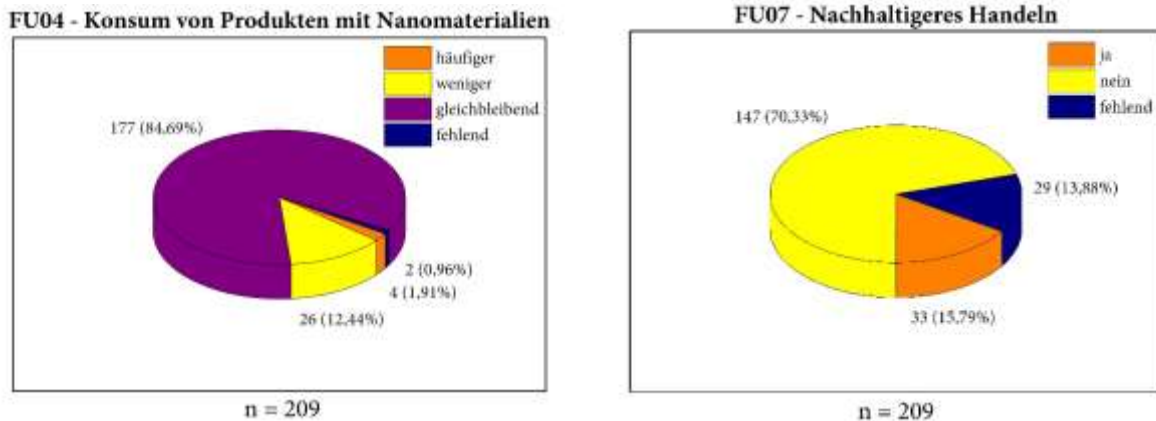


Abbildung 51 - Graphische Darstellung der Ergebnisse zur Frage 04 und 07 des Follow-Up-Tests.

Aufgrund des geringen Anteils an „häufiger“ Antworten ist es nicht möglich, die Begründungen hierfür zu kategorisieren und zu quantifizieren. Für die Antwortmöglichkeit „weniger“ ergibt sich als häufigste Begründung (zehn Nennungen) für den verminderten Konsum mögliche Risiken, die mit deren Anwendung verbunden sein könnten. Knapp 60 % (105 Nennungen) der Begründungen für einen gleichbleibenden Konsum sind mit Desinteresse verbunden („ich achte beim Kauf nicht drauf“, „Ich mache mir da nicht so Gedanken darüber“). Etwa 24 % (42 Mal der Fall) geben keine Begründung und 8 % der Argumente beziehen sich auf den (bereits vorherigen) geringen Konsum („ich denke, ich benutze sowieso nicht viele Produkte mit Nanopartikeln“).

Für die FU07 lassen sich mehrere Kategorien sowohl für die Antwort „ja“ als auch für die Antwort „nein“ bilden. Wieder werden nur die Kategorien angegeben, die mindestens fünfmal genannt werden.

Tabelle 38 - Kategorien von FU07.

FU07	
ja	nein
Umweltschutz (11)	Bereits vorher nachhaltig (50)
Zukunft (7)	Desinteresse (39)
Wichtigkeit (6)	Gleichbleibend (20)
Achtsamkeit (5)	Unkenntnis (18)

Als Hauptargumente für ein nachhaltigeres Handeln nach dem Kurs werden der „Umweltschutz“, die „Zukunft“ sowie die „Wichtigkeit“ einer nachhaltigen Entwicklung generell genannt (weil „ich es einfach wichtig finde, dass die Umwelt noch weiterhin schön bleibt und das man auch noch in mehreren 100 Jahren

rausgehen kann“, weil „mir bewusst geworden ist, wie wichtig Nachhaltigkeit im alltäglichen Leben ist“). Unter der Kategorie „Achtsamkeit“ wird definiert, dass die Schüler nach dem Kurs für dieses Thema sensibilisiert sind und aufmerksamer konsumieren (weil „ich nun weiß, was Nachhaltigkeit bedeutet und deshalb über meinen Konsum nachdenke“).

Für die Auswahl „nein“ wird am häufigsten angegeben, dass bereits vor dem Kurs nachhaltig gehandelt wurde und sich dementsprechend gleichbleibend verhalten wird (weil „ich schon vorher darauf geachtet habe, nachhaltig zu handeln“, weil „ich auch so darauf achte die Umwelt nicht zu verschmutzen oder zu schädigen“). Auch „gleichbleibend“ wird als einzelne Kategorie aufgeführt, da im Vergleich zur Kategorie „bereits vorher nachhaltig“ das nachhaltige Handeln nicht explizit erwähnt wird (weil „ich mich wie vorher verhalte“, weil „ich glaube, dass ich mich in dem Punkt nicht verändert hab“). Ein weiterer Punkt ist das „Desinteresse“, welches sowohl Bequemlichkeit (weil „mein Leben so bequem ist, wie ich es momentan habe“), tatsächliches Desinteresse (weil „es mich nicht interessiert“) oder auch fehlende Achtsamkeit (weil „ich nicht darauf achte“) umfasst. Als letzte Begründung wird fehlendes Wissen, kurz „Unkenntnis“ angeführt.

9. Hypothesenüberprüfung und Hypothesenbildung

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Interpretation der präsentierten Ergebnisse hinsichtlich der in Kapitel 7.1 formulierten Hypothesen. Anschließend werden aus dem Erhebungsmaterial weitere Hypothesen gebildet.

9.1. Hypothese 1: Die Schüler verknüpfen mit dem Begriff Nachhaltigkeit vorrangig ökologische Aspekte

Die wichtigsten Daten für die Überprüfung dieser Hypothese stellt die Auswertung der Fragen 04-06 im Pre- und Posttest bzw. die Fragen 06 und 08 im Follow-Up-Test dar (vgl. Kapitel 8.3). Diese zeigt, dass sowohl im Pre-, Post- als auch im Follow-Up-Test die ökologische Dimension am stärksten vertreten ist (Pretest 49,6 %, Posttest 41,7 % und Follow-Up-Test 47,5 %). Die Anteile der ökonomischen und sozialen Dimension schwanken dabei über alle drei Messzeitpunkte nur leicht (ökonomisch: 26,1 %, 27,0 %, 20,7 %, sozial: 24,3 %, 31,3 %, 31,9 %).

Mögliche Fehlerquellen in der Auswertung der genannten Begründungen können bspw. in der Bildung der Subkategorien und Zuordnung zu den drei Kategorien liegen. Letzteres erfolgte nach der Tabelle 1, also der Einteilung der Seiten der Nachhaltigkeit nach DE HAAN. **Nach dieser wurde die Subkategorie „Sparsamkeit“** bspw. in die soziale Dimension einsortiert. Sie könnte theoretisch jedoch durch die dadurch erlangte **Ressourceneinsparung unter die Kategorie „Ökologie“** fallen und damit den ökologischen Anteil vergrößern. Ähnliches könnte für andere Subkategorien argumentiert werden, sodass sich eine Verschiebung der drei Dimensionsanteile ergeben würde.

Eine weitere Fehlerquelle könnte in der Überinterpretation des Ausgangsmaterials liegen. So wurde bspw. **die Definition der Nachhaltigkeit als „ein umweltbewusstes Handeln, um unsere Zukunft zu einer besseren zu machen“** sowohl der Subkategorie „Umweltschutz“ (Ökologie) als auch der Subkategorie „Zukunft“ (Soziales) zugeordnet. Für diese Art der Zuteilung wurde sich allerdings bewusst entschieden, da aus den Erhebungsdaten heraus nicht interpretiert werden konnte und sollte, ob der betreffende Schüler seinen Schwerpunkt auf den „Umweltschutz“ oder die „Zukunft“ legt. Ähnliches könnte für andere Daten und Subkategorien präsentiert werden.

Soll die Hypothese beibehalten werden, könnte mit der angeführten Überinterpretation auch dahingehend argumentiert werden, dass die Schüler, wie im genannten Beispiel, sich zwar bewusst für den „Umweltschutz“ und damit für die Kategorie „Ökologie“ entscheiden, die Auswahl für die Kategorie „Soziales“ durch das Anführen der „Zukunft“ jedoch unbewusst erfolgte. Diese Argumentation wäre allerdings nur für den Pretest angebracht, da während des Kurses die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit eingehend thematisiert wurden. Um solch eine Hypothese zu überprüfen könnten bspw. verschiedene Aspekte der Nachhaltigkeit (aus allen drei Dimensionen) angeführt werden und die Schüler sollen entscheiden, ob die jeweilige Aussage ihrer Meinung nach Teil eines Nachhaltigkeitskonzepts darstellt oder nicht.

Auch wenn der ökologische Anteil über alle drei Messzeitpunkte am größten ist, kann die Hypothese 1 mit den gefundenen Ergebnissen nicht belegt werden. Die Hypothese 1 wird damit aufgrund der relativ hohen Anteile der Nennungen der ökonomischen und sozialen Dimension verworfen.

9.2. Hypothese 2: Ohne Wissen zur Nachhaltigkeit erfolgt keine Handlungsbefähigung

Die Erhöhung der durchschnittlichen Antwortrate und die deutliche Verringerung des Anteils der „weiß ich nicht“-Antworten der geschlossenen Fragen im Pre- und Posttest (vgl. Kapitel 8.2.1) zeigt, dass die Schüler sich nach dem Schülerlabor verstärkt dazu befähigt fühlen, sich zu positionieren. Dies bestätigt die Befunde von RIEß, wonach es den Schülern schwer fällt sich zu positionieren, wenn Fach- sowie Handlungswissen zu dem abgefragten (BNE-)Thema fehlen. [46] Augenscheinlich hat der Kurs diesem entgegengewirkt, was sich positiv in Bezug auf die Antwortrate ausübt. Auch die Betrachtung der vier verschiedenen Fälle im Antwortverhalten zeigt, dass keine bedeutenden gegenläufigen Effekte vorliegen.

Für den Follow-Up-Test ist die Antwortrate der geschlossenen Fragen ebenfalls sehr hoch (vgl. Kapitel 8.7). Dies ist vermutlich allerdings zum einen darauf zurückzuführen, dass die Anzahl der geschlossenen Fragen lediglich drei anstatt 15 im Pre- und Posttest umfasst und zum anderen lediglich Verhaltensfragen gestellt werden.

Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass die Anzahl der gestellten Fragen zum Thema Nachhaltigkeit vom Pre- zum Posttest deutlich reduziert ist (von 285 Fragen im Pretest zu 98 Fragen im Posttest, vgl. Kapitel 8.4). Allein 47 Fragen fallen im Pretest unter die Kategorie der Nachfragen zur Definition und

53 Nennungen erfragten Handlungsoptionen. Beides ist im Posttest stark reduziert (fünf Fragen zur Definition, 17 Fragen zu Handlungsoptionen). Eine Interpretation dieser Befunde könnte daher sein, dass ein Großteil der Fragen, vor allem zur Definition und zu Handlungsoptionen, zufriedenstellend während des Kurses thematisiert wurde.

Ein weiterer Aspekt, der in die Überprüfung der Hypothese 2 mit einfließt, sind die Frage 01 und 02 des Pre- und Posttests⁷³, die den selbsteingeschätzten Wissenszuwachs betrachten. Für beide Fragen ist die Mittelwertsveränderung (in beiden Fällen eine Erhöhung) höchst signifikant und weist einen starken Effekt auf (vgl. Tabelle 24). Das heißt, dass die Schüler ihr Wissen im Bereich der Nanotechnologie nach dem Kurs höchst signifikant höher einschätzen und dieser Effekt auf die Intervention, also den Kurs, zurückzuführen ist. Die Tabelle 26 zeigt darüber hinaus, dass diese beide Fragen im Pre- und im Posttest in Korrelation zueinander stehen. In der Faktorenanalyse werden sie für den Posttest sogar als eine Komponente beschrieben (vgl. Tabelle 28), welche als Faktor „Selbsteingeschätztes Fachwissen“ zusammengefasst werden kann. Das bedeutet, dass das Wissen über den Einsatz von Nanomaterialien in Alltagsprodukten und das Wissen über deren Verwendungszweck stark voneinander abhängen.

In diesem Wissenskontext kann ebenso die Frage 08 des Pre- und Posttests bzw. die Frage 05 des Follow-Up-Tests betrachtet werden, in der die Empfehlung von Sonnencreme mit Nanomaterialien thematisiert wird. Dabei gaben 188 (bzw. 69 % der teilnehmenden) Schüler an, keinen Rat geben zu können (vgl. Abbildung 49) und führten dies in 175 Fällen auf die eigene „Unkenntnis“ zu dieser Thematik zurück (vgl. Tabelle 35). Der Anteil der „keinen Rat“-Gebenden reduziert sich im Posttest auf 26 % und beträgt im Follow-Up-Test 44 %. Im Posttest taucht die Kategorie „Unkenntnis“ in diesem Zusammenhang jedoch gar nicht mehr auf, im Follow-Up-Test wird diese 27-mal angeführt. Diese fehlende bzw. verminderte Anführung von „Unkenntnis“ lässt ebenfalls darauf schließen, dass sich Fachwissen erhöht hat.

Eine ähnliche Reduktion der Kategorie „Unkenntnis“ ist bei Frage 10 des Pre- und Posttests zu finden, in der es um den Kontakt mit Nanomaterialien geht. Im Pretest geben 86 % (236 Schüler) an, keine Aussage darüber treffen zu können, ob sie den Kontakt mit Nanomaterialien im Alltag versuchen zu vermeiden oder zu verstärken (vgl. Abbildung 48). Dies wird mit 199 Nennungen auf „Unkenntnis“ zurückgeführt

⁷³ Frage 01: „Ich weiß in welchen Alltagsprodukten Nanomaterialien verarbeitet werden.“ Frage 02: „Ich weiß weshalb Nanomaterialien in Alltagsprodukten verarbeitet werden.“

(vgl. Tabelle 34). Zwar ist der Anteil an „keine Aussage“ Antworten im Posttest immer noch relativ hoch (54 %), es wird dabei allerdings nur noch in 36-mal das Argument der „Unkenntnis“ angeführt (stärkstes Argument ist das „Desinteresse“ mit 38 Nennungen).

Dass im Follow-Up-Test generell die „Unkenntnis“ oder auch das „Desinteresse“ (erneut gegenüber dem Posttest) zunehmen, kann unter anderem durch Befunde in Bezug auf die Wirksamkeit von Schülerlaboren belegt werden. So formuliert GUDERIAN bspw. als Ergebnis einer Studie die Hypothese, dass ein

„[e]in- oder mehrmalige Besuche eines außerschulischen Lernortes ohne Einbindung in den Unterricht [...] nur kurzfristige Steigerungen der emotionalen, wertbezogenen und epistemischen Komponente des aktuellen Interesses von Schülern aller Jahrgangsstufen an den Inhalten der Lerneinheiten hervor[rufen].“ [252, S. 130]

Werden demnach eine nachhaltige Entwicklung und Nanotechnologie im Unterricht nicht weiterführend thematisiert, wird das Interesse über die Zeit hinweg zurückgehen. Dies belegen die gefundenen Ergebnisse.

Aufgrund der angeführten Auswertungsbeispiele kann dennoch gezeigt werden, dass zum einen das fachliche Wissen der Schüler (vor allem im Posttest) zugenommen hat und zum anderen es ihnen dadurch vielfach ermöglicht wird, sich bezüglich einer Fragestellung zu positionieren. Damit wird die Hypothese 2 angenommen.

9.3. Hypothese 3: Die Schüler sehen die Verantwortung einer nachhaltigen Entwicklung nicht bei sich selbst

Zur Überprüfung der Hypothese 3 wird die Frage 22 bzw. werden die Paare 15-18 des Pre- und Posttests betrachtet. Den Mittelwerten des Pre- und Posttests zufolge kann folgende Rangfolge für die Pflicht zum verantwortlichen Umgang mit Nanomaterialien wie folgt festgehalten werden (in Klammern wird er Mittelwert angegeben, Pre/Post): 1. Wissenschaft (4.23/4.56), 2. Industrie (4.18/4.36), 3. Selbst (3.84/4.18), 4. Politik (3.76/4.15) (vgl. Tabelle 21). Es ist zu erkennen, dass die Rangfolge identisch bleibt, es ändert sich lediglich der Grad der Zustimmung (für alle erhöht). Für „selbst“, die „Politik“ und die „Wissenschaft“ sind die Mittelwertsänderungen höchst signifikant und weisen eine kleine Effektstärke auf. Das Ergebnis für die „Industrie“ wird als signifikant angegeben, weist allerdings keinen Effekt auf (vgl. Tabelle 24).

Für die Mittelwerte des PostNeu ergibt sich eine abweichende Rangfolge: 1. Selbst (4.43), 2. Wissenschaft (3.83), 3. Politik (3.81), 4. Industrie (3.77) (vgl. Tabelle 21). Die Schüler, die diese Fragen im Pretest mit „weiß ich nicht“ beantwortet hatten, sehen damit sich selbst im Posttest als die Hauptverantwortlichen unter der gegebenen Auswahl.

Die Fragen 11 und 13 des Pre- und Posttests zielen indirekt ebenfalls auf die Hypothese 3 ab⁷⁴, da hohe Zustimmungswerte zu diesen Fragen dahingehend ausgelegt werden können, dass das eigene Handeln als bedeutsam und einflussnehmend wahrgenommen wird. Dies widerspricht damit einer negativen Kontrollüberzeugung. Die Mittelwerte dieser Fragen liegen für beide Messzeitpunkte zwischen 3.13-4.03 (vgl. Tabelle 21), wobei die Erhöhung der Mittelwerte vom Pre- zum Posttest höchst signifikant ist, mit einer kleinen Effektstärke (vgl. Tabelle 24). Die Mittelwerte liegen damit im Bereich zwischen „teil-teils“ und „trifft eher zu“, sodass diese beiden Aussagen tendenziell als eher bedeutsam einsortiert werden.

Die angeführten Auswertungsauszüge können die Hypothese 3 nicht eindeutig belegen. Gerade dadurch, dass bei der Rangfolge der Frage 22 für den Fall 2 das „selbst“ an die erste Stelle gesetzt wird, deutet dies zumindest für den Fall 2 auf keine vorrangige externe Verantwortungsattribution hin. Da die Rangfolge für den Fall 1 das „selbst“ allerdings nur an die dritte Stelle setzt und das lediglich sehr knapp vor der „Politik“ steht, kann die Hypothese nicht vollständig abgelehnt werden.

9.4. Hypothesenbildung

Neben der dargestellten Überprüfung der drei Hypothesen, sollen aus dem Untersuchungsmaterial heraus weitere Hypothesen geleitet werden. Diese werden, entsprechend dem Thema des Kurses sowie der vorliegenden Dissertation, ebenfalls die Themen „Nanotechnologie“ und „Nachhaltigkeit“ in den Fokus legen.

Zunächst werden die Fragen betrachtet, die nach Kapitel 8.2.1 eine „extrem starke Veränderung“ aufweisen, die Antwortrate also „extrem stark“ zugenommen hat. Dies ist für die Frage 12, 17, 18, 19, 20 sowie 21 der Fall. Die Effektstärke für die Frage 18 liegt bei 0,04, sodass die Mittelwertänderung in diesem Fall nicht auf den Kurs zurückgeführt werden kann und damit an dieser Stelle nicht weiter betrachtet wird. Die fünf

⁷⁴ Frage 11: „Ich möchte mitbestimmen, ob Nanomaterialien in Alltagsprodukten verwendet werden.“ Frage 13: „Mir ist es wichtig mein soziales Umfeld über mögliche Risiken, die von Nanomaterialien ausgehen, aufzuklären.“

übrigen Fragen weisen kleine (12, 17, 21) bis mittlere (19, 20) Effekte der Mittelwertveränderungen auf und sind signifikant (12, 17) bzw. höchst signifikant (19-20). Im Pre- und Posttest wird die Frage 12 jeweils verschiedenen Fragen zugeordnet und die Mittelwertänderung weist einen kleinen Effekt auf. Aus den Ergebnissen zur Frage 12 lassen sich demnach keine eindeutigen Aussagen ableiten.

9.4.1. Hypothese 4: Die Schüler nehmen die Nanotechnologie als einen positiven Faktor für die Nachhaltigkeitsförderung wahr.

Die Faktorenanalyse im Posttest ergibt, dass die Fragen 17 sowie 19-21 eine Komponente bilden (Cronbachs Alpha .689).⁷⁵ Diese vier Fragen zielen auf den positiven Einfluss der Nanotechnologie auf die Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft, also die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit, ab.⁷⁶ Diese Komponente kann daher als „Nanotechnologie als Nachhaltigkeitsförderer“ zusammengefasst werden. Der Zusammenhang dieser Fragen und die signifikante Zunahme der Mittelwerte (zwischen 3.46 - 4.17 im Posttest) zeigen, dass der Kurs dazu beigetragen hat, dass die Schüler die Nanotechnologie als eine bedeutende, positive Innovation für die Zukunft wahrnehmen. Daraus lässt sich die Hypothese 4 ableiten.

9.4.2. Hypothese 5: Wenn den Schülern bekannt ist, in welchen Produkten Nanomaterialien verwendet werden, ist auch bekannt, warum dies der Fall ist und umgekehrt.

Wie in Kapitel 9.2 dargestellt, nimmt das subjektiv wahrgenommene Fachwissen zur Nanotechnologie vom Pre- zum Posttest sehr stark zu. Im Posttest bilden diese beiden Fragen eine Komponente ab und können als „Selbsteingeschätztes Fachwissen“ zusammengefasst werden. Dadurch, dass die Fragen 01 und 02 sowohl im Pre- als auch im Posttest korrelieren, kann daraus die Hypothese 5 abgeleitet werden.

9.4.3. Hypothese 6: Den Schülern ist es wichtig, dass sie über den Einsatz von Nanotechnologie in Alltagsprodukten aufgeklärt werden und diese Informationen an Dritte weitergeben.

Der Faktorenanalyse weiterführend folgend, werden die Fragen 03, 11 und 13 zu einer Komponente zusammengefasst. Diese drei Fragen sind von dem Wunsch geprägt, eine stärkere Transparenz in der Verwendung von Nanomaterialien in Alltagsprodukten zu schaffen sowie aktiv zu dieser Transparenz

⁷⁵ Im Pretest werden nur die Fragen 19-21 zu einer Komponente zusammengefasst, deren Cronbachs Alpha jedoch bei .534 liegt.

⁷⁶ Frage 17: „Mit Hilfe der Nanotechnologie können knappe natürliche Ressourcen eingespart werden. Wir sind dadurch auf sie angewiesen.“ Frage 19: „Durch Nanotechnologie wird der Wohlstand unseres Landes gesichert.“ Frage 20: „Durch die Forschung der Nanotechnologie bleibt Deutschland wirtschaftlich wettbewerbsfähig.“ Frage 21: „Durch Nanotechnologie werden viele neue Arbeitsplätze geschaffen.“

beizutragen.⁷⁷ Da die Korrelationen in Tabelle 25 zeigen, dass die Frage 11 ebenfalls mit der Frage 15 korreliert und diese darüber hinaus einen weiteren „Transparenzfaktor“ darstellt⁷⁸, wird Cronbachs Alpha für die Fragen 03, 11, 13 und 15 berechnet. Dieser ergibt für den Pretest einen Wert von .724 und für den Posttest einen Wert von .644, welche damit höher liegen als für die Fragen 03, 11 und 13 allein. Die Komponente aus diesen vier Fragen kann daher **zusammengefasst als „Transparenz und Partizipation“** beschrieben werden. Die Mittelwerte für die vier Fragen liegen im Pretest zwischen 3.14 – 3.98 und im Posttest zwischen 3.71 – 4.75. Damit sind die Mittelwerte im Pretest bereits hoch, nehmen im Posttest weiter zu. Das bedeutet, dass die Verwendung neuer Technologien in Alltagsprodukten, wie die Nanotechnologien, stets mit einer Kennzeichnung für den Verbraucher einhergehen sollte. Dies befähigt zudem dazu, dass über deren Einsatz informiert und gegebenenfalls mitbestimmt werden kann, woraus sich Hypothese 6 ableiten lässt.

9.4.4. Hypothese 7: Die Schüler bringen das Konzept Nachhaltigkeit nicht mit Nanotechnologie in Verbindung.

Diese Hypothese ergibt sich vor allem aus den Antworten der Frage 04-06 des Pre- und Posttests bzw. die Frage 06 und 08 des Follow-Up-Tests. In diesen Fragen werden das Verständnis des Begriffs sowie Beispiele **des Handels in Bezug zur „Nachhaltigkeit“** abgefragt. Dabei ist festzuhalten, dass im Pretest kein einziges Mal das Thema „Nanotechnologie“ mit „Nachhaltigkeit“ in Verbindung gebracht wird (vergleiche Kapitel 8.3). Im Posttest sind in Bezug zur „Nanotechnologie“ bei Frage 04 insgesamt sechs Nennungen (entspricht 1,22 % aller Nennungen) zu finden, bei Frage 06 im Follow-Up-Test sind ebenfalls keine vorhanden. Mit einer Definition von Nachhaltigkeit wird die Nanotechnologie also über alle drei Tests hinweg nicht bzw. kaum (1,22 % im Posttest) in Verbindung gebracht.

9.4.5. Hypothese 8: Die Empfehlung der Anwendung von Sonnencreme mit Nanopartikeln hängt nach dem Kurs von der eingenommenen Position im Planspiel ab.

In Kapitel 8.6.2 wurde die Empfehlung der Anwendung von Sonnencreme mit der Planspielposition gekreuzt und die Ergebnisse für jede Rolle separat aufgetragen (Abbildung 50). Den Balkendiagrammen ist

⁷⁷ Frage 03: „Medien sollten mehr über den Einsatz von Nanomaterialien informieren.“ Frage 11: „Ich möchte mitbestimmen, ob Nanomaterialien in Alltagsprodukten verwendet werden.“ Frage 13: „Mir ist wichtig mein soziales Umfeld über mögliche Risiken, die von Nanomaterialien ausgehen, aufzuklären.“

⁷⁸ Frage 15: „Ich finde Produkte mit Nanomaterialien müssen eine Kennzeichnungspflicht haben.“

zu entnehmen, dass in für alle Position der Anteil an „keinen Rat“ im Pretest der jeweils höchste ist. Für den weiteren Verlauf im Post- und Follow-Up-Test lassen sich allerdings unterschiedliche Muster für die Positionierung erkennen. Bei den Rollen des „BUND“, der „DWA“, „BfR“ sowie der „Verbraucherzentrale Bundesverband“ ist im Posttest überwiegt der Anteil des „Abraten“ deutlich gegenüber des „Empfehlen“ und des „keinen Rat“. Bis auf die Rolle des „BfR“ (neutral), sind die genannten Positionen negativ bezüglich der Kursfrage eingestellt. Lediglich die „DDG“ weist im Posttest einen deutlich hohen Anteil an „Empfehlen“ auf, obwohl neben dieser Rolle ebenfalls der „VCI“ sowie „Evonik Industries“ bezüglich der Kursfrage positiv eingestellt sind. Die beiden letztgenannten sowie das „BMUB“ (neutral) weisen in etwa eine gleichmäßige Verteilung der Antworten für „Empfehlen“, „Abraten“ und „keinen Rat“ auf. Im Follow-Up-Test relativieren sich die Verteilung erneut. Für das „BMUB“ (neutral), die „DDG“ (positiv), sowie für „Evonik Industries“ (positiv) überwiegt „keinen Rat“, für den „BUND“ (negativ), „DWA“ (negativ), „BfR“ (neutral), „VCI“ (positiv) sowie für die „Verbraucherzentrale Bundesverband“ (negativ) ist die Antwort „Abraten“ (weiterhin) die Hauptantwort, auch wenn die Effekte deutlich abflachen.

Es kann hiermit zum einen deutlich gezeigt werden, dass die Rolle im Planspiel die Positionierung in Bezug auf die Sonnencremeempfehlung beeinflussen. Zum anderen ist zu erkennen, dass die negativen besetzen Rollen augenscheinlich einen stärkeren Einfluss auf die Positionierung vornehmen als die positiven. Dies ist daran zu erkennen, dass alle negativen Rollen sowohl im Post- als auch im Follow-Up-Test sich am häufigsten für die Kategorie „Abraten“ entscheiden. Die positiven und neutralen Rollen weisen kein in dieser Form eindeutiges Verhalten auf. Das „BfR“ (neutral) sortiert sich sowohl im Pre- als auch im Posttest am häufigsten zum „Abraten“ ein, was bedeuten könnte, dass die Rolle möglicherweise nicht als so „neutral“ von den Schülern wahrgenommen wurde, wie es vorgesehen war. Das „BMUB“ (neutral) tendiert sowohl im Pre- als auch im Follow-Up-Test stark zu „keinen Rat“ und weist im Posttest eine annähernde Gleichverteilung für alle drei Auswahlmöglichkeiten auf. Die drei positiven Rollen zeigen kein eindeutiges Bild, was die Aussage festigt, dass zwar die negativen Rollen zu einer negativen Entscheidung beitragen, dies umgekehrt allerdings nicht für die positiven Rollen gilt.

10. Abschlussbetrachtungen

Die Menschheit steht in der heutigen Zeit vor einer Vielzahl an Herausforderungen. Die wachsende Weltbevölkerung, die Weitung der Schere zwischen Arm und Reich, Klimaveränderung oder Umweltschutz – es gibt kaum einen Bereich des menschlichen Lebens, der nicht nach einer nachhaltigen Entwicklung verlangt, um das Leben auf der Erde für alle zu erhalten bzw. zu verbessern. Die Umsetzung der SDGs der UN bis zum Jahr 2030 kann hierzu einen bedeutenden Beitrag leisten. Dass die Verbreitung und Verbesserung von Bildungsangeboten hierfür essentiell ist, erscheint wenig überraschend und unterstreicht die Bedeutung und Notwendigkeit einer chancengerechten Bildung für eine nachhaltige Entwicklung (Kapitel 3)

In dem Rahmen einer nachhaltigen Entwicklung ist die Förderung von Innovationen wie bspw. alternativen Energiequellen sowie effektiven Filtersystemen für Wasser- und Luftverschmutzungen von großer Bedeutung. Die Etablierung der Anwendungen aus dem Bereich der Nanotechnologie kann dabei in allen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit zu einer Verbesserung beisteuern. Dabei ist es allerdings unabdingbar, dass neue Technologien zum einen hinsichtlich ihrer Sicherheit in der Verwendung getestet werden und zum anderen Einzug in den schulischen Unterricht finden. Die Vermittlung des zugrundeliegenden theoretischen Wissens sowie das (experimentelle) Erarbeiten von Eigenschaften stellt sicher, dass Schüler verstärkt dazu befähigt werden, möglicherweise selbst in diesem Bereich (beruflich) tätig zu werden. (Kapitel 4)

Für die praktische, experimentelle Umsetzung einer Verknüpfung der Nanotechnologie mit der BNE im Chemieunterricht bieten Versuche zu Aerogelen, zur photokatalytischen Wasserstoffbildung an nanoporösen Oberflächen, zum Einfluss von Nanopartikeln auf Modellorganismen oder zur Herstellung von Polymermembranen ein hohes Potenzial. Eingebettet in aktuelle Kontexte aus dem Alltag der Schüler unterstreicht die Bedeutung der Nanotechnologie für zukünftige Entwicklungen. (Kapitel 5)

Wie dies in einem Schülerlabor beispielhaft kontextualisiert und umgesetzt werden kann, zeigt der entwickelte Schülerlaborkurs zum Projekt der NanoBiNE. Neben der Vermittlung von fachlichem Wissen aus dem Bereich der Nanotechnologie strebt der Kurs die Förderung der Teilkompetenzen der Gestaltungskompetenz nach DE HAAN an. (Kapitel 6)

Um sowohl Hypothesen der Umweltbildung in Bezug zur Nanotechnologie und Nachhaltigkeit zu überprüfen als auch aus den Erfahrungen dem Schülerlaborkurs der NanoBiNE Hypothesen abzuleiten, wurde im Rahmen des Kurses eine Schülerbefragung durchgeführt. Dabei deuten die überprüften sowie die gebildeten Hypothesen darauf hin, dass das Thema Nanotechnologie generell geeignet ist, um Kompetenzen einer BNE zu fördern. Die Ergebnisse des Follow-Up-Tests zeigen allerdings ein ernüchternderes Bild. Der Transfererfolg ist anhand der Ergebnisse nur bedingt zu verzeichnen. Dies deutet darauf hin, dass eine einmalige Intervention, wie der Besuch des Schülerlabors, augenscheinlich nicht ausreicht, um dauerhaft einen Einstellungswandel zu verursachen. Umso wichtiger erscheint die flächendeckende und tiefe Verankerung von BNE-Prinzipien im schulischen Kontext auf allen Ebenen – vom Unterricht bis hin zur Schulorganisation. Neuerungen sollten so lange wiederholt werden bis sie als Routinen in das alltägliche Leben übernommen werden. Dazu ist es von äußerst hoher Bedeutung, dass sich die Schüler ist Handlungsoptionen bewusst sind und Verantwortung für ihr Handeln übernehmen. (Kapitel 7 - 9)

Nichtsdestotrotz kann die vorliegende Arbeit nachweislich hilfreiche Ansätze dafür liefern, wie der Chemieunterricht hinsichtlich einer nachhaltigen Entwicklung mithilfe der Nanotechnologie gestaltet werden kann. Die erfolgreiche Umsetzung und Etablierung liegt in diesem Kontext vor allem in den Händen engagierter Lehrkräfte.

11. Literaturverzeichnis

- [1] B. Ki-moon, 'We Are the First Generation that Can End Poverty, the Last that Can End Climate Change', *Secretary-General Stresses at University Ceremony | Meetings Coverage and Press Releases*, <https://www.un.org/press/en/2015/sgsm16800.doc.htm> 2015.
- [2] P. Wallemacq, R. House, *Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017* 2018.
- [3] Credit Suisse Group AG, *Global Wealth Report 2017* 2017.
- [4] International Monetary Fund, *Wachstum des weltweiten realen Bruttoinlandsprodukts (BIP) von 2008 bis 2018 (gegenüber dem Vorjahr)*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197039/umfrage/veraenderung-des-weltweiten-bruttoinlandsprodukts/> 2018.
- [5] The United Nations, *Agenda 21: Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, Rio de Janeiro*, http://www.un.org/depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf 1992.
- [6] A. Patil, V. Mishra, S. Thakur, B. Riyaz, A. Kaur, R. Khursheed, K. Patil, B. Sathe, *CNANO* 2018, 15 (2), 137 – 146. DOI: 10.2174/1573413714666180426112851.
- [7] A. Laha, D. Biswas, Basak S., in *Advanced Research in Nanosciences for Water Technology*, Nanotechnology in the life sciences (Eds: R. Prasad, T. Karchiyappan), Springer. Cham 2019.
- [8] G. Brundtland, M. Khalid, S. Agnelli, S. Al-Athel, B. Chidzero, L. Fadika, V. Hauff, I. Lang, M. Shijun, M. Morino de Botero, Singh, Magendra, Okita, Saburo, *Report of the World Commission on Environment and Development "Our Common Future"* 1987.
- [9] I. Pufé, *Nachhaltigkeitsmanagement*, Pocket-Power, Vol. 063, Hanser, München 2012.
- [10] A. K. Manderson, *Environ Dev Sustain* 2006, 8 (1), 85 – 97. DOI: 10.1007/s10668-005-2787-6.
- [11] NASA, *Our Sun: In Depth*, <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/in-depth/> 2019.
- [12] WWF Deutschland, *Plastikmüll in den Weltmeeren*, <https://mobil.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Information-Unsere-Ozeane-versinken-im-Plastikmuell.pdf> 2017.
- [13] S. Frautschi, *Science (New York, N.Y.)* 1982, 217 (4560), 593 – 599. DOI: 10.1126/science.217.4560.593.
- [14] M. v. Hauff, *Nachhaltige Entwicklung: Grundlagen und Umsetzung*, 2nd ed., De Gruyter Oldenbourg, München, Germany 2014.
- [15] G. de Haan, *Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik* 2002, 25 (1), 13 – 20.
- [16] D. W. Pearce, G. D. Atkinson, *Ecological Economics* 1993, 8 (2), 103 – 108. DOI: 10.1016/0921-8009(93)90039-9.
- [17] M. Cabeza Gutiérrez, *Ecological Economics* 1996, 17 (3), 147 – 156. DOI: 10.1016/S0921-8009(96)80003-6.
- [18] R. Döring, *Wie stark ist schwache, wie schwach starke Nachhaltigkeit?*, https://www.econstor.eu/bitstream/10419/22095/1/08_2004.pdf 2004.
- [19] R. Döring, K. Ott, *Zeitschrift für Wirtschafts- und Unternehmensethik* 2001, 2 (3), 315 – 342.

- [20] H. G. Nutzinger, V. Radke, in *Nachhaltige Wirtschaftsweise und Energieversorgung: Konzepte, Bedingungen, Ansatzpunkte*, Ökologie und Wirtschaftsforschung, Vol. 15 (Eds: H. G. Nutzinger), Metropolis-Verl. Marburg 1995.
- [21] Vereinte Nationen, *Die Allgemeine Erklärung der Menschenrechte: Resolution 217 A (III) vom 10.12.1948*, <http://web.archive.org/web/20071031123756/http://www.unhchr.ch/udhr/lang/ger.pdf> 1948.
- [22] M. AdomBent, I. Bormann, S. Burandt, R. Fischbach, G. Michelsen, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Beiträge der Bildungsforschung*, Vol. 39 2012.
- [23] S. Dörner, B. Fuest, N. Trentmann, *Seltene Erden: Diese Rohstoffe stecken in Smartphones*, <https://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article151650363/Nach-diesem-Handyrohstoff-buddeln-Kinder-metertief.html> 2016.
- [24] A. Grunwald, *Technikfolgenabschätzung: Eine Einführung*, 2nd ed., Gesellschaft, Technik, Umwelt Neue Folge, Vol. 1, edition sigma, Berlin 2010.
- [25] A. Grunwald, *Technikfolgenabschätzung und Bioethik*, <http://www.bpb.de/ajax/183654?type=pdf> 2012.
- [26] Bund-Länder-Kommission, *Bildung für eine nachhaltige Entwicklung ("21"): Abschlussbericht des Programmträgers zum BLK-Programm*, Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, Vol. 123, BLK, Bonn 2004.
- [27] K. Trempler, J. Schellenbach-Zell, C. Gräsel, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Beiträge der Bildungsforschung*, Vol. 39 2012.
- [28] G. de Haan, *Programm Transfer-21 Bildung für eine nachhaltige Entwicklung: Abschlussbericht des Programmträgers* 2008.
- [29] Deutsche UNESCO-Kommission e.V., *UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung" 2005-2014: Nationaler Aktionsplan für Deutschland* 2011.
- [30] Arbeitsstelle beim Vorsitzenden des Nationalkomitees der UN-Weltdekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung" (2005-2014), *Datenbank der UN-Dekade 'Bildung für nachhaltige Entwicklung'*, <http://www.dekade.org/datenbank/index.php>.
- [31] Deutsche UNESCO-Kommission e.V. (Hg.), *Vom Projekt zur Struktur: Projekte, Maßnahmen und Kommunen der UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung"*, 2nd ed., Nachhaltigkeit lernen, Deutsche Unesco-Kommission e.V, Bonn 2014.
- [32] G. Michelsen, H. Rode, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Beiträge der Bildungsforschung*, Vol. 39 2012.
- [33] Vereinte Nationen, *Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 1. September 2015: 69/315. Entwurf des Ergebnisdokuments des Gipfeltreffens der Vereinten Nationen zur Verabschiedung der Post-2015-Entwicklungsagenda* 2016 (gilt nur für Deutsch).
- [34] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, *Ziele für eine nachhaltige Entwicklung weltweit: AGENDA 2030*, <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Nachhaltigkeit/0-Buehne/2016-10-24-agenda-2030-ueberblick.html> 2018.

- [35] K. Willis, *Theories and practices of development*, Routledge perspectives on development, Vol. 6, Routledge, London, New York, N.Y. 2005.
- [36] The United Nations, *Quality Education: Why It Matters*, https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/02/ENGLISH_Why_it_Matters_Goal_4_QualityEducation.pdf 2018.
- [37] D. S. Rychen, in *Kompetenzen der Bildung für nachhaltige Entwicklung: Operationalisierung, Messung, Rahmenbedingungen, Befunde* (Eds: I. Bormann), VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. Wiesbaden 2008.
- [38] G. de Haan, G. Kamp, A. Lerch, L. Martignon, G. Müller-Christ, H. G. Nutzinger, F. Wütscher, *Nachhaltigkeit und Gerechtigkeit: Grundlagen und schulpraktische Konsequenzen*, 1st ed., Ethics of Science and Technology Assessment, Vol. 33, Springer Berlin, Berlin 2008.
- [39] 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.
- [40] M. Barth, *Gestaltungskompetenz durch Neue Medien?: Die Rolle des Lernens mit Neuen Medien in der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung*, Umweltkommunikation, Vol. 4, BMV - Berliner Wissenschaftsverl., Berlin 2007.
- [41] KMK & Unesco, *Empfehlung KMK und DUK Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) in der Schule*, http://nachhaltigkeit.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/nachhaltigkeit.bildung-rp.de/Downloads/070615_KMK-DUK-Empfehlung_BNE.pdf 2007.
- [42] Programm Transfer -21, *Qualitätsentwicklung "BNE-Schulen": Qualitätsfelder, Leitsätze, Kriterien*, Berlin, http://www.transfer-21.de/daten/materialien/Orientierungshilfe/Orientierungshilfe_Qualitaetskriterien.pdf 2007.
- [43] Deutsche Komitee für UNICEF e.V., *Weltwassertag am 22. März: Jeder Tropfen zählt!: Täglich sterben mehr als 700 Kinder an verunreinigtem Wasser / Gardena und UNICEF starten Partnerschaft für sauberes Wasser und Hygiene*, Köln, <https://www.unicef.de/informieren/aktuelles/presse/2018/weltwassertag-am-22--maerz--jeder-tropfen-zaehlt-/161934> 2018.
- [44] Programm Transfer -21, *Bildung für nachhaltige Entwicklung: Hintergründe, Legitimation und (neue) Kompetenzen*, <https://netzwerk-n.org/wp-content/uploads/2017/07/de-Haan-2009-Bildung-fu%CC%88r-nachhaltige-Entwicklung.pdf> 2008.
- [45] S. Hamann, *Schülervorstellungen zur Landwirtschaft im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*, *Dissertation*, Pädagogische Hochschule Ludwigsburg 2004.
- [46] W. Rieß, *Bildung für nachhaltige Entwicklung: Theoretische Analysen und empirische Studien*, Internationale Hochschulschriften, Vol. 542, Waxmann, Münster [u.a.] 2010.
- [47] V. Turusov, V. Rakitsky, L. Tomatis, *Environmental Health Perspectives* 2002, 110 (2), 125 – 128. DOI: 10.1289/ehp.02110125.
- [48] M. P. Maloney, M. P. Ward, *American Psychologist* 1973, 28 (7), 583 – 586. DOI: 10.1037/h0034936.

- [49] R. Kyburz-Graber, *Kompetenzen für die Zukunft: Nachhaltige Entwicklung konkret*, Hep, Bern 2006.
- [50] G. Michelsen, H. Rode, M. Wendler, A. Bittner, *Außerschulische Bildung für nachhaltige Entwicklung: Methoden, Praxis, Perspektiven*, DBU-Umweltkommunikation, Vol. 1, oekom, München 2013.
- [51] Kuckartz, *Umweltbewußtsein und Umweltverhalten*, Springer Berlin Heidelberg 1998.
- [52] C. Gräsel, in *Handbuch Bildungsforschung* (Eds: R. Tippelt, B. Schmidt-Hertha), Springer Fachmedien Wiesbaden. Wiesbaden 2017.
- [53] A. Diekmann, P. Preisendörfer, *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie* 1992, 44 (2), 226 – 251.
- [54] Deutscher Bundestag, *"Abwrackprämie" in der Bundesrepublik Deutschland: Kurzinformation*, <https://www.bundestag.de/blob/561134/4376c6bc0fc0b4286ecb7323cce04912/wd-5-069-18-pdf-data.pdf> 2018.
- [55] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Gutachter: Abwrackprämie nutzte der Umwelt - BMU-Pressemitteilung*, <https://www.bmu.de/pressemitteilung/gutachter-abwrackpraemie-nutzte-der-umwelt/> 2009.
- [56] M. Barth, in *Empirische Forschung zur Bildung für nachhaltige Entwicklung - Themen, Methoden und Trends*, Schriftenreihe "Ökologie und Erziehungswissenschaft" der Kommission Bildung für eine nachhaltige Entwicklung der DGfE, Vol. 6 (Eds: M. Barth, M. Rieckmann), Verlag Barbara Budrich. Opladen, Berlin, Toronto, Opladen, Berlin, Toronto 2016.
- [57] Verein für Ökologie und Umweltbildung Osnabrücke e.V., *BNE-Literatur - Datenbank für Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) - Database on Education for Sustainable Development (ESD)*, <http://www.bne-literatur.de/> 2018.
- [58] C. Gräsel, I. Bormann, K. Schütte, K. Trempler, R. Fischbach, *Policy Futures in Education* 2013, 11 (2), 115 – 127. DOI: 10.2304/pfie.2013.11.2.115.
- [59] Kommission "Bildung für eine nachhaltige Entwicklung", *Forschungsprogramm "Bildung für nachhaltige Entwicklung"*, https://www.bne.uni-osnabrueck.de/pub/uploads/Dgfe-bne/bfn_forschungsprogramm2004.pdf 2004.
- [60] Deutsche Gesellschaft für Erziehungswissenschaften (DGfE), *Kommission Bildung für nachhaltige Entwicklung*, <https://www.dgfe.de/sektionen-kommissionen/sektion-3-interkulturelle-und-international-vergleichende-erziehungswissenschaft/kommission-bildung-fuer-nachhaltige-entwicklung.html>.
- [61] *Empirische Forschung zur Bildung für nachhaltige Entwicklung - Themen, Methoden und Trends*, Schriftenreihe "Ökologie und Erziehungswissenschaft" der Kommission Bildung für eine nachhaltige Entwicklung der DGfE, Vol. 6 (Eds: M. Barth, M. Rieckmann), Verlag Barbara Budrich, Opladen, Berlin, Toronto, Opladen, Berlin, Toronto 2016.
- [62] M. Barth, M. Rieckmann, in *Empirische Forschung zur Bildung für nachhaltige Entwicklung - Themen, Methoden und Trends*, Schriftenreihe "Ökologie und Erziehungswissenschaft" der

- Kommission Bildung für eine nachhaltige Entwicklung der DGfE, Vol. 6 (Eds: M. Barth, M. Rieckmann), Verlag Barbara Budrich. Opladen, Berlin, Toronto, Opladen, Berlin, Toronto 2016.
- [63] M. Buddeberg, *Zur Implementation des Konzepts Bildung für nachhaltige Entwicklung: Eine Studie an weiterführenden Schulen in Nordrhein-Westfalen*, Empirische Erziehungswissenschaft, Vol. 54, Waxmann, Münster, Westf 2014.
- [64] K. Hauenschild, in *Bildung für eine nachhaltige Entwicklung: Aktuelle Forschungsfelder und -ansätze*, Schriftenreihe "Ökologie und Erziehungswissenschaft" der Arbeitsgruppe "Umweltbildung" der Deutschen Gesellschaft für Erziehungswissenschaft (Eds: W. Riess, H. Apel), VS Verlag für Sozialwissenschaften. Wiesbaden 2006.
- [65] M. Buddeberg, *Zur Implementation des Konzepts Bildung für nachhaltige Entwicklung: Eine Studie an weiterführenden Schulen in Nordrhein-Westfalen*, Empirische Erziehungswissenschaft, Vol. 54, Waxmann, Münster 2014.
- [66] H. Seybold, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Perspektiven für die Umweltbildung*, Vorträge und Studien, Vol. 16 (Eds: B. Hiller, M. Lange), Zentrum für Umweltforschung. Münster 2006.
- [67] N. Reichel, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Perspektiven für die Umweltbildung*, Vorträge und Studien, Vol. 16 (Eds: B. Hiller, M. Lange), Zentrum für Umweltforschung. Münster 2006.
- [68] M. Burmeister, I. Eilks, in *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, 38. Jahrestagung in Oldenburg 2011*, Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Vol. 32 (Eds: S. Bernholt), Lit. Berlin 2012.
- [69] M. Burmeister, S. Schmidt-Jacob, I. Eilks, *Chem. Educ. Res. Pract.* 2013, 14 (2), 169 – 176. DOI: 10.1039/C2RP20137B.
- [70] M. Burmeister, I. Eilks, *Chemkon* 2013, 20 (2), 66 – 72. DOI: 10.1002/ckon.201210190.
- [71] H. Paschen, C. Coenen, T. Fleischer, R. Grünwald, D. Oertel, C. Revermann, *Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg 2004.
- [72] M. Köhler, in *Chemische Technik: Prozesse und Produkte* (Eds: K. Winnacker, L. Küchler), Wiley-VCH. Weinheim 2004.
- [73] U. Hartmann, *Nanotechnologie*, Elsevier, Spektrum Akad. Verl, München 2006.
- [74] K. Bammel, *Physik Journal* 2006, 5 (12), 52 – 53.
- [75] S. Bedanta, Supermagnetism in magnetic nanoparticle systems, *Dissertation*, Universität Duisburg-Essen 2006.
- [76] J. Bravo, L. Zhai, Z. Wu, R. E. Cohen, M. F. Rubner, *Langmuir the ACS journal of surfaces and colloids* 2007, 23 (13), 7293 – 7298. DOI: 10.1021/la070159q.
- [77] A. Eatemadi, H. Daraee, H. Karimkhanloo, M. Kouhi, N. Zarghami, A. Akbarzadeh, M. Abasi, Y. Hanifehpour, S. W. Joo, *Nanoscale research letters* 2014, 9 (1), 9 – 393. DOI: 10.1186/1556-276X-9-393.
- [78] T. Wilke, Konzeptualisierung des Themas "Nano" für den Chemieunterricht, *Dissertation zur Erlangung des mathematisch-naturwissenschaftlichen Doktorgrades*, Georg-August-Universität 2016.

- [79] 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.
- [80] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *Nano-Initiative - Aktionsplan 2010*, Bonn, Berlin 2006.
- [81] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *Aktionsplan Nanotechnologie 2015*, Bonn, Berlin 2011.
- [82] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *Aktionsplan Nanotechnologie 2020: Eine ressortübergreifende Strategie der Bundesregierung*, Bonn 2016.
- [83] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *nano.DE-Report 2009: Status Quo der Nanotechnologie in Deutschland*, Bonn, Berlin 2009.
- [84] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *nano.DE-Report 2011: Status quo der Nanotechnologie in Deutschland*, Bonn, Berlin 2011.
- [85] Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), *nano.DE-Report 2013: Status quo der Nanotechnologie in Deutschland*, Bonn 2014.
- [86] BCC Research, *BCC Research Nanotechnology Report Overview: The Maturing Nanotechnology Market: Products and Applications 2016*.
- [87] M. L. Etheridge, S. A. Campbell, A. G. Erdman, C. L. Haynes, S. M. Wolf, J. McCullough, *Nanomedicine nanotechnology, biology, and medicine* 2013, *9*(1), 1 – 14.
DOI: 10.1016/j.nano.2012.05.013.
- [88] K. Savolainen, in *Handbook of nanosafety: Measurement, exposure and toxicology* (Eds: U. Vogel et al.), Elsevier Academic Press. San Diego 2014.
- [89] Verband der chemischen Industrie e.V., *Chemiewirtschaft in Zahlen 2017*, Frankfurt am Main 2017.
- [90] B. Bhushan, in *Global Perspectives of Nanoscience and Engineering Education* (Eds: K. Winkelmann, B. Bhushan), Springer International Publishing. Cham 2016.
- [91] Verband der chemischen Industrie e.V., *Nanomaterialien: Daten und Fakten 2018*.
- [92] M. E. Vance, T. Kuiken, E. P. Vejerano, S. P. McGinnis, M. F. Hochella, D. Rejeski, M. S. Hull, *Beilstein journal of nanotechnology* 2015, *6*, 1769 – 1780. DOI: 10.3762/bjnano.6.181.
- [93] NanoKommission der deutschen Bundesregierung, *Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien: Bericht und Empfehlungen der NanoKommission der deutschen Bundesregierung 2008/2008*.
- [94] S. Greßler, M. Nentwich, in *Nano risiko governance: Der gesellschaftliche Umgang mit Nanotechnologien* (Eds: A. Gzásó, J. Haslinger), Springer. Vienna [Austria] 2014.
- [95] P. V. Asharani, Y. L. Wu, Z. Gong, S. Valiyaveetil, *Nanotechnology* 2008, *19* (25), 255102.
DOI: 10.1088/0957-4484/19/25/255102.
- [96] R. Fries, S. Greßler, M. Simkó, A. Gzásó, U. Fiedeler, M. Nentwich, *ITAnt* 2009, *010* (1), 1 – 6.
- [97] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), *Verantwortlicher Umgang mit Nanotechnologien: Bericht und Empfehlungen der NanoKommission 2011/2010*.

- [98] A. Reihlen, D. Jepsen, *FachDialog 3 - Nachhaltige Nanotechnologien: Hintergrunddokument* 2012.
- [99] A. Kumar, S. Singh, R. Shanker, A. Dhawan, in *Nanotoxicology: Experimental and computational perspectives*, Issues in Toxicology, no. 35 (Eds: A. Dhawan, D. Anderson, R. Shanker), Royal Society of Chemistry. Cambridge 2018.
- [100] A. Elsaesser, C. V. Howard, *Advanced Drug Delivery Reviews* 2012, *64* (2), 129 – 137.
DOI: 10.1016/j.addr.2011.09.001.
- [101] Z. Magdolenova, A. Collins, A. Kumar, A. Dhawan, V. Stone, M. Dusinska, *Nanotoxicology* 2014, *8* (3), 233 – 278. DOI: 10.3109/17435390.2013.773464.
- [102] M. Simkó, in *Nano Risiko Governance: Der gesellschaftliche Umgang mit Nanotechnologien* (Eds: A. Gzásó, J. Haslinger), Springer. Wien 2014.
- [103] M. Skocaj, M. Filipic, J. Petkovic, S. Novak, *Radiology and oncology* 2011, *45* (4), 227 – 247.
DOI: 10.2478/v10019-011-0037-0.
- [104] G. Ganteför, *Alles Nano oder was?: Nanotechnologie für Neugierige*, Erlebnis Wissenschaft 2013.
- [105] A. Panáček, L. Kvítek, M. Smékalová, R. Večeřová, M. Kolář, M. Röderová, F. Dyčka, M. Šebela, R. Prucek, O. Tomanec, R. Zbořil, *Nature nanotechnology* 2018, *13* (1), 65 – 71. DOI: 10.1038/s41565-017-0013-y.
- [106] N. Oh, J.-H. Park, *International journal of nanomedicine* 2014, *9* Suppl 1, 51 – 63.
DOI: 10.2147/IJN.S26592.
- [107] Umweltbundesamt, Bundesinstitut für Risikobewertung, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, *Nanomaterialien und REACH: Hintergrundpapier zur Position der deutschen Bundesbehörden* 2013.
- [108] The European Commission, *Commission Recommendation of 18 October 2011 on the definition of nanomaterial: 2011/696/EU*, http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/pdf/policy/commission-recommendation-on-the-definition-of-nanomater-18102011_en.pdf 2011.
- [109] M. Kurath, M. Nentwich, T. Fleischer, I. Eisenberger, in *Nano risiko governance: Der gesellschaftliche Umgang mit Nanotechnologien* (Eds: A. Gzásó, J. Haslinger), Springer. Vienna [Austria] 2014.
- [110] *Handbook of nanosafety: Measurement, exposure and toxicology* (Eds: U. Vogel et al.), Elsevier Academic Press, San Diego 2014.
- [111] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, *Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates: vom 30. November 2009 über kosmetische Mittel (Neufassung)* 2009.
- [112] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, *Verordnung (EU) Nr. 1169/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates: vom 25. Oktober 2011* 2011.
- [113] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union, *Verordnung (EU) Nr. 528/2012 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bereitstellung auf dem Markt und die Verwendung von Biozidprodukten* 2012.

- [114] M. G. Jones, R. Blonder, G. E. Gardner, V. Albe, M. Falvo, J. Chevrier, *International Journal of Science Education* 2013, 35 (9), 1490 – 1512. DOI: 10.1080/09500693.2013.771828.
- [115] A. Laherto, *Science Education International* 2010, 21 (3), 160 – 175.
- [116] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, in Zusammenarbeit mit dem Landesinstitut für Schulentwicklung, *Chemie: Bildungsplan 2016. Gemeinsamer Bildungsplan der Sekundarstufe I*, <http://www.bildungsplaene-bw.de/Lde/Startseite> 2016.
- [117] Ministerium für Kultus, Jugend und Sport Baden-Württemberg, in Zusammenarbeit mit dem Landesinstitut für Schulentwicklung, *Chemie: Bildungsplan 2016. Bildungsplan des Gymnasiums*, <http://www.bildungsplaene-bw.de/Lde/LS/BP2016BW/ALLG/GYM/CH> 2016.
- [118] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, *Chemie: Lehrplan für das Gymnasium in Bayern*, <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26384> 2004.
- [119] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin, *Rahmenlehrplan Chemie, Sekundarstufe I: Jahrgangsstufe 7-10*, <https://www.berlin.de/sen/bildung/unterricht/faecher-rahmenlehrplaene/rahmenlehrplaene/> 2006.
- [120] Senatsverwaltung für Bildung, Jugend und Sport Berlin, Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg, Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern, *Rahmenlehrplan Chemie, Sekundarstufe II*, Berlin, <https://www.berlin.de/sen/bildung/unterricht/faecher-rahmenlehrplaene/rahmenlehrplaene/> 2006.
- [121] Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg, *Rahmenlehrplan Chemie, Sekundarstufe I: Jahrgangsstufen 7-10*, <https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/rlp-online/c-faecher/chemie/kompetenzentwicklung/> 2008.
- [122] Ministerium für Bildung, Jugend und Sport des Landes Brandenburg, *Vorläufiger Rahmenlehrplan für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe im Land Brandenburg: Chemie*, https://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/fileadmin/bbb/unterricht/rahmenlehrplaene/gymnasiale_oberstufe/curricula/2011/Chemie-VRLP_GOST_2011_Brandenburg.pdf 2011.
- [123] Senator für Bildung und Wissenschaft Bremen, *Naturwissenschaften, Biologie - Chemie - Physik: Bildungsplan für das Gymnasium*, https://www.lis.bremen.de/schulqualitaet/curriculumentwicklung/bildungsplaene/sekundarbereich_i-15226 2006.
- [124] Die Senatorin für Bildung und Wissenschaft Bremen, *Chemie: Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe - Qualifikationsphase -*, https://www.lis.bremen.de/schulqualitaet/curriculumentwicklung/bildungsplaene/sekundarbereich_ii_allgemeinbildend-16698 2008.
- [125] Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung, *Bildungsplan Chemie: Gymnasium, Sekundarstufe I*, Hamburg, <http://www.hamburg.de/contentblob/2373260/38f22442354197d2151d1a30784e9d3e/data/chemie-gym-seki.pdf> 2011.
- [126] Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Schule und Berufsbildung, *Bildungsplan Chemie: Gymnasiale Oberstufe*, <http://www.hamburg.de/contentblob/1475194/bf7b01c3faaa85e8b71a69480373a142/data/chemie-gyo.pdf> 2009.

- [127] Hessisches Kultusministerium, *Bildungsstandards und Inhaltsfelder Chemie: Das neue Kerncurriculum für Hessen*, https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/kerncurriculum_chemie_gymnasium.pdf.
- [128] Hessisches Kultusministerium, *Kerncurriculum Chemie: Gymnasiale Oberstufe*, <https://kultusministerium.hessen.de/sites/default/files/media/kcgo-ch.pdf> 2016.
- [129] Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Mecklenburg-Vorpommern, *Rahmenlehrplan Chemie: Für die Jahrgangsstufen 7 bis 10 des gymnasialen Bildungsgangs*, https://www.bildung-mv.de/export/sites/bildungserver/downloads/unterricht/Rahmenplaene/Rahmenplaene_allgemeinbildende_Schulen/Chemie/rahmenplan_chemie_gymnasium.pdf 2011.
- [130] Bildungserver Mecklenburg-Vorpommern, *Kerncurriculum für die Qualifikationsphase der gymnasialen Oberstufe: Chemie*, https://www.bildung-mv.de/export/sites/bildungserver/downloads/unterricht/Rahmenplaene/Rahmenplaene_allgemeinbildende_Schulen/Chemie/kc-chemie-11-12-gym.pdf 2006.
- [131] Niedersächsisches Kultusministerium, *Naturwissenschaften: Kerncurriculum für das Gymnasium, Schuljahrgänge 5-10*, Hannover, http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/nw_gym_si_kc_druck.pdf 2015.
- [132] Niedersächsisches Kultusministerium, *Chemie: Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Berufliche Gymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg*, Hannover, http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/ch_go_kc_druck_2017.pdf 2017.
- [133] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, *Chemie: Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen*, Düsseldorf, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/150/gym8_chemie.pdf 2008.
- [134] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, *Chemie: Kernlehrplan für die Sekundarstufe II, Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen*, Düsseldorf, https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/151/KLP_GOSt_Chemie.pdf 2014.
- [135] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz, *Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz: Biologie, Chemie, Physik*, <https://lehrplaene.bildung-rp.de/> 2014.
- [136] Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz, *Lehrplan Chemie - Sekundarstufe II*, <https://lehrplaene.bildung-rp.de/> 1998.
- [137] Ministerium für Bildung und Kultur Saarland, *Lehrplan Chemie: Gymnasium, Klassenstufen 8 und 9, Naturwissenschaftlicher Zweig*, https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/LP_Ch_Gym_8_und_9_nw-Zweig_Juni_2012.pdf 2012.
- [138] Ministerium für Bildung, Kultur und Wissenschaft Saarland, *Lehrplan Chemie - mathematisch-naturwissenschaftlicher Zweig -: Für die Einführungsphase der gymnasialen Oberstufe*, https://www.saarland.de/dokumente/thema_bildung/CHmnEinfphFeb2006.pdf 2006.

- [139] Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport, *Chemie: Lehrplan Gymnasium*, https://www.schule.sachsen.de/lpdb/web/downloads/lp_gy_chemie_2011.pdf?v2 2011.
- [140] Ministerium für Bildung Sachsen-Anhalt, *Chemie: Fachlehrplan Gymnasium*, https://www.bildung-lsa.de/pool/RRL_Lehrplaene/Erprobung/Gymnasium/FLP_Gym_Chemie_LTn.pdf?rl=106 2016.
- [141] Ministerium für Schule und Berufsbildung des Landes Schleswig-Holstein, *Fachanforderungen Chemie: Allgemein bildende Schulen, Sekundarstufe I - Gymnasium, Sekundarstufe II*, Kiel, <https://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=199> 2016.
- [142] Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur, *Chemie: Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife*, <http://www.schulportal-thueringen.de/web/guest/media/detail?tspi=2285&tspt=%3A%3B%3AbackUrl%3A%3D%3A%2Fmedia%2Fdetail%3Ftspi%3D2282%26tspt%3D%253A%253B%253AbackUrI%253A%253D%253A%252Fmedia%252Fdetail%253Ftspi%253D2285> 2012.
- [143] A. Laherto, Nanoscience Education for Scientific Literacy: Opportunities and Challenges in Secondary School and in Out-of-School Settings, *Academic Dissertation*, University of Helsinki 2012.
- [144] S. Stevens, L. Sutherland, J. S. Krajcik, *The big ideas of nanoscale science & engineering: A guidebook for secondary teachers*, NSTA Press, Arlington, VA 2009.
- [145] S. Sakhnini, R. Blonder, *International Journal of Science Education* 2015, *37* (11), 1699 – 1738. DOI: 10.1080/09500693.2015.1035687.
- [146] R. Blonder, S. Sakhnini, in *Global Perspectives of Nanoscience and Engineering Education* (Eds: K. Winkelmann, B. Bhushan), Springer International Publishing. Cham 2016.
- [147] R. Blonder, *J Nano Educ* 2010, *2* (1), 67 – 75. DOI: 10.1166/jne.2010.1004.
- [148] M. Amme, M. Garrecht, in *Die Chemie zwischen Hoffnung und Skepsis: Wege zur Vertiefung von Wissen und Verständnis in Chemie und Technik* (Eds: H. Güsten, H. Reiner mann), Nomos Verlag, Baden-Baden 2008.
- [149] I. Parchmann, J. Menthe, in *Nachhaltige Chemie: Erfahrungen und Perspektiven*, Ökologie und Wirtschaftsforschung, Vol. 66 (Eds: M. Angrick), Metropolis-Verl. Marburg 2006.
- [150] H.-D. Barke, C. Hilbing, *Chem. Unserer Zeit* 2000, *34* (1), 17 – 23. DOI: 10.1002/(SICI)1521-3781(200002)34:1<17:AID-CIUZ17>3.0.CO;2-V.
- [151] M. Burmeister, S. Jokmin, I. Eilks, *Chemkon* 2011, *18* (3), 123 – 128. DOI: 10.1002/ckon.201110144.
- [152] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, *Fachprofile - Chemie: Lehrplan (Pflicht-/Wahlpflichtfächer)*, <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26384> 2004.
- [153] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, *Chemie: Lehrplan (Pflicht-/Wahlpflichtfächer), Jahrgangsstufe 9*, <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/index.php?StoryID=26447> 2004.

- [154] Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München, *Chemie: Lehrplan (Pflicht-/Wahlpflichtfächer), Jahrgangsstufe 10*, <http://www.isb-gym8-lehrplan.de/contentserv/3.1.neulg8.de/index.php?StoryID=26225> 2004.
- [155] P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry: Theory and practice* 1998.
- [156] M. Burmeister, F. Rauch, I. Eilks, *Chem. Educ. Res. Pract.* 2012, *13* (2), 59.
DOI: 10.1039/c1rp90060a.
- [157] J. Dege, T. Wilke, A. Pflugmacher, T. Waitz, in *Conference proceedings: New Perspectives in Science Education 4th Conference edition, Florence, Italy, 20-21 March 2015*, Libreriauniversitaria.it. Padova 2015.
- [158] H. Maleki, L. Durães, A. Portugal, *Journal of Non-Crystalline Solids* 2014, *385*, 55 – 74.
DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2013.10.017.
- [159] Lisinski, *Aerogel-Herstellung im Sol-Gel-Verfahren*, https://www.dlr.de/Portaldata/1/Resources/portal_news/newsarchiv2008_1/aerogel_herstl.jpg 2008.
- [160] A. Soleimani Dorcheh, M. H. Abbasi, *Journal of Materials Processing Technology* 2008, *199* (1-3), 10 – 26. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.060.
- [161] M. Schmidt, F. Schwertfeger, *Journal of Non-Crystalline Solids* 1998, *225*, 364 – 368.
DOI: 10.1016/S0022-3093(98)00054-4.
- [162] Z. Li, X. Cheng, S. He, D. Huang, H. Bi, H. Yang, *Materials Letters* 2014, *129*, 12 – 15.
DOI: 10.1016/j.matlet.2014.05.024.
- [163] J. L. Gurav, A. V. Rao, U. K.H. Bangi, *Journal of alloys and compounds* 2009, *471* (1-2), 296 – 302.
DOI: 10.1016/j.jallcom.2008.03.076.
- [164] E. Hecht, A. Schleitner, *Optik*, 6th ed., De Gruyter Studium, De Gruyter; Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2014.
- [165] A. F. Holleman, E. Wiberg, N. Wiberg, *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, 102nd ed., De Gruyter, Berlin, New York 2007.
- [166] T. Kummer, *Tyndall-Effekt*, <https://www.uni-due.de/~hc0014/S+WM/Wirkung/Tyndall.html> 2008.
- [167] S. Zhao, W. J. Malfait, N. Guerrero-Alburquerque, M. M. Koebel, G. Nyström, *Angew. Chem.* 2018, *130* (26), 7704 – 7733. DOI: 10.1002/ange.201709014.
- [168] Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss: (Beschluss der Kultusministerkonferenz vom 16.12.2004)*, Beschlüsse der Kultusministerkonferenz, Luchterhand, Neuwied 2004.
- [169] R. Zahoransky, H.-J. Allelein, E. Bollin, H. Oehler, U. Schelling, H. Schwarz, *Energietechnik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden 2013.
- [170] A. Kudo, Y. Miseki, *Chem. Soc. Rev.* 2009, *38* (1), 253 – 278. DOI: 10.1039/b800489g.
- [171] J.-S. Hu, L.-L. Ren, Y.-G. Guo, H.-P. Liang, A.-M. Cao, L.-J. Wan, C.-L. Bai, *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 2005, *44* (8), 1269 – 1273. DOI: 10.1002/anie.200462057.

- [172] L. Huang, X. Wang, J. Yang, G. Liu, J. Han, C. Li, *J. Phys. Chem. C* 2013, *117* (22), 11584 – 11591. DOI: 10.1021/jp400010z.
- [173] H. J. Kuhn, S. E. Braslavsky, R. Schmidt, *Pure and Applied Chemistry* 2004, *76* (12), 2105 – 2146. DOI: 10.1351/pac200476122105.
- [174] I. P. Pozdnyakov, O. V. Kel, V. F. Plyusnin, V. P. Grivin, N. M. Bazhin, *The Journal of physical chemistry. A* 2008, *112* (36), 8316 – 8322. DOI: 10.1021/jp8040583.
- [175] J. F. Reber, K. Meier, *J. Phys. Chem.* 1984, *88* (24), 5903 – 5913. DOI: 10.1021/j150668a032.
- [176] T. Maschmeyer, M. Che, *Angew. Chem.* 2010, *122* (50), 9784 – 9785. DOI: 10.1002/ange.201004872.
- [177] N. Serpone, A. Salinaro, *Pure and Applied Chemistry* 1999, *71* (2), 303 – 320. DOI: 10.1351/pac199971020303.
- [178] J. Lee, H. H. Seliger, *J. Chem. Phys.* 1964, *40* (2), 519 – 523. DOI: 10.1063/1.1725147.
- [179] L. Yan, Z. Gu, Y. Zhao, *Chemistry, an Asian journal* 2013, *8* (10), 2342 – 2353. DOI: 10.1002/asia.201300542.
- [180] H. Althues, Lumineszierende, transparente Nanokomposite - Synthese und Charakterisierung, *Dissertation*, Technische Universität Dresden 2007.
- [181] T. Wilke, S. Waitz, E. von Hoff, T. Waitz, *Chemkon* 2018, *25* (1), 16 – 22. DOI: 10.1002/ckon.201810317.
- [182] A. Asok, M. N. Gandhi, A. R. Kulkarni, *Nanoscale* 2012, *4* (16), 4943. DOI: 10.1039/C2NR31044A.
- [183] S. Iravani, H. Korbekandi, S. V. Mirmohammadi, B. Zolfaghari, *Research in pharmaceutical sciences* 2014, *9* (6), 385 – 406.
- [184] A. I. Yanson, P. Rodriguez, N. Garcia-Araez, R. V. Mom, F. D. Tichelaar, M. T. M. Koper, *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 2011, *50* (28), 6346 – 6350. DOI: 10.1002/anie.201100471.
- [185] E. von Hoff, S. Waitz, F. Kollenda, T. Waitz, *WJCE* 2018, *6* (1), 72 – 77. DOI: 10.12691/wjce-6-1-11.
- [186] J. Menthe, P. Düker, H. Heller, A. Hönke, *Praxis der Naturwissenschaften Chemie* 2015, *64* (4), 18 – 22.
- [187] J. D. Dukes, P. Whitley, A. D. Chalmers, *BMC cell biology* 2011, *12*, 43. DOI: 10.1186/1471-2121-12-43.
- [188] B. Fadeel, S. Orrenius, *Journal of internal medicine* 2005, *258* (6), 479 – 517. DOI: 10.1111/j.1365-2796.2005.01570.x.
- [189] N. M. Franklin, N. J. Rogers, S. C. Apte, G. E. Batley, G. E. Gadd, P. S. Casey, *Environmental Science & Technology* 2007, *41* (24), 8484 – 8490. DOI: 10.1021/es071445r.
- [190] H. Liu, W. Sha, A. T. Cooper, M. Fan, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2009, *347* (1-3), 38 – 44. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2008.11.033.
- [191] T. Xia, M. Kovochich, M. Liang, L. Mädler, B. Gilbert, H. Shi, J. I. Yeh, J. I. Zink, A. E. Nel, *ACS Nano* 2008, *2* (10), 2121 – 2134. DOI: 10.1021/nn800511k.
- [192] S. Stach, *Polysaccharide aus marinen Bakterien und der Mikroalge Chlorella vulgaris*, 1st ed., Cuvillier, Göttingen 2005.

- [193] M. M. Phukan, Chutia. Rahul S., B. K. Konwar, R. Kataki, *Applied Energy* 2011, *88* (10), 3307 – 3312. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.11.026.
- [194] A.-V. Ursu, A. Marcati, T. Sayd, V. Sante-Lhoutellier, G. Djelveh, P. Michaud, *Bioresource technology* 2014, *157*, 134 – 139. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.071.
- [195] K. Munk, *Mikrobiologie*, Taschenlehrbuch Biologie, Thieme, Stuttgart [u.a.] 2008.
- [196] T. Wilke, J. Dege, T. Waitz, *Chemkon* 2017, *24* (4), 209 – 212. DOI: 10.1002/ckon.201790005.
- [197] N. A. Campbell, J. B. Reece, L. A. Urry, M. L. Cain, S. A. Wasserman, P. V. Minorsky, R. Jackson, *Biologie*, 10th ed., Always learning, Pearson; MyiLibrary, Hallbergmoos, La Vergne, Tenn., Hampshire 2016.
- [198] Niedersächsisches Kultusministerium, *Biologie: Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe, das Berufliche Gymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg*, Hannover, http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/bi_go_kc_druck_2017.pdf 2017.
- [199] B. Volesky, Z. R. Holan, *Biotechnology progress* 1995, *11* (3), 235 – 250. DOI: 10.1021/bp00033a001.
- [200] S. Klimmek, Charakterisierung der Biosorption von Schwermetallen an Algen, *Dissertation*, Technische Universität Berlin 2003.
- [201] W. Lietz, Aufnahme der Schwermetalle Zink, Cadmium und Blei und deren synergistische Wirkung auf die Grünalge *Chlorella Saccharophila* und die aus der Oker isolierte Alge *Chlorella Vulgaris*, *Dissertation*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina 1987.
- [202] H. Paschen, C. Coenen, T. Fleischer, R. Grünwald, D. Oertel, C. Revermann, *Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung*, Springer Berlin Heidelberg 2006.
- [203] T. Melin, R. Rautenbach, *Membranverfahren: Grundlagen der Modul- und Anlagenauslegung*, 3rd ed., Springer, Berlin [u.a.] 2007.
- [204] K.-V. Peinemann, S. Pereira Nunes, *Polymermembranen*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA 2006, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/3527609008.ch1/pdf>.
- [205] H. Strathmann, P. Scheible, R. W. Baker, *J. Appl. Polym. Sci.* 1971, *15* (4), 811 – 828. DOI: 10.1002/app.1971.070150404.
- [206] J. Bützer, K. Kessler, *Kunststoff als Werkstoff: Celluloid und Polyurethan-Weichschaum Material, Eigenschaften, Erhaltung*, Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut, Vol. 13, Siegl, Köln 2001.
- [207] A. Fujishima, T. N. Rao, D. A. Tryk, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews* 2000, *1* (1), 1 – 21. DOI: 10.1016/S1389-5567(00)00002-2.
- [208] P. Scheller-Brüninghaus, C. Schmidt, *Bildung und Erziehung* 2011, *64* (1). DOI: 10.7788/bue.2011.64.1.53.
- [209] J. Menthe, *NanoBiNE - Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung: Kooperationsprojekt zur Ausschreibung "Naturwissenschaftlich-technische Umweltbildung und Kommunikation"* 2015.

- [210] S. Fechner, *Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education*, Logos Verlag Berlin 2009.
- [211] A. Pilot, A. M.W. Bulte, *International Journal of Science Education* 2006, 28 (9), 1087 – 1112.
DOI: 10.1080/09500690600730737.
- [212] M. Burmeister, I. Eilks, *Chem. Educ. Res. Pract.* 2012, 13 (2), 93. DOI: 10.1039/c1rp90067f.
- [213] B. Campbell, J. Lazonby, R. Millar, P. Nicolson, J. Ramsden, D. Waddington, *Sci. Ed.* 1994, 78 (5), 415 – 447. DOI: 10.1002/sce.3730780503.
- [214] R. Marks, I. Eilks, *International Journal of Environmental & Science Education* 2009, 4 (3), 231 – 245.
- [215] T. Feierabend, I. Eilks, *Plus Lucis Online* 2010 (1), D-1-D-11.
- [216] I. Eilks, R. Marks, M. Stuckey, *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule* 2016, 65 (5), 33 – 37.
- [217] B. Rosenshine, C. Meister, S. Chapman, *Review of Educational Research* 1996, 66 (2), 181 – 221.
DOI: 10.2307/1170607.
- [218] H. J. Bader, H. Schmidkunz, in *Konkrete Fachdidaktik Chemie* (Eds: P. Pfeifer, B. Lutz, H. J. Bader), Oldenbourg, München 2002.
- [219] h. Meyer, *Praxisband*, 14th ed., Unterrichtsmethoden / Hilbert Meyer, 2, Ed. 14, Cornelsen Scriptor, Berlin 2011.
- [220] S. Griffin, M. I. Masood, M. J. Nasim, M. Sarfraz, A. P. Ebokaiwe, K.-H. Schäfer, C. M. Keck, C. Jacob, *Antioxidants (Basel, Switzerland)* 2017, 7 (1). DOI: 10.3390/antiox7010003.
- [221] S. Prabhu, E. K. Poulouse, *Int Nano Lett* 2012, 2 (1), 2 – 32. DOI: 10.1186/2228-5326-2-32.
- [222] A.-H. Lu, E. L. Salabas, F. Schüth, *Angewandte Chemie (International ed. in English)* 2007, 46 (8), 1222 – 1244. DOI: 10.1002/anie.200602866.
- [223] D. Mijatovic, J. C. T. Eijkel, A. van den Berg, *Lab on a chip* 2005, 5 (5), 492 – 500.
DOI: 10.1039/b416951d.
- [224] C. Beer, K. S. Dokkedahl, J. Wang, D. Sutherland, J.R. Nyengaard, *Dermal Absorption of Nanomaterials Titanium Dioxide and Zinc Oxide Based Sunscreen: Role of Size and Surface Coating*, Danish Environmental Protection Agency 2015.
- [225] N. Serpone, D. Dondi, A. Albini, *Inorganica Chimica Acta* 2007, 360 (3), 794 – 802.
DOI: 10.1016/j.ica.2005.12.057.
- [226] Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS), *Opinion on Titanium Dioxide (nano form) as UV-filter in sprays*, https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_206.pdf 2018.
- [227] Scientific Committee on Consumer Safety (SCCS), *Opinion on ZnO (nano form)*, http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consumer_safety/docs/sccs_o_103.pdf 2012.
- [228] A. Hofstein, V. N. Lunetta, *Review of Educational Research* 2016, 52 (2), 201 – 217.
DOI: 10.3102/00346543052002201.

- [229] D.-S. Di Fuccia, in *Experimentelle Aufgabenstellungen im Chemieunterricht mit CD-ROM*, Akademieberichte (Eds: Akademie für Lehrerfortbildung und Personalführung). Dillingen a.d.D. 2008.
- [230] F. P. Schmook, J. G. Meingassner, A. Billich, *International Journal of Pharmaceutics* 2001, 215 (1-2), 51 – 56. DOI: 10.1016/S0378-5173(00)00665-7.
- [231] J. K. Gilbert, *International Journal of Science Education* 2006, 28 (9), 957 – 976. DOI: 10.1080/09500690600702470.
- [232] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, *Der NanoDialog*, <https://www.bmu.de/themen/gesundheitschemikalien/nanotechnologie/nanodialog/> 2015.
- [233] A. Bloemen, *Fachliche Vorstellungen und Schülervorstellungen zum Thema Nachhaltigkeit*, Oldenburger Beiträge zur historisch-politischen Bildung, Vol. 12, BIS-Verlag, Oldenburg 2010.
- [234] M. Rieckmann, *Die globale Perspektive der Bildung für eine nachhaltige Entwicklung: Eine europäisch-lateinamerikanische Studie zu Schlüsselkompetenzen für Denken und Handeln in der Weltgesellschaft*, Umweltkommunikation, Vol. 7, BMV, Berlin 2010.
- [235] C. Petsch, A. Gönnerwein, R. Nickolaus, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Beiträge der Bildungsforschung*, Vol. 39 2012.
- [236] O. Stengel, C. Liedtke, C. Baedeker, M.-J. Welfens, *Umweltpsychologie* 2008, 12 (2), 29 – 42.
- [237] E. Raab-Steiner, M. Benesch, *Der Fragebogen: Von der Forschungsidee zur SPSS, PASW-Auswertung*, 2nd ed., UTB Schlüsselkompetenzen, Vol. 8406, Facultas-Verl, Wien 2010.
- [238] C. Gräsel, I. Bormann, K. Schütte, K. Trempler, R. Fischbach, Asseburg, Regine, in *Bildung für nachhaltige Entwicklung - Beiträge der Bildungsforschung*, Vol. 39 2012.
- [239] L. Gräf, in *Online research: Methoden, Anwendungen und Ergebnisse*, Internet und Psychologie neue Medien in der Psychologie, Vol. 1 (Eds: B. Batinic), Hogrefe. Göttingen 1999.
- [240] J. Bortz, N. Döring, *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*, 5th ed., Springer-Lehrbuch, Springer, Berlin 2015.
- [241] B. Rohrmann, *Zeitschrift für Sozialpsychologie* 1978, 9 (3), 222 – 245.
- [242] C. Züll, N. Menold, in *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (Eds: N. Baur, J. Blasius), Springer VS. Wiesbaden 2014.
- [243] Wirtschaftspsychologische Gesellschaft (WPGS), *3. Reliabilität als Gütekriterium*, <https://wpgs.de/fachtexte/ergebnisinterpretation/reliabilitaet-als-guetekriterium/> 2018.
- [244] P. Mayring, *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*, 12th ed., Beltz Pädagogik, Beltz, Weinheim 2015.
- [245] S. Kühnel, D. Krebs, *Statistik für die Sozialwissenschaften: Grundlagen, Methoden, Anwendungen*, 7th ed., Rowohlts Enzyklopädie, Rowohlt - Taschenbuch-Verl., Reinbek bei Hamburg 2014.
- [246] J. de Winter, D. Dodou, *Practical Assessment, Research & Evaluation* 2010, 15 (11), 1 – 16.
- [247] U. Kuckartz, S. Rädiker, T. Ebert, J. Schehl, *Statistik: Eine verständliche Einführung*, 1st ed., Lehrbuch, VS, Verl. für Sozialwiss, Wiesbaden 2010.

-
- [248] A. Bühl, *SPSS 23: Einführung in die moderne Datenanalyse*, 15th ed., Always learning, Vol. 4297, Pearson, Hallbergmoos 2016.
- [249] R. Leonhart, *Lehrbuch Statistik: Einstieg und Vertiefung*, 3rd ed., Verlag Hans Huber, Lehrbuch Psychologie, Huber, Bern 2013.
- [250] J. Cohen, *Statistical power analysis for the behavioural sciences*, Lawrence Erlbaum Associates, Hove 1988.
- [251] P. Mayring, M. Gläser-Zikuda, *Die Praxis der qualitativen Inhaltsanalyse*, 2nd ed., Pädagogik, Beltz, Weinheim 2008.
- [252] P. Guderian, *Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte, Dissertation*, Humboldt-Universität zu Berlin 2007.

12. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Schnittmengenmodell der Nachhaltigkeit nach VON HAUFF. [14, S. 165].....	8
Abbildung 2 - Die 17 SDGs der UN. [34].....	16
Abbildung 3 - Schematische Darstellung des Sol-Gel-Verfahrens zur Herstellung eines Aerogels (nach DLR/LISINSKI [159]).....	57
Abbildung 4 - Aerogel (zur Größeneinordnung neben einem Lineal, links) sowie das gemessene Sandvolumen ohne (mittig) und mit Aerogel (rechts) im Messzylinder.	59
Abbildung 5 - Sichtbare Laserstrahlen in den Aerogelen.	59
Abbildung 6 - Wassertropfen auf dem selbsthergestellten Aerogel (links), eingezogener Wassertropfen auf dem Aerogel vom DLR (rechts).	60
Abbildung 7 - Experiment Wärmeisolation zu Versuchsbeginn (links), zum Zeitpunkt der Streichholzentzündung (mittig) und 15 Minuten nach der Entzündung (rechts).....	61
Abbildung 8 - Kolbenprober mit vorgehaltener 2-Cent-Münze.....	62
Abbildung 9 - Füllung der Petrischale mit Feuerzeuggas, in der ein Aerogel liegt.....	63
Abbildung 10 - Schematische Darstellung der photokatalytischen Wasserspaltung an Halbleitern.....	67
Abbildung 11 - Versuchsapparat mit jeweils einem Reaktionskolben für die Wasserspaltung und die Aktinometrie (links), Low-cost Versuchsaufbau (rechts).	68
Abbildung 12 - Getrocknete Kaliumferrioxalat-Kristalle.....	70
Abbildung 13 - Sieben Lösungen unterschiedlicher Eisen(II)-phenanthrolin-Konzentration zur Anfertigung einer Kalibrierungskurve.....	70
Abbildung 14 - Kalibrierungskurve zur Bestimmung des dekadischen Absorptionskoeffizienten ϵ_{400nm}	72
Abbildung 15 - Bestimmung der durchschnittlichen Reaktionsrate der Kaliumferrioxalat-Aktinometrie..	73
Abbildung 16 - Getrockneter Feststoff, Photokatalysator aus Cadmium- und Zinksulfid.....	74
Abbildung 17 - Gasentwicklung bei der Photoreaktion.....	75
Abbildung 18 - Auftragung der entstandenen Stoffmenge an Wasserstoff gegen die Zeit.	76
Abbildung 19 - Direkte ROS-Bildung: Reaktion elektronenakzeptierender Gruppen mit den äußeren Elektronen der Oberflächenatome der Nanopartikel (links), Erzeugung von Elektronen-Loch-Paaren in	

Nanopartikeln durch UV/VIS-Strahlung und die Übertragung der Energie des angeregten Zustandes auf Sauerstoffmoleküle (rechts). Nach YAN et al. [179].....	80
Abbildung 20 - Beispiele für die Skaleneinteilung zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Substanzen auf die Zellen der Linie MDCK-II.....	84
Abbildung 21 - Mikroskopaufnahmen der MDCK-II-Zellen nach fünf Stunden. Abgebildet ist eine Referenzprobe (oben links), sowie unter Einfluss von Zinkoxidnanopartikel (NP, oben mittig), Zinkacetat (ZnAc, oben rechts), Ethanol (EtOH, unten links), Zinksulfat (Zn^{2+} , unten mittig) und Natriumacetat (NaAc, unten rechts – Linien sind durch eine andere Reaktionsschale bedingt).....	87
Abbildung 22 - Auftragung der relativen Toxizität der Zinkoxidnanopartikel (NP), Zinkacetat (ZnAc), Ethanol (EtOH), Natriumacetat (NaAc), Zinksulfat (Zn^{2+}) gegen die Zeit in Stunden.....	87
Abbildung 23 - Mikroskopische Aufnahmen der Referenzprobe nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).....	90
Abbildung 24 - Mikroskopische Aufnahmen der Algen unter Einfluss von Zinkoxidnanopartikeln nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).	91
Abbildung 25 - Mikroskopische Aufnahmen der Algen unter Einfluss von Ethanol nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).	91
Abbildung 26 - Mikroskopische Aufnahmen der Algen unter Einfluss von Silbernanopartikel nach einem Tag (links) und nach einer Woche (rechts).....	91
Abbildung 27 – Gas auffang-Apparatur für die alkoholische Gärung. [196].....	93
Abbildung 28 - Bildung von Kohlenstoffdioxid-Gas in Abhängigkeit von der Zeit.....	94
Abbildung 29 - Schematische Darstellung des Phaseninversionsverfahren zur Herstellung von Membranen im Phasendiagramm (modifiziert nach STRATHMANN et al. [205])	97
Abbildung 30 - Membranherstellungsschritte: Einschmelzen des Tischtennisballs (links), Auftragen der zähflüssigen Tischtennisball/Aceton-Mischung (zweite von links), Fällen der Membran im Wasserbad (zweite von rechts), Ablösen der Membran (rechts).....	99
Abbildung 31 - Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von der gefällten Membran aus dem Tischtennisball.....	100
Abbildung 32 - Versuchsaufbau und Beobachtung: Das Wasser durchdringt die Tischtennisballsicht nicht (links), durch die Membran tropft das Wasser hindurch (rechts).	101

Abbildung 33 - Beobachtung des Filtrationsvermögen, von links: Speisestärke vorher , nachher; Sand vorher, nachher; Erde vorher, nachher.....	102
Abbildung 34 - Übersicht der verschiedenen Versuchsansätze.....	103
Abbildung 35 - Bildungsbausteine des Projekts NanoBiNE.....	107
Abbildung 36 - Kursablauf der NanoBiNE.....	111
Abbildung 37 - Vier Bausteine zum Fällen von Entscheidungen.....	113
Abbildung 38 - Darstellung der Nanodimension über verschiedene Vergleiche im Rahmen des Einführungsvortrags.....	114
Abbildung 39 - Darstellung des Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses im Rahmen des Einführungsvortrags.....	115
Abbildung 40 - Schematische Darstellung der Funktionsweise physikalischer und chemischer UV-Filter. Der physikalische Filter der Sonnencreme reflektiert und streut die UV-Strahlen (links), die chemischen wandeln die UV-Strahlung in Wärme um (rechts).....	116
Abbildung 41 - Geographische Einordnung der teilnehmenden Schulklassen an dem Schülerlaborkurs der NanoBiNE.....	132
Abbildung 42 - Graphische Darstellung der prozentualen Zusammensetzung der Merkmale der Stichprobe.....	133
Abbildung 43 - Graphische Darstellung des durchschnittlichen Antwortverhaltens bezüglich der geschlossenen Fragen im Pre- und Posttest.....	136
Abbildung 44 - Ablaufmodell zusammenfassender Inhaltsanalyse nach MAYRING [244 S. 70].....	146
Abbildung 45 – Graphische Darstellung der Zusammensetzung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit für die Frage 04 im Pre- und Posttest bzw. Frage 06 im Follow-Up-Test.....	150
Abbildung 46 - Graphische Darstellung der Zusammensetzung der drei Dimensionen der Nachhaltigkeit für die Fragen 05 und 06 im Pre- und Posttest bzw. der Frage 08 im Follow-Up-Test.....	152
Abbildung 47- Graphische Darstellung der Fragen 04-06 des Pre- und Posttests bzw. der Fragen 06 und 08 des Follow-Up-Tests in Bezug zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit für den Pre- und Posttest...	153
Abbildung 48 - Graphische Darstellung der Ergebnisse zur Frage 10 des Pre- und Posttests.....	155
Abbildung 49 - Graphische Darstellung der prozentualen Verteilung des Antwortverhaltens zur Frage 08 des Pre- und Posttests bzw. Frage 05 des Follow-Up-Tests.....	157

Abbildung 50 - Sonnencremeempfehlung in Abhängigkeit von der eingenommenem Rolle im Planspiel über alle drei Messzeitpunkten.....	161
Abbildung 51 - Graphische Darstellung der Ergebnisse zur Frage 04 und 07 des Follow-Up-Tests.....	163

13. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Seiten der Nachhaltigkeit nach DE HAAN. [15, S. 17-19].....	8
Tabelle 2 - 12 Teilkompetenzen und deren Zuordnung zu den OECD Schlüsselkompetenzen. [38, S. 188]	18
Tabelle 3 - Anwendungsfelder der Nanotechnologie sowie die Anzahl der Organisationen des jeweiligen Bereichs.....	34
Tabelle 4 - Anwendungsbereiche der Nanotechnologie sowie zugehörige Beispiele. [85].....	44
Tabelle 5 - Erwähnung der Nanotechnologie im jeweiligen Bundesland des Chemiecurriculums bzw. Bildungsplan Chemie in der Sekundarstufe I (Sek I) bzw. der Sekundarstufe II (Sek II).	48
Tabelle 6 - Erwähnung von Nachhaltigkeit bzw. nachhaltiger Entwicklung im jeweiligen Bundesland des Chemiecurriculums bzw. Bildungsplan Chemie im allgemeinen Teil, in der Sekundarstufe I (Sek I) bzw. der Sekundarstufe II (Sek II).	54
Tabelle 7 - Zusammensetzung der Lösungen für die Kalibrierungskurve.....	69
Tabelle 8 - Gemessene Absorbanz der Eisen(II)-phenanthrolin-Lösungen bei einer Wellenlänge von 400 nm.	71
Tabelle 9 - Veränderung der Stoffmenge an Eisen(II)-Ionen über den gemessenen Zeitraum.....	71
Tabelle 10 - Gemessenes Gasvolumen in Abhängigkeit von der Zeit.....	74
Tabelle 11 - Einwaagen für Herstellung von Zinkoxidnanopartikel für die Versuche der folgenden Unterkapitel.....	81
Tabelle 12 - Relative Skala zur Bestimmung des Ausmaßes des Einflusses verschiedener Substanzen.	83
Tabelle 13 - Zu testende Substanzen rund um die Zinkoxidnanopartikelsynthese für den Einfluss auf die Zellen sowie deren Funktion.....	85
Tabelle 14 - Mischverhältnisse der Stammlösungen mit dem Zellmedium.....	86
Tabelle 15 - Rollenübersicht für das Planspiel des NanoDialogs.....	122
Tabelle 16 - Ablauf sowie der Inhalte jeder Phase des Schülerlabors des Projekts NanoBiNE. Darüber hinaus ist die Stufe der jeweiligen Phase entsprechend des gesellschaftskritisch-problemorientierten Unterrichtskonzepts vermerkt.....	124
Tabelle 17 - Verbale Charakterisierung sowie Kodierung der gewählten Likert-Skala und der Option „weiß ich nicht“.....	128

Tabelle 18 - Ratingskala und Farbkodierung der Intensität der Änderung des Antwortverhaltens.....	134
Tabelle 19 - Antwortraten für die geschlossenen Fragen des Pre- und Posttests. Das Vorzeichen „+“ bei der Veränderung steht für eine Zunahme, das Vorzeichen „-“ für eine Abnahme der jeweiligen Häufigkeit..	135
Tabelle 20 - Definition und die durchschnittlich relative Häufigkeit der vier Fälle.....	137
Tabelle 22 – Mittelwerte aller geschlossener Fragen im Pre- und Posttest für den Fall 1 („Pre“ und „Post“) sowie die Mittelwerte im Posttest für den Fall 2 („PostNeu“)..	139
Tabelle 23 - Einteilung der Irrtumswahrscheinlichkeiten p. [248, S. 177]	140
Tabelle 24 - Einteilung und Interpretation der Effektstärke nach COHEN. [250]	141
Tabelle 25 - Signifikanzen des t- und Wilcoxon-Tests für die geschlossenen Fragenpaare des Pre- und Posttests sowie das aus den t-Test-Ergebnissen berechnete Cohen's d	141
Tabelle 26 - Einteilung des Korrelationskoeffizienten r sowie deren Interpretation. [248] S. 426	142
Tabelle 27 - Zusammenhängende geschlossene Fragen des Pre- und Posttests ab $r \geq .400$, *** $p < .001$	143
Tabelle 28 - Komponenten der Faktorenanalyse des Pretests.....	144
Tabelle 29 - Komponenten der Faktorenanalyse des Posttests. Die farbliche Kodierung erfolgt anhand der Farbeinteilung der Faktoren des Pretests in Tabelle 28.....	145
Tabelle 30 - Exemplarischer Ablauf für die Vorgehensweise zur qualitativen Inhaltsanalyse nach MAYRING.	147
Tabelle 31 - Antwortverhalten für die Frage 04 sowie Frage 05/06 im Pre- und Posttest.....	148
Tabelle 32 - Subkategorien der drei Dimensionen, Beispiele aus den Erhebungsdaten sowie die Anzahl der Nennungen für die Frage 04 im Pre- und Posttest (Pre/Post) sowie der Frage 06 im Follow-Up-Test (FU). Die mit einem *-markierten Subkategorien sind im Posttest neu hinzugekommen.....	149
Tabelle 33 - Subkategorien der drei Dimensionen, Beispiele aus den Erhebungsdaten sowie die Anzahl der Nennungen für die Fragen 05/06 im Pre- und Posttest (Pre/Post) sowie die Frage 08 im Follow-Up-Test (FU). Die mit einem *-markierte Subkategorie ist im Posttest neu hinzugekommen, die mit **-markierte Subkategorie ist nur im Pretest vorhanden.	151
Tabelle 34 - Anzahl der gestellten Fragen zur Nachhaltigkeit.....	154
Tabelle 35 – Kategorien der Begründungen der Frage 10 im Pre- und Posttest. In Klammern steht die Anzahl der Nennungen.....	156

Tabelle 36 - Kategorien der Begründungen der Frage 08 im Pre- und Posttest bzw. der Frage 05 im Follow-Up-Test. In Klammern steht die Anzahl der Nennungen.....	158
Tabelle 37 – Häufigkeitsverteilungen der Fragen FU01, FU02, FU03 sowie deren graphische Darstellung.....	162
Tabelle 38 - Modus, Median und Mittelwerte für FU01-FU03.....	162
Tabelle 39 - Kategorien von FU07.....	163

NANOTECHNOLOGIE IM KONTEXT EINER
BILDUNG FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG:
VOM KONZEPT ZUR CURRICULAREN INNOVATION
FÜR DEN CHEMIEUNTERRICHT

Anhang

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

JANINA ELISABETH DEGE

aus Salzgitter

Göttingen, 2019

A.1. Copyright-Agreements der Institutionen/Verlage

A.1.1. Genehmigung der Verwendung von Bildmaterial der Bundesregierung

Internetredaktion <Internetredaktion@bpa.bund.de>

20.4.2018 08:39

**WG: Nutzung von Bildmaterial der Bundesregierung - BPA-ID:
[z5WFP6Je8fY=]**

An janina@dege.de <janina@dege.de>

Sehr geehrte Frau Dege,

vielen Dank für Ihre E-Mail und Ihr Interesse an der Nachhaltigkeitsstrategie.
Die Grafik können Sie mit Quellenangabe „Bundesregierung“ verwenden.

Mit freundlichen Grüßen
Die BPA-Internetredaktion

----- Ursprüngliche Nachricht -----

Von: janina@dege.de

Gesendet: Montag, 16. April 2018 19:32:15E-Mail abgeschickt aus dem Webangebot der
Bundesregierung

Absender der E-Mail:
Janina Dege [\[janina@dege.de\]](mailto:janina@dege.de)
Mauerstraße 12
37073 Göttingen
Frau

Betreff: Nutzung von Bildmaterial der Bundesregierung

Nachrichteninhalt:
Sehr geehrte Damen und Herren,

ich würde in meiner Dissertation gerne Ihre Abbildung der "Übersicht der 17 Ziele der nachhaltigen Entwicklung" der Agenda 2030 unter Verweis auf die Bundesregierung verwenden. Allerdings habe ich der Internetseite keine Copyright-Bestimmungen entnehmen zu können, sodass ich Sie bitte, mir, falls gestattet, die Nutzung im Rahmen meiner Dissertation zu genehmigen. Falls die Abbildung keinen Copyright-Bestimmungen unterliegen sollte, bitte ich Sie, mir dies ebenfalls mitzuteilen.

Herzlichen Dank und freundliche Grüße
Janina Dege

A.1.2. Genehmigung der Nutzung von Daten des Verbands der Chemischen Industrie

Betreff: AW: Bitte um Zustimmung von Daten der Broschüre "Chemiewirtschaft in Zahlen"

Von: "Becker, Angelika I." <becker@vci.de>

Datum: 14.05.2018 14:46

An: "Dege, Janina" <jdege@gwdg.de>

Sehr geehrte Frau Dege,

vielen Dank für Ihre Anfrage.

Sie können die genannten Informationen gern für Ihre Dissertation nutzen. Bitte übernehmen Sie dann auch die jeweils angegebenen Quellen.

Falls Sie aktuellere Zahlen benötigen (Jahr 2017) empfehle ich Ihnen die ONLINE-Version des „Chemiewirtschaft in Zahlen“. Diese wird quasi tagesaktuell gepflegt:

<https://www.vci.de/die-branchen/zahlen-berichte/chemiewirtschaft-in-zahlen-online.jsp>

Für Ihre Dissertation wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

Freundliche Grüße

Angelika Becker

VERBAND DER CHEMISCHEN INDUSTRIE e. V.

Abteilung Wirtschaft, Finanzen und IT

Bereich Volkswirtschaft

Mainzer Landstraße 55
60329 Frankfurt

Telefon: +49 69 2556-1500

Telefax: +49 69 2556-1787

E-Mail: becker@vci.de

Internet: www.vci.de und www.chemiehoch3.de

Social Media: [VCI Twitter](#), [VCI YouTube](#), [VCI Facebook](#)

Von: Dege, Janina [mailto:jdege@gwdg.de]

Gesendet: Dienstag, 1. Mai 2018 16:28

An: Becker, Angelika I. <becker@vci.de>

Betreff: Bitte um Zustimmung von Daten der Broschüre "Chemiewirtschaft in Zahlen"

Sehr geehrte Frau Becker,

im Rahmen meiner Dissertation im Bereich der Chemiedidaktik würde ich gerne unter Angabe der Quelle auf folgende Zahlen der "Chemiewirtschaft in Zahlen 2017" des VCIs verweisen, um die Wirtschaftskraft der chemischen Industrie zu unterstreichen: Gesamtumsatz der chemisch-pharmazeutischen Industrie 2016 (184 660,7 Millionen Euro) sowie Anzahl der Beschäftigten im Jahr 2016 (447 064).

Ich bitte Sie, mir dies ggf. zu genehmigen. Falls Sie weitere Informationen benötigen, teilen Sie mir dies gerne mit.

Mit freundlichen Grüßen

Janina Dege

A.1.3. Genehmigung der Verwendung von Bildmaterial des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Betreff: AW: Bitte um Genehmigung der Verwendung von Bildmaterial Ihrer Homepage

Von: <Daniel.Beckmann@dlr.de>

Datum: 27.09.2018 14:35

An: <jdege@gwdg.de>

Liebe Frau Dege,

unter Angabe ebendieser Quelle dürfen Sie die Abbildung gerne verwenden.

Mit besten Grüßen

Daniel Beckmann

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Politikbeziehungen und Kommunikation | Linder Höhe | 51147 Köln

Daniel Beckmann | Redakteur Digitale Medien | Corporate Design

Telefon 02203 601-2466 | Mobil 0174 3270300 | daniel.beckmann@dlr.de

DLR.de

Von: Janina Dege [mailto:jdege@gwdg.de]

Gesendet: Montag, 24. September 2018 13:37

An: Bilddatenbank, Funktional

Betreff: Bitte um Genehmigung der Verwendung von Bildmaterial Ihrer Homepage

Sehr geehrte Damen und Herren,

in meiner Dissertation an der Fakultät für Chemie der Georg-August-Universität Göttingen würde ich gerne ein Bild Ihrer Homepage in überarbeiteter Variante (selbstgezeichnet mit identischem Inhalt) verwenden. Dabei handelt es sich um eine Abbildung unter dem folgenden Link:

https://www.dlr.de/DesktopDefault.aspx/tabid-4744/7841_read-11944/7841_page-2/gallery-1/gallery_read-Image.1.5104/

beziehungsweise diese Abbildung:

← Zurück 2/3 Weiter →




Bild herunterladen: [Hi-Res JPEG \(1,99 MB\)](#)

Beim Sol-Gel-Verfahren werden die flüssigen Ausgangsstoffe Alkoxid, Alkohol, Wasser und ein Katalysator gemischt. Durch Hydrolyse und Kondensation bilden sich Netzwerke kolloidaler Teilchen (Gelierung oder Alterung). Bei der Trocknung wird am Ende die Flüssigkeit aus den Poren der Materials entfernt.

Bild: DLR/Lisinski.

Ich würde mich sehr freuen, wenn Sie mir die Verwendung gestatten würden und mir mitteilen, welche Zitationsweise Sie ggf. wünschen.

Für Fragen oder weitere Informationen kontaktieren Sie mich gerne.

Mit freundlichen Grüßen

Janina Dege

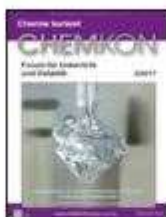
A.1.4. Genehmigung der Nutzung von Bildmaterial des John Wiley and Sons Verlages

Betreff: Thank you for your order with RightsLink / John Wiley and Sons

Von: <no-reply@copyright.com>

Datum: 31.05.2019, 16:27

An: <jdege@gwdg.de>



Thank you for your order!

Dear Janina Dege,

Thank you for placing your order through Copyright Clearance Center's RightsLink® service.

Order Summary

Licensee: Georg-August-Universität Göttingen

Order Date: May 31, 2019

Order Number: 4599390252904

Publication: CHEMKON

Title: Experimente zu Eigenschaften von Nanomaterialien
in Chemieunterricht und Schülerlabor

Type of Use: Dissertation/Thesis

Order Total: 0.00 EUR

View or print complete [details](#) of your order and the publisher's terms and conditions.

Sincerely,

Copyright Clearance Center

Tel: +1-855-239-3415 / +1-978-646-2777
customercare@copyright.com
<https://myaccount.copyright.com>



RightsLink®

A.2. Fragebögen für die Erhebung der Schülerperspektiven

Fragebogen zum Projekt „NanoBiNE“

Lieber Schüler/ Liebe Schülerin,

mit diesem Fragebogen möchten wir eure Erfahrungen zum Thema **Nanotechnologie** im Kontext einer „Bildung für nachhaltige Entwicklung“ untersuchen. Diese Untersuchung findet im Rahmen einer Doktorarbeit statt.

Eure Aussagen sind absolut **anonym** und werden auch nicht schulisch benotet. Es gibt **keine richtigen oder falschen Antworten**, uns ist es nur wichtig, dass ehrliche Antworten gegeben werden. Jede Meinung ist wertvoll für unser Projekt.

Wir danken euch, dass ihr euch Zeit für dieses Projekt genommen habt!

Persönlicher und anonymer Code:

Dein Code wird wie folgt erstellt:

1. Die ersten **zwei Buchstaben** des Vornamens deiner **Mutter**.
2. Die ersten **zwei Buchstaben** eurer **Adresse**.
3. Die ersten **zwei Ziffern** deines **Geburtstages**.

Beispiel:

1.	Name der Mutter:	Sabine	→ SA	<table border="1"><tr><td>SA</td><td>AM</td><td>06</td></tr><tr><td>1.</td><td>2.</td><td>3.</td></tr></table>	SA	AM	06	1.	2.	3.
SA	AM	06								
1.	2.	3.								
2.	Adresse:	Am Steinweg	→ AM							
3.	Dein Geburtstag:	06.11.2008	→ 06							

Dein eigener Code lautet →

Fragebogen zum Projekt „NanoBiNE“

Gib deinen Code an:

Mit den folgenden Fragen möchten wir etwas über deine Einstellung zum Thema „Nano“ und Nachhaltigkeit erfahren.

Kreuze die entsprechende Antwort an.

	trifft voll und ganz zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu	weiß ich nicht
01. Ich weiß in welchen Alltagsprodukten Nanomaterialien verarbeitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
02. Ich weiß weshalb Nanomaterialien in Alltagsprodukten verarbeitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
03. Medien sollten mehr über den Einsatz von Nanomaterialien informieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

04. Erkläre einem Freund stichpunktartig, was du unter Nachhaltigkeit verstehst.

Nachhaltigkeit ist...

-

05. Gib Beispiele, wie du in deinem Leben nachhaltig handelst.

06. Erläutere, über deine beschriebenen Beispiele hinaus, wie du nachhaltig handeln könntest.

07. Nenne die drei wichtigsten Fragen, die du zur Nachhaltigkeit hast.

Deine Meinung ist gefragt.

08. Ein Freund von dir benutzt im Sommer Sonnencreme mit Nanopartikeln. Würdest du ihm die Verwendung empfehlen oder ihm davon abraten?

Ich würde ihm die Verwendung empfehlen, weil...

Ich würde ihm von der Verwendung abraten, weil...

Ich kann ihm keinen Rat geben, weil...

09. Wenn Nanomaterialien in Produkten verwendet werden, haben sie gefährlichen Eigenschaften. ja nein nicht eindeutig

Begründe kurz deine Antwort:

10. Den Kontakt mit Nanomaterialien in Alltagsprodukten versuche ich...

zu vermeiden, weil...

zu verstärken, weil...

Keine Aussage, weil...

Pretest

Zum Schluss möchten wir noch allgemeine Fragen zu deiner Person stellen.

Allgemeine Fragen

In welchem Jahr bist du geboren:

Welches Geschlecht hast du: männlich weiblich

In welche Jahrgangsstufe gehst du:

Fragebogen zum Projekt „NanoBiNE“

Gib deinen Code an:

Mit den folgenden Fragen möchten wir etwas über deine Einstellung zum Thema „Nano“ und Nachhaltigkeit erfahren.

Kreuze die entsprechende Antwort an.

	trifft voll und ganz zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu	weiß ich nicht
01. Ich weiß in welchen Alltagsprodukten Nanomaterialien verarbeitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
02. Ich weiß weshalb Nanomaterialien in Alltagsprodukten verarbeitet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
03. Medien sollten mehr über den Einsatz von Nanomaterialien informieren.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

04. Erkläre einem Freund stichpunktartig, was du unter Nachhaltigkeit verstehst.

Nachhaltigkeit ist...

-

05. Gib Beispiele, wie du in deinem Leben nachhaltig handelst.

06. Erläutere, über deine beschriebenen Beispiele hinaus, wie du nachhaltig handeln könntest.

07. Nenne die drei wichtigsten Fragen, die du zur Nachhaltigkeit hast.

Deine Meinung ist gefragt.

08. Ein Freund von dir benutzt im Sommer Sonnencreme mit Nanopartikeln. Würdest du ihm die Verwendung empfehlen oder ihm davon abraten?

Ich würde ihm die Verwendung empfehlen, weil...

Ich würde ihm von der Verwendung abraten, weil...

Ich kann ihm keinen Rat geben, weil...

09. Wenn Nanomaterialien in Produkten verwendet werden, haben sie gefährlichen Eigenschaften. ja nein nicht eindeutig

Begründe kurz deine Antwort:

10. Den Kontakt mit Nanomaterialien in Alltagsprodukten versuche ich...

zu vermeiden, weil...

zu verstärken, weil...

Keine Aussage, weil...

Kreuze die entsprechende Antwort an.

	trifft voll und ganz zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu	weiß ich nicht
11. Ich möchte mitbestimmen, ob Nanomaterialien in Alltagsprodukten verwendet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
12. Nanomaterialien in Alltagsprodukten verursachen gesundheitliche Probleme.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
13. Mir ist es wichtig mein soziales Umfeld über möglichen Risiken, die von Nanomaterialien ausgehen, aufzuklären.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
14. Nanomaterialien, über die keine Studien zur sicheren Entsorgung oder Recycling vorliegen, sollten nicht verwendet werden.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
15. Ich finde Produkte mit Nanomaterial müssen eine Kennzeichnungspflicht haben.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
16. Mir ist bewusst, dass die Konsequenzen der Eintragung von Nanomaterialien in die Umwelt nicht vollständig geklärt sind.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
17. Mit Hilfe der Nanotechnologie können knappe natürliche Ressourcen eingespart werden. Wir sind dadurch auf sie angewiesen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
18. Der Einsatz von Nanotechnologie bedroht die Artenvielfalt der Tiere.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
19. Durch Nanotechnologie wird der Wohlstand unseres Landes gesichert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
20. Durch die Forschung der Nanotechnologie bleibt Deutschland wirtschaftlich wettbewerbsfähig.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
21. Durch Nanotechnologie werden viele neue Arbeitsplätze geschaffen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
22. Der verantwortungsvolle Umgang mit Nanomaterialien liegt in der Pflicht von:						
• jedem selbst	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
• der Industrie	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
• der Politik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
• der Wissenschaft	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
• andere: _____	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
23. Diese Interessensgruppe hast du im „NanoDialog“ vertreten:						
<input type="radio"/> Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB)						
<input type="radio"/> Deutsche Dermatologische Gesellschaft						
<input type="radio"/> Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland						
<input type="radio"/> Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall						
<input type="radio"/> Bundesinstitut für Risikobewertung						
<input type="radio"/> Verband der Chemischen Industrie						
<input type="radio"/> Verbraucherzentrale Bundesverband e.V.						

Zum Schluss möchten wir noch allgemeine Fragen zu deiner Person stellen.

Allgemeine Fragen

In welchem Jahr bist du geboren:

Welches Geschlecht hast du: männlich weiblich

In welche Jahrgangsstufe gehst du:

Fragebogen zum Projekt „NanoBiNE“

Gib deinen Code an:

Nach dem „NanoBiNE“ Kurs ist nun einige Zeit vergangen. Wir wollen ermitteln, ob sich etwas an deiner Einstellung zur Nanotechnologie verändert hat.

Kreuze die entsprechende Antwort an.

	trifft voll und ganz zu	trifft eher zu	teils-teils	trifft eher nicht zu	trifft gar nicht zu	weiß ich nicht
01. Seit dem Kurs achte ich stärker auf Produkte mit Nanomaterialien.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
02. Seit dem Kurs habe ich sehr viel über die Verwendung von Nanomaterialien mit meinen Eltern/Freunden geredet.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
03. Seit dem Kurs informiere ich mich über die Verwendung von Nanomaterialien in den Medien.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Kreuze die entsprechende Antwort an.

04. Seit dem Kurs konsumiere ich Produkte mit Nanomaterialien...	<input type="radio"/> häufiger	<input type="radio"/> weniger	<input type="radio"/> gleichbleibend
------------------------------------------------------------------	--------------------------------	-------------------------------	--------------------------------------

Begründe kurz deine Antwort:

Deine Meinung ist gefragt.

05. Ein Freund von dir benutzt im Sommer Sonnencreme mit Nanopartikeln. Würdest du ihm die Verwendung empfehlen oder ihm davon abraten?

Ich würde ihm die Verwendung empfehlen, weil...

Ich würde ihm von der Verwendung abraten, weil...

Ich kann ihm keinen Rat geben, weil...

06. Erkläre einem Freund stichpunktartig, was du unter Nachhaltigkeit verstehst.

Nachhaltigkeit ist...

-

07. Seit dem Besuch des Kurses handle ich nachhaltiger.

Ja, weil...

Nein, weil

08. Gib Beispiele, wie du in deinem Leben nachhaltig handelst.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Janina Elisabeth Dege (geb. 01.10.1988 in Salzgitter), dass die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Nanotechnologie im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung: Vom Konzept zur curricularen Innovation für den Chemieunterricht“ von mir selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Alle Ausführungen, die anderen Schriften wörtlich oder sinngemäß entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Darüber hinaus bestätige ich, dass ich mich zuvor weder an dieser noch einer anderen Universität um den Erwerb des Doktorgrades beworben habe und dass ich diese Dissertation weder in dieser noch in einer ähnlichen Form an einer anderen Hochschule eingereicht habe.

Ich bestätige, dass die digitale Version der Dissertation mit der schriftlich eingereichten Version übereinstimmt.

Ort, Datum

Unterschrift