

**Siliciumverbindungen im Chemieunterricht -
Entwicklung und Erprobung von alltagsorientierten, experimentellen
Zugängen**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften

vorgelegt beim Fachbereich Biochemie, Chemie und Pharmazie
der Johann Wolfgang Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

von
Viviane Hoßfeld
aus Frankfurt am Main

Frankfurt am Main 2016
(D 30)

Vom Fachbereich Biochemie, Chemie und Pharmazie der
Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt als Dissertation angenommen.

Dekan: Prof. Dr. Michael Karas
Gutachter: Prof. Dr. Arnim Lühken
Prof. Dr. Michael Tausch

Datum der Disputation: 15.03.2017

Danksagungen

Diese Arbeit wurde unter Betreuung von Herrn Prof. Dr. Arnim Lühken, geschäftsführender Direktor des Instituts für Didaktik der Chemie der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main, in der Zeit von Januar 2013 bis September 2016 angefertigt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Arnim Lühken für die Überlassung des Themas und die in allen Bereichen engagierte Unterstützung meiner Arbeit.

Danken möchte ich auch allen MitarbeiterInnen des Institutes für ihre stete Hilfsbereitschaft und die familiäre Arbeitsatmosphäre. Im Besonderen danke ich Frau Kirsten Fischer und Herrn Dieter Sgoff für die Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten.

Für die vielen fachlichen Diskussionen und die immer freundliche und angenehme Arbeitsatmosphäre danke ich den anderen Doktorandinnen.

Für die Unterstützung meines Werdegangs und die Geduld während der arbeitsintensiven Phasen danke ich meinen Eltern und meinem Mann.

Frankfurt am Main, November 2016

Viviane Hoßfeld

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Kurzzusammenfassung | 1 |
| 1 Einführung | 3 |
| 1.1 Einleitung | 3 |
| 1.2 Zielsetzung | 5 |
| 1.3 Aufbau | 6 |
| 2 Sachstruktur - Ausgewählte fachwissenschaftliche Aspekte der Siliciumchemie | 9 |
| 2.1 Siliciumchemie in der Übersicht | 9 |
| 2.2 Silicone | 10 |
| 2.2.1 Aufbau und Synthese | 10 |
| 2.2.2 Eigenschaften | 13 |
| 2.2.3 Anwendungsmöglichkeiten | 15 |
| 2.2.4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele | 16 |
| 2.2.4.1 Kosmetika | 17 |
| 2.2.4.2 Dichtstoffe | 18 |
| 2.2.4.3 Abformmassen | 20 |
| 2.2.4.4 Backformen | 21 |
| 2.2.4.5 Funktionskleidung | 22 |
| 2.2.5 Wirtschaftliche Bedeutung | 23 |
| 2.3 Silica | 24 |
| 2.3.1 Definitionen und Bezeichnungen | 24 |
| 2.3.2 Eigenschaften von amorphen Silica | 24 |
| 2.3.3 Anwendungsmöglichkeiten | 25 |
| 2.3.4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele | 26 |
| 2.3.4.1 Kosmetika | 26 |
| 2.3.4.2 Bauzement | 28 |
| 2.3.5 Wirtschaftliche Bedeutung | 29 |
| 2.4 Silicium | 29 |
| 2.4.1 Synthese | 30 |
| 2.4.2 Anwendungsmöglichkeiten | 30 |
| 2.4.3 Wirtschaftliche Bedeutung | 31 |
| 2.4.4 Vergleich mit der Kohlenstoffchemie | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 3 Didaktik - Begründung zur Behandlung des Themas im Chemieunterricht | 35 |
| 3.1 Begründung für die Thematisierung der Siliciumchemie im Chemieunterricht | 35 |
| 3.1.1 Fachliche Relevanz | 35 |
| 3.1.2 Bezüge zur Lebenswelt der SchülerInnen und gesellschaftliche Relevanz . . . | 35 |
| 3.1.3 Curriculare Relevanz - Einbindungsmöglichkeiten in Unterrichtsinhalte des Landes Hessen | 37 |
| 3.2 Derzeitiger Stand der fachdidaktischen Forschung | 45 |
| 3.2.1 Silicone | 45 |
| 3.2.2 Silica | 47 |
| 3.2.3 Silicium | 50 |
| 3.2.4 Glas | 52 |
| 3.2.5 Wasserglas | 53 |
| 3.2.6 Silicate | 54 |
| 3.3 Thematische Eingrenzung | 56 |
| 3.3.0.1 Umfragen zur Bekanntheit von Alltagsgegenständen aus Siliciumverbindungen | 57 |
| 3.4 Begründung für neue Experimente | 59 |
| 3.4.1 Bedeutung des Experiments für den Unterricht | 59 |
| 3.4.2 Experimente zur Siliciumchemie | 61 |
| 4 Experimentelle Erarbeitung | 63 |
| 4.1 Silicone | 63 |
| 4.1.1 Besonderheiten von Siliconelastomeren | 63 |
| 4.1.2 Dichtstoffe | 64 |
| 4.1.2.1 Vergleich von verschiedenen Dichtstoffen | 64 |
| 4.1.2.2 Silicondichtstoffe | 65 |
| 4.1.3 Funktionskleidung | 67 |
| 4.1.4 Äquilibration und Recycling | 68 |
| 4.1.5 Abformmassen | 71 |
| 4.1.6 Backform | 72 |
| 4.1.7 Siliconöle | 73 |
| 4.1.7.1 Eigenschaften und Vergleich mit anderen Ölen | 73 |
| 4.1.7.2 Viskositätsvergleich | 74 |
| 4.1.7.3 Beeinflussung einer Schaumbildung | 75 |
| 4.1.8 Silicone in Kosmetikprodukten | 75 |
| 4.1.9 Nicht weiterverfolgte Ansätze | 77 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | Silicone und Silica | 78 |
| 4.2.0.1 | Silicone und Silica in Kosmetika | 78 |
| 4.3 | Silica | 79 |
| 4.3.1 | Nachweis von Silica-Verbindungen in Alltagsprodukten | 79 |
| 4.3.2 | Funktionen von Silica in Zahncreme | 80 |
| 4.3.2.1 | Siliciumdioxid als Bindemittel | 81 |
| 4.3.2.2 | Siliciumdioxid als Schleifmittel | 81 |
| 4.3.3 | Silica in Bauzement | 82 |
| 4.3.4 | Nicht weiterverfolgter Ansätze | 83 |
| 4.4 | Silicium | 84 |
| 4.4.1 | Ätzen von Silicium | 84 |
| 4.4.2 | Leitfähigkeitsuntersuchungen von poly- und monokristallinem Silicium | 85 |
| 5 | Experimentiervorschriften | 87 |
| 5.1 | Silicone | 87 |
| 5.1.1 | Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - Temperaturbeständigkeit | 87 |
| 5.1.2 | Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - Chemikalienbeständigkeit | 89 |
| 5.1.3 | Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Temperatur und Geruch | 90 |
| 5.1.4 | Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Überstreichbarkeit | 92 |
| 5.1.5 | Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Verhalten gegenüber Wasser | 93 |
| 5.1.6 | Silicondichtstoffe - Unterscheidung verschiedener Eliminierungsprodukte | 94 |
| 5.1.7 | Silicondichtstoffe - Nachweis eines alkoholischen Eliminierungsprodukts | 97 |
| 5.1.8 | Silicondichtstoffe - Identifizierung des alkoholischen Eliminierungsprodukts als Methanol | 99 |
| 5.1.9 | Silicondichtstoffe - Nachweis von Essigsäure als Eliminierungsprodukt | 102 |
| 5.1.10 | Modellversuche zu Funktionskleidung - Herstellung | 103 |
| 5.1.11 | Modellversuche zu Funktionskleidung - Überprüfung der wasserabweisenden Eigenschaften | 105 |
| 5.1.12 | Modellversuche zu Funktionskleidung - Überprüfung der schmutzabweisenden Eigenschaften | 106 |
| 5.1.13 | Modellversuche zu Funktionskleidung - Überprüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit | 108 |
| 5.1.14 | Äquilibrierung von Silicondichtstoff | 109 |
| 5.1.15 | Herstellung von <i>Intelligenter Knetmasse</i> | 111 |
| 5.1.16 | Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Präzision | 113 |
| 5.1.17 | Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Dimensionsstabilität | 114 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.1.18 | Siliconöl - Schauminhibitor und Schaumstabilisator | 116 |
| 5.1.19 | Lernzirkel zur Unterscheidung von Ölen | 118 |
| 5.1.20 | Siliconöl und Mineralöl - Vergleich der Viskosität | 123 |
| 5.1.21 | Herstellung von <i>Magischem Sand</i> | 124 |
| 5.1.22 | Entschäumen mit Pflegelotion | 126 |
| 5.1.23 | Glanzoptimierung von Lipgloss | 128 |
| 5.1.24 | Silicontenside in Haarpflegeprodukten | 129 |
| 5.1.25 | Wasserfeste Wimperntusche | 131 |
| 5.1.26 | Deostift ohne Mikro-Schaum | 133 |
| 5.2 | Silicone und Silica | 135 |
| 5.2.1 | Herstellung einer Abgussform mit dem Füllstoff Siliciumdioxid | 135 |
| 5.2.2 | Viskositätseinstellung von Nagellack | 136 |
| 5.2.3 | Herstellung und Modifizierung eines Nagellacks | 137 |
| 5.3 | Silica | 141 |
| 5.3.1 | Qualitativer Nachweis von löslichen Silica in Zahncreme | 141 |
| 5.3.2 | Halb-Quantitativer Nachweis von löslichen Silica in Wasser | 144 |
| 5.3.3 | Thixotropie von Zahncreme | 148 |
| 5.3.4 | Putzkörper in Zahncreme | 150 |
| 5.3.5 | Modellversuch zu dem Zusammenhang zwischen Korngröße von Putzkörpern und Abrieb | 152 |
| 5.3.6 | Wasseraufnahme von Zement in Anwesenheit von Siliciumdioxid | 155 |
| 5.3.7 | Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit von Zement | 156 |
| 5.3.8 | Gelpunktsbestimmung mit einem Blasenviskosimeter | 158 |
| 5.4 | Silicium und Glas | 161 |
| 5.4.1 | Basisches Ätzen von Silicium | 161 |
| 5.4.2 | Saures Ätzen von Glas | 164 |
| 5.4.3 | Elektrische Leitfähigkeit von mono- und polykristallinem Silicium | 166 |

6 Erprobung der Experimente und Unterrichtsmaterialien im Rahmen von Schülerprojekttagen und Lehrerfortbildungen

| | | |
|---------|---|-----|
| | | 169 |
| 6.1 | Lehrerfortbildungen | 169 |
| 6.1.1 | Ablauf | 169 |
| 6.1.2 | Evaluation | 170 |
| 6.1.3 | Lehrerfortbildung „Silicone - Polymerchemie zwischen Anorganik und Organik“ | 170 |
| 6.1.3.1 | Konzeption und Experimentauswahl | 170 |
| 6.1.3.2 | Ergebnisse | 172 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.1.4 | Lehrerfortbildung „Kosmetik - Untersuchung von Zusatzstoffen“ | 172 |
| 6.1.4.1 | Konzeption und Experimentauswahl | 172 |
| 6.1.4.2 | Ergebnisse | 173 |
| 6.1.5 | Lehrerfortbildung „Siliciumchemie im Alltag“ | 174 |
| 6.1.5.1 | Konzeption und Experimentauswahl | 174 |
| 6.1.5.2 | Ergebnisse | 175 |
| 6.2 | Schülerlaborprojekte | 175 |
| 6.2.1 | Science Camp „Fugenmassen, Backform und Zahnpasta“ | 175 |
| 6.2.1.1 | Konzeption des Projekts | 175 |
| 6.2.1.2 | Durchführung und Evaluation | 177 |
| 6.2.2 | WebQuests | 178 |
| 6.2.2.1 | Theoretischer Hintergrund | 178 |
| 6.2.2.2 | WebQuest zu Siliconen in Kosmetika | 179 |
| 6.2.2.3 | WebQuest zu der Siliconbackform | 184 |
| 6.2.2.4 | Durchführung | 184 |
| 6.2.2.5 | Evaluation | 185 |
| 6.2.3 | Produktentwicklung eines Nagellacks | 186 |
| 6.2.3.1 | Theoretischer Hintergrund - Lernfirma | 186 |
| 6.2.3.2 | Konzeption des Projekts | 187 |
| 6.2.3.3 | Durchführung | 190 |
| 6.2.3.4 | Evaluation | 191 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 193 |
| | Abbildungsverzeichnis | 197 |
| | Tabellenverzeichnis | 201 |
| | Literaturverzeichnis | 203 |

Kurzzusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von neuen, experimentellen Ansätzen zur Thematisierung von Siliciumverbindungen im Chemieunterricht, die einen deutlichen lebensweltlichen Bezug aufweisen und moderne Entwicklungen berücksichtigen.

Die Bandbreite der Siliciumverbindungen reicht von den Silicaten im Bereich der Anorganik über elementares Silicium bis hin zu den polymeren Siliconen im Grenzbereich zu der Organik. Diese große Vielfalt an Verbindungen hat eine Vielzahl von Anwendungen in tagtäglichen Produkten zur Folge. Dies sind einerseits relativ bekannte anorganische Baustoffe, wie Zement oder Sand, die schon seit der Antike von der Menschheit genutzt werden. Andererseits werden kontinuierlich neue Anwendungsmöglichkeiten in Alltag und Industrie für Siliciumverbindungen entwickelt, die in der modernen Lebenswelt der SchülerInnen einen festen Platz haben.

Oft ist das Vorhandensein der Siliciumverbindung gar nicht auf den ersten Blick erkennbar, obwohl sie die Eigenschaften eines Alltagsprodukts maßgeblich beeinflussen kann. Dies ist beispielsweise bei Silica-Verbindungen in der Zahncreme der Fall.

Im Chemieunterricht werden, wenn überhaupt, die „traditionellen“ Verwendungszwecke, wie in der Baustoffchemie, thematisiert, weniger dagegen die Funktion von Siliciumverbindungen in innovativen Produkten neueren Datums. Nur zögerlich werden Ansätze zur Thematisierung von Verbindungen, wie Siliconen, im Chemieunterricht etabliert.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden daher auf der Grundlage einer fachdidaktischen Analyse und Diskussion Experimente zu ausgewählten Siliciumverbindungen entwickelt. Dies sind die Silicone, die Silica-Verbindungen und elementares Silicium. Die Experimente lassen sich größtenteils in der Sekundarstufe II in Anlehnung an verbindlich im Lehrplan thematisierte Inhalte in den Unterricht einbinden. Einige Experimente können nach einer angemessenen didaktischen Reduktion auch bereits in der Sekundarstufe I eingesetzt werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Experimente wurden von LehrerInnen und SchülerInnen gleichermaßen erprobt. Es wurden Rückmeldungen zur Versuchen und Versuchsvorschriften eingeholt. Die Ergebnisse der Auswertung wurden zur Optimierung herangezogen.

1 Einführung

1.1 Einleitung

Der Chemieunterricht soll die fachlichen Grundlagen legen, die im späteren Leben zur kritischen Beurteilung von chemischen Fragestellungen oder Anwendungen in Alltag und Technik dienen [1, S.1]. Ein moderner Chemieunterricht soll nicht nur einige wenige SchülerInnen auf eine berufliche Laufbahn in der chemischen Industrie vorbereiten, sondern ganz allgemein allen SchülerInnen Grundkenntnisse vermittelt, die unabhängig von der weiteren beruflichen Ausbildung verantwortungsvolle und kompetente Entscheidungen in naturwissenschaftlich-technischen Fragestellungen ermöglichen. Der Chemieunterricht soll hier „eine Basis für die gesellschaftlich bedeutende Akzeptanz der Chemie schaffen“ [2, S.1] und ein „lebendiges Schulleben mit Öffnung zum gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Umfeld“ eröffnen [1, S.1].

Die Inhalte des Chemieunterrichts sollten dabei aktuelle Forschungsentwicklungen und technologische Trends berücksichtigen und immer wieder entsprechend angepasst werden. Es ist der Auftrag der fachdidaktischen Forschung diese Themen und Gegenstände auf ihre chemische und gesellschaftliche Relevanz zu prüfen und nach einer sinnvollen didaktischen Elementarisierung eine Implementierung im Rahmen des Chemieunterrichts zu schaffen.

Ein solcher forschungsintensiver Bereich ist die Chemie der Siliciumverbindungen, die eine große Bandbreite vielfältiger Verbindungen mit den unterschiedlichsten Anwendungsmöglichkeiten aufweist. Die Chemie der Siliciumverbindungen umfasst neben dem elementaren Silicium alle Silica-Verbindungen und Siliciumdioxid, sowie mineralische Silicate, Glas und Silicone. Die Siliciumverbindungen kommen einerseits in relativ bekannten anorganische Baustoffen, wie Zement oder Sand, zum Einsatz, die schon seit der Antike von der Menschheit genutzt werden. Andererseits werden kontinuierlich neue Anwendungsmöglichkeiten in Alltag und Industrie für Siliciumverbindungen entwickelt, die in der modernen Lebenswelt der SchülerInnen einen festen Platz haben. Diese Siliciumverbindungen prägen immer mehr unsere Lebenswelt und unseren Alltag. Elementares Silicium ist für den Bau energieeffizienter Solarzellen unentbehrlich, wie sie in großen Anlagen (Solarfelder) zur umweltfreundlichen Stromerzeugung genutzt werden. Silicone begleiten uns inzwischen in der Küche als Backform, im Bad im Fugendichtstoff in der Duschkabine oder in Medizinprodukten. Weitere für den Chemieunterricht interessante Trends sind beispielsweise die Einsatzmöglichkeiten von Siliciumdioxid als umweltverträglicher Füllstoff, wie in Zahncreme oder

Papier, um nur einige Anwendungsmöglichkeiten zu nennen.

Die verschiedenen Siliciumverbindungen finden sich in den unterschiedlichsten Gegenständen des täglichen Gebrauchs. In einigen Fällen stellt die Siliciumverbindung offensichtlich den Hauptinhaltsstoff dar, in anderen Fällen ist sie ein Hilfsstoff, der die Anwendungseigenschaften des Gebrauchsgegenstands optimiert, aber nicht immer auf den ersten Blick als Inhaltsstoff erkennbar ist. Dies ist den SchülerInnen oft nicht bekannt und bietet einen Anknüpfungspunkt zur Erläuterung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen der enthaltenen Verbindungen als Basiskonzept in einem kompetenzorientierten Chemieunterricht. Diese Vorgehensweise ist konform mit lebensweltorientierten Ansätzen der Fachdidaktik Chemie wie dem Konzept der Alltagschemie [3] oder dem Konzept *Chemie im Kontext* [4]. Die Entwicklung alltagsorientierter Experimente wird durch die Forderung nach einem kompetenzorientierten Chemieunterricht gestützt.

Die breite Verfügbarkeit, das große Potential der Siliciumverbindungen und die resultierende Lebensweltrelevanz begründen ihre Thematisierung im Chemieunterricht. Es wird daher bei der Entwicklung von neuen Experimenten zu ausgewählten Vertretern der Siliciumchemie ein besonderes Augenmerk auf die Verwendung von Gegenständen, bzw. die Herstellung von Produkten gerichtet, die den SchülerInnen aus dem alltäglichen Gebrauch bekannt sind. Dies soll es den SchülerInnen erleichtern einen Bezug zu diesem Thema herzustellen. Gleichzeitig soll die Untersuchung von Alltagsgegenständen aus der Lebenswelt der SchülerInnen die Motivation steigern.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist die Erarbeitung und Erprobung alltagsorientierter experimenteller Zugänge zu ausgewählten Teilbereichen der Chemie des Elements Silicium für den Chemieunterricht.

Ein Schwerpunkt ist die ausführliche Darstellung der fachdidaktischen Literatur zur Siliciumchemie, welche nicht nur wissenschaftliche Arbeiten, sondern auch die Schulbuchliteratur und Lehrpläne beinhaltet. Auf dieser Grundlage erfolgt die Auswahl von Teilbereichen der Siliciumverbindungen, zu welchen nur wenige experimentelle und thematische Ansätze für den Chemieunterricht vorliegen. Weiter ist ein gründlicher Abgleich mit der fachwissenschaftlichen Literatur hinsichtlich aktueller Entwicklungen und bereits im Alltag gebräuchlichen Gegenständen mit einer oder mehreren enthaltenen Siliciumverbindungen nötig.

Ebenso wird die Bekanntheit verschiedener Alltagsgegenstände aus Siliciumverbindungen bei Lehrkräften aus einer nicht-repräsentativen Befragung berücksichtigt. Es wird dabei untersucht, welche Gebrauchsgegenstände, die eine oder mehrere Siliciumverbindungen enthalten, den Lehrkräften bekannt sind. Dies wurde bei der Auswahl der Themengebiete und der verwendeten Gegenstände zur Erarbeitung experimenteller Ansätze miteinbezogen.

Die Entwicklung von experimentellen Ansätzen zum Thema Siliciumchemie stellt den Schwerpunkt dieser Arbeit dar. Es werden Experimente vorgestellt, welche die chemischen Eigenschaften und die daraus resultierenden Funktionen von Siliconen, Silica und elementarem Silicium in verschiedenen Gegenständen des alltäglichen Gebrauchs, wie beispielsweise Zahncreme oder Silicondichtstoff, zunächst phänomenologisch verdeutlichen. Die Auswertung der Versuche kann auch auf einem komplexeren Elementarisierungsniveau erfolgen.

Die verwendeten Chemikalien und Geräte sind so gewählt, dass ein möglichst großer Bezug zur Lebenswelt der SchülerInnen gegeben ist. Es werden nach Möglichkeit die thematisierten Alltagsgegenstände direkt verwendet. Wenn dies nicht gut umzusetzen ist, wird auf Modellexperimente zurückgegriffen.

Die Einbindung neuer Experimente in den Unterricht sollte in sinnstiftender Art und Weise ermöglicht werden, weshalb für die Erprobung mit SchülerInnen drei kontextorientierte Unterrichtseinheiten entwickelt wurden. Diese folgen dem Anspruch, dass kompetenzorientierter Unterricht auch in den naturwissenschaftlichen Fächern kontinuierlich weiter entwickelt werden soll. Die Unterrichtseinheiten sind mediengestützt konzipiert.

1.3 Aufbau

Im Anschluss an die Einführung werden die wichtigsten fachlichen Grundlagen zu den ausgewählten Bereichen der Siliciumchemie, die der Entwicklung der Experimente zugrunde liegen, vorgestellt. Dies sind die Silicone, Silica und elementares Silicium. Die Siliciumchemie umfasst selbstverständlich weit mehr Verbindungsklassen, deren Beschreibung aber den Rahmen dieser Arbeit überschreiten würde. Hier werden neben zum Verständnis notwendigen fachlichen Hintergründen nur solche Aspekte betont, die auch tatsächlich für die später dargestellten Experimente eine Rolle spielen.

In Kapitel 3 wird das Thema dieser Arbeit aus fachdidaktischer Perspektive begründet. Es wird die Relevanz der Thematisierung der Siliciumchemie für einen modernen Chemieunterricht diskutiert. Eine Darstellung des aktuellen Stands der fachdidaktischen Forschung zu diesem Bereich stellt die Grundlage dar für die Auswahl geeigneter Teilbereiche dieser Thematik zur weiteren Bearbeitung.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Experimente zu Siliconen, Silica und elementarem Silicium werden in Kapitel 4 beschrieben. Neben der Entwicklung der einzelnen Experimente und einer Beurteilung des Gefährdungspotenzials erfolgen ebenfalls eine didaktische Interpretation und eine exemplarische Einordnung in das Kerncurriculum des Landes Hessen für den gymnasialen Bildungsgang. Hier wurde besonders auf einen möglichst großen Alltagsbezug der Themen, aber auch des Materials und der Fragestellungen geachtet. Daneben wurden vereinzelt vorhandene Versuche aus anderen Themengebieten der Siliciumchemie nach einem Abgleich mit der fachwissenschaftlichen Forschung optimiert und variiert. Die einzelnen Versuchsvorschriften finden sich in Kapitel 5.

In Kapitel 6 wird ausführlich die Erprobung von Experimenten und Unterrichtsmaterialien im Rah-



Abbildung 1: Inhalte der Kapitel im Überblick

men von Lehrerfortbildungen und Schülerlaborprojekten beschrieben. Dies beinhaltet auch eine Darstellung der Konzeptionen der Veranstaltungen. Das Kapitel beginnt mit einer kurzen thematischen Einführung der eingesetzten Methoden des *WebQuests* und der *Lernfirma*. Weiter beinhaltet dieses Kapitel eine detaillierte Darstellung der erarbeiteten Materialien.

Die Veranstaltungen wurden mit einer Evaluation zur Akzeptanz der Experimente im Sinne der Qualitätssicherung und Optimierung begleitet, deren Ergebnisse deskriptiv ausgewertet wurden und in Kapitel 6 beschrieben sind.

Die Arbeit schließt mit Kapitel 7, das neben einer Zusammenfassung der relevanten Inhalte auch einen Ausblick auf mögliche sich anschließende Forschungsvorhaben gibt.

2 Sachstruktur - Ausgewählte fachwissenschaftliche Aspekte der Siliciumchemie

2.1 Siliciumchemie in der Übersicht

Die Verbindungen des Elements Silicium lassen sich zunächst grob in rein anorganische Verbindungen und solche Verbindungen einteilen, die anorganische und organische Strukturanteile enthalten. In Abbildung 2 ist eine Übersicht der technisch wichtigsten Verbindungsgruppen in der Siliciumchemie gegeben. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden nach einer fachdidaktischen Bestandsaufnahme und Diskussion experimentelle Ansätze zu Siliconen, Silica, und elementarem Silicium entwickelt. In Kapitel 3 wird die Auswahl ausführlich begründet. Es wird daher im Folgenden nur auf diese Teilgruppen näher eingegangen.

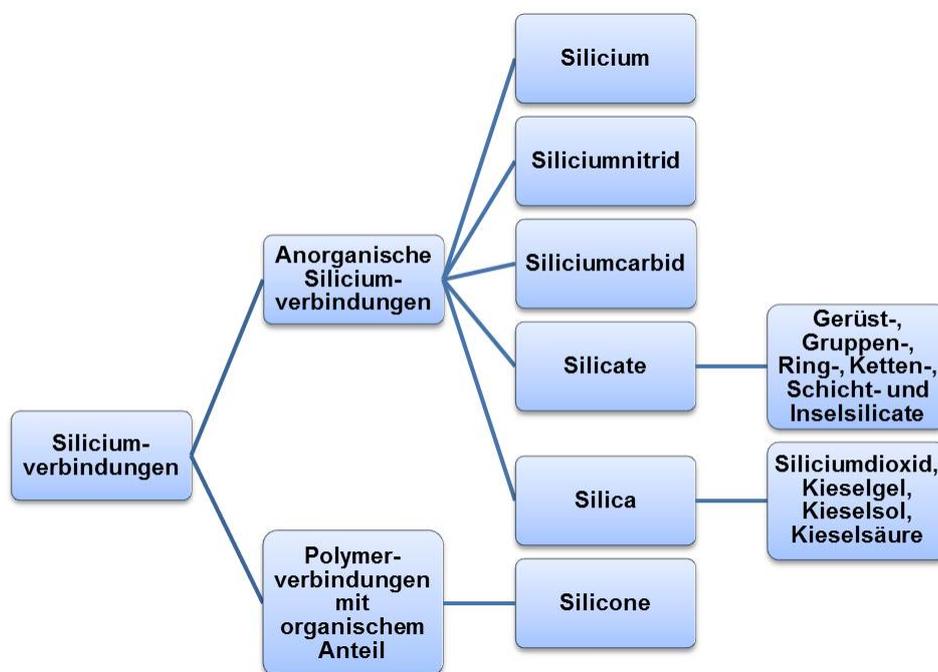


Abbildung 2: Übersicht über die industriell wichtigsten Untergruppen der Siliciumchemie

Das Element Silicium ist nach dem Element Sauerstoff mit etwa 27 % Massenanteil eines der am häufigsten vorkommenden Elemente in der äußeren Erdkruste [5, 366]. Es liegt überwiegend in Verbindung mit Sauerstoff vor. Die meisten dieser Verbindungen sind in die Mineralegruppe der Silicate einzuordnen. Diese sind alle aus der gleichen Struktureinheit aufgebaut, in der ein Siliciumatom tetraedrisch von vier Sauerstoffatomen koordiniert ist. Diese Tetraeder können verschieden große Ringe bilden oder kettenförmig angeordnet sein, so dass ein großes Spektrum

möglicher Strukturen für verschiedene Silicate möglich ist [6, S.119]. Silicium kommt weiter in Verbindung mit Sauerstoff als Siliciumdioxid vor. Elementares Silicium ist nicht in gediegener Form zu finden, sondern wird mittels Reduktionsverfahren aus Silicaten oder Quarzmehl gewonnen.

2.2 Silicone

Die umgangssprachliche Bezeichnung „Silicone“ stammt aus dem technischen Vokabular und leitet sich vom englischen Begriff „silicon keton“ ab. Dieser rührt von einer Annahme, dass man in der frühen Entwicklungsphase der Stoffklasse zunächst von einer strukturellen Analogie zur Kohlenstoffverbindung der Ketone ausging. Tatsächlich werden Doppelbindungen wegen mangelnder Stabilität bei dem Element Silicium jedoch nur unter sehr spezifischen Bedingungen realisiert [7, S.886]. In Siliconen findet man einen polymeren Aufbau mit alternierend verknüpften Silicium- und Sauerstoffatomen. Fachlich korrekt ist die Bezeichnung als „Polysiloxane“ [8, S.512]. Aufgrund der Konventionen in Chemie und Alltag werden die Begriffe „Silicone“ und „Polysiloxane“ fortan in dieser Arbeit synonym verwendet.

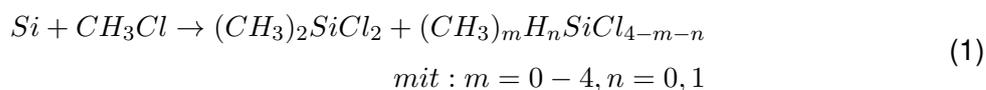
2.2.1 Aufbau und Synthese

Im Folgenden wird auf den Aufbau und die Synthese von Polysiloxanen eingegangen. Anschließend werden die Öle, die Elastomere und die Harze als Silicone mit einem unterschiedlich hohen Vernetzungsgrad vorgestellt.

Die Polysiloxane sind gewissermaßen „Grenzgänger“ zwischen der anorganischen und der organischen Chemie mit einer Bindungsstruktur aus Silicium- und Sauerstoffatomen in den Hauptketten und variablen organischen Seitenkettenstrukturen. Als Seitengruppen können verschiedene Alkylketten, sowie andere organische Molekülgruppen eingeführt werden. Standardmäßig hergestellte Siloxane werden als Diorganopolysiloxane bezeichnet, deren häufigster Vertreter das Dimethylpolysiloxan (PDMS) ist [9, S.1030]. Wenn umgangssprachlich der Begriff Silicone gebraucht wird, dann ist meist PDMS gemeint (siehe Abbildung 3).

Zur industriellen Herstellung werden im ersten Schritt nach dem Müller-Rochow-Verfahren Methylchlorosilane aus elementarem Silicium und Chlormethan unter Verwendung eines Kupferkatalysators synthetisiert [10, S.48], [11, S.12 ff.].

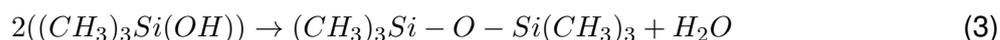
Dies ist vereinfacht in Gleichung 1 gezeigt (nach [9, S.1104]). Dabei entsteht ein Gemisch verschiedener Silane, welches destillativ aufgereinigt wird, da für die weitere Reaktion das Hauptprodukt Dimethyldichlorsilan benötigt wird. Neben verschiedenen anderen Verfahren für die Synthese spezieller Silane, wie unsymmetrischer Verbindungen oder solcher Silane mit empfindlichen Seitengruppen, ist dies die hauptsächlich genutzte Syntheseroute [9, S.1104], [11, S.9].



Im zweiten Schritt werden die gewonnenen Methylchlorsilane zu Silanolen hydrolysiert (siehe Gleichung 2 nach [9, S.1117]).



Unter den Reaktionsbedingungen schließt sich sofort eine Kondensation zu Polysiloxanen mittlerer Kettenlänge an. Dieser Kondensationsschritt ist in Gleichung 3 beispielhaft für Trimethylsilanol gezeigt. Es entsteht immer ein Gemisch aus linearen und cyclischen Siliconen, wobei die Kettenlängenverteilung von der Funktionalität der eingesetzten Methylchlorsilane abhängt [9, S.1122]. Die erhaltenen Polysiloxane sind flüssig und werden aufgrund ihrer Eigenschaften auch als Siliconöle bezeichnet.



Im zweiten Reaktionsschritt lassen sich unpolare Methylgruppen genauso einführen wie funktionalisierte Amino- oder Ethergruppen. Die Polysiloxane können daher passgenau für eine spezielle Anwendung synthetisiert werden, was die Grundlage für die vielfältige Siliconchemie bildet. Diese Vielfältigkeit ermöglicht einen breiten Einsatz für verschiedenste technische Anwendungen, denn je nach Vernetzungsgrad lassen sich flüssige, elastische oder spröde Werkstoffe realisieren.

In Abbildung 3 sind beispielhaft die Strukturformeln von PDMS als Vertreter für ein unpolares Silicon und eines Polyethersiloxans für ein funktionalisiertes Silicon dargestellt. Die Polymere werden normalerweise von Triorganosiloxygruppen terminiert; über zweifach substituierte Endgruppen können jedoch andere funktionelle Gruppen in das Polymer eingeführt werden.

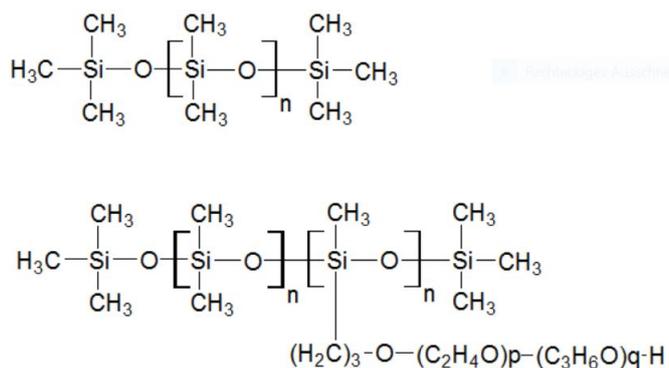


Abbildung 3: Strukturformel eines Polydimethylsiloxans (oben) und eines Polyethersiloxans (unten)

Neben linearen Molekülen existieren, im Gegensatz zu Analoga aus der reinen Kohlenstoffchemie, auch cyclische Siloxa-

ne, die sowohl als Rohstoff in der Siliconherstellung als auch in der Produktverarbeitung eine Rolle spielen [9, S.1190].

Eine einheitliche Kettenlänge von Polysiloxanen wird neben einer destillativen Aufreinigung über sich anschließende Reaktionen, wie Polymerisationen und Depolymerisationen, eingestellt. Die wichtigste Reaktion, die zugleich eine Besonderheit der Siliconchemie darstellt, ist die Äquilibrierung. Dabei wird ein Produktgemisch aus Siloxanen verschiedener Kettenlänge unter meist basischen Bedingungen durch gleichzeitig ablaufende Depolymerisations-, Ringöffnungs- und neue Polymerisationsreaktionen auf eine thermodynamische Gleichgewichtslage eingestellt. Solch ein vollständig äquilibriertes System enthält dann unabhängig von der ursprünglich enthaltenen Menge etwa 15 % cyclische Polysiloxane. [9, S.1172], [10, S.92], [12, S.1].

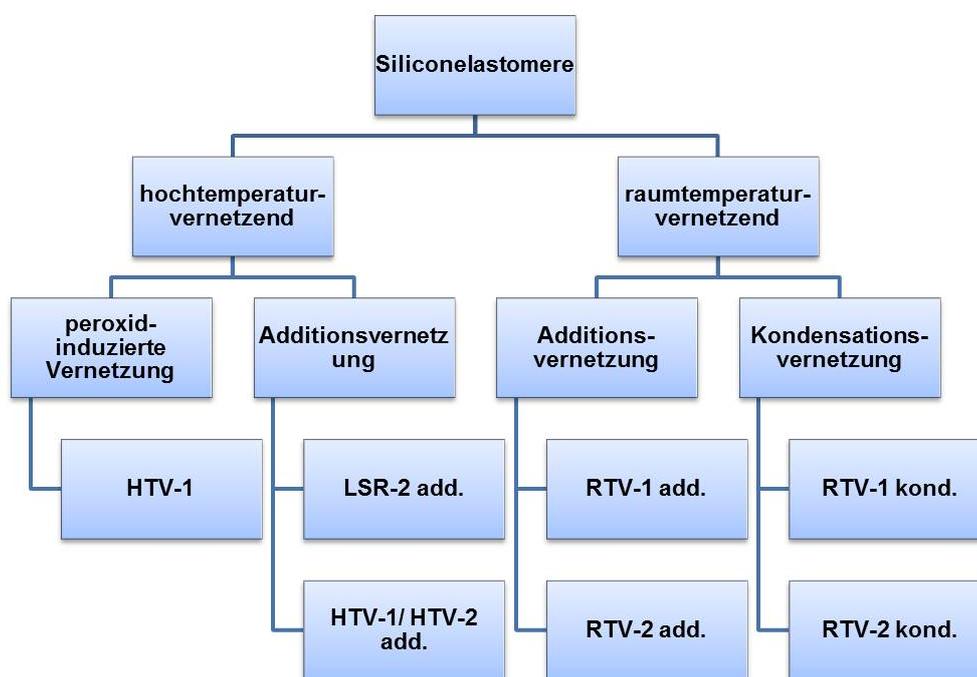


Abbildung 4: Einteilung der Siliconelastomere anhand der Vernetzungsreaktion nach [9, S.1132]

Siliconelastomere werden durch dreidimensionale Vernetzung von linearen Polysiloxanen synthetisiert. Die Elastomere können sich stark in ihren Eigenschaften unterscheiden, auch aufgrund weiterer Bestandteile wie Füllstoffe, Vernetzer oder produktspezifischer Additive, so dass eine Klassifizierung nach den Gebrauchseigenschaften aufgrund der Herstellungsart sinnvoll erscheint (siehe Abbildung 4):

- HTV (high temperatur vulcanizing) oder HCR (high consistency rubber)
- LSR oder LR (liquide silicone rubber)

- RTV (room temperature vulcanizing)

Die Vernetzungsreaktionen werden zunächst anhand der Reaktionstemperatur unterschieden. Unter diesen Bedingungen erfolgt eine Vernetzung in Analogie zur Kohlenstoffchemie entweder über einen radikalischen Mechanismus, über einen Additions- oder einen Kondensationsmechanismus. Exemplarisch werden in Abschnitt 2.2.4 eine Kondensationsreaktion zur Synthese eines RTV-1-Siliconkautschuks, welche während des Aushärtens eines Acetoxy-Silicondichtstoffs abläuft, und eine Additionsvernetzung eines RTV-2-Systems, wie es bei gängigen zweikomponentigen Abformmassen eingesetzt wird, dargestellt.

Der Vernetzungsgrad eines Polysiloxans wird über die Funktionalität der vernetzungsfähigen funktionellen Gruppen bestimmt (siehe Tabelle 1). Während für die Synthese von Siliconölen vor allem mono- und difunktionelle Monomere zum Einsatz kommen, ist bei Siliconelastomeren und -harzen eine höhere Funktionalität notwendig. So ist die Ausbildung eines dreidimensionalen Netzwerks mit eingebetteten cyclischen Strukturen möglich. Die Angabe einer genauen Strukturformel ist aufgrund der Komplexität der Verbindung analog zu den Silicaten nicht mehr möglich.

Tabelle 1: Struktureinheiten zum Aufbau von Polysiloxanen (mit $R = -CH_3$ und $X = -OH$) nach [9, S.1183]

| Monomer | Funktionalität | Symbol |
|-------------|---|--------|
| SiX_4 | tetrafunktionell (räumlich strukturbildend) | Q |
| $R-SiX_3$ | trifunktionell (räumlich strukturbildend) | T |
| R_2-SiX_2 | difunktionell (kettenbildend) | D |
| R_2-SiX | monofunktionell (kettenabbrechend) | M |

2.2.2 Eigenschaften

Die Eigenschaften der Polysiloxane werden zum einen von der Flexibilität und der hohen Bindungsenergie der Silicium-Sauerstoff-Bindung, zum anderen von den Eigenschaften der organischen Seitenketten bestimmt [7], [9, S.1162]. Die Stoffklasse zeichnet sich durch einige sehr herausragende Eigenschaften aus, wie beispielsweise bei Burkhardt [13, S.34] beschrieben:

- hohe thermische Stabilität (bis ca. 250°C, bis ca. -140 °C)
- geringe Entflammbarkeit

- Chemikalienbeständigkeit
- thermooxidative Beständigkeit
- Abhäsivität (Trennwirkung und Haftung auf Untergründen)
- hohe Kompressibilität
- niedrige Oberflächenspannung
- Hydrophobie
- elektrisch isolierende Eigenschaften
- physiologische Unbedenklichkeit

Die Flammpunkte der Silicone liegen im Vergleich mit organischen Polymeren vergleichbarer Kettenlänge bei höheren Temperaturen, so dass diese auch bei Temperaturen von 200 °C über einen längeren Zeitraum funktionsstabil bleiben. Wenn die Silicone schließlich verbrennen, entsteht hauptsächlich das ungiftige Siliciumdioxid [9, S.1161], [14, S.28]. Die Funktionsstabilität erstreckt sich auch auf einen Bereich bis zu ca. -140 °C, da die Flexibilität der Silicium-Sauerstoff-Bindung aufgrund einer niedrigen Rotationsbarriere hoch genug ist, um dies zu ermöglichen [9, S.1170].

Polysiloxane haben mit durchschnittlich 20 mN/m eine noch geringere Oberflächenspannung als Teflon mit 22,5 mN/m. Daraus resultiert ein gutes Spreitvermögen, bzw. eine leichte Verteilbarkeit für flüssige Silicone, die sich daher auf vielen Oberflächen effektiv verteilen lassen [14, S.32].

Silicone sind in den meisten polaren, sowie kurzkettigen organischen Lösemitteln schlecht löslich. Erst bei langkettigen Molekülen ist die Kettenlänge ausreichend, um genügend van-der-Waals-Wechselwirkungen aufzubauen, so dass sich nennenswerte Anteile des Siliconöls lösen.

Siliconöle zeigen im Vergleich zu Mineralölen mit analoger Struktur (bzgl. Kettenlänge und Verzweigung) eine geringere Temperaturabhängigkeit von Eigenschaften wie der Viskosität und der Kompressibilität. Dies ist in der guten Drehbarkeit der Silicium-Sauerstoff-Bindung, sowie der genannten Bindungsenergie zu begründen.

Zu den flüssigen Siliconverbindungen zählen neben Siliconölen auch wässrige Emulsionen und Mikroemulsionen von fließfähigen Siliconharzen. Mikroemulsionen erhält man aus selbstemulgierenden Vorstufen von Siliconharzen und Tensiden. Der Tensidanteil wird hier um ein Vielfaches höher eingestellt als bei einer Emulsion mit herkömmlichen Tensiden. Beim Einbringen in Wasser bilden sich beinahe sofort transparente Emulsionen, die Micellen mit einer Größe von lediglich 10 bis 80 nm enthalten. Die Siliconharze liegen hier in Wasser emulgiert vor, so dass solche Emulsionen ein geringeres Gefährdungspotenzial für die Verarbeitung und Anwendung als herkömmliche

Emulsionen aus organischen Harzen und Lösemitteln aufweisen [9, S.1191].

Siliconelastomere weisen eine hohe Elastizität mit hoher Reißfestigkeit (kleiner als 15 N mm^{-2}) auf, was zunächst geringer ist als bei anderen organischen Elastomeren. Allerdings zeigen Siliconelastomere eine größere Weiterreißfestigkeit, so dass im Vergleich zu anderen organischen Polymeren mehr Kraft für eine Rissbildung aufgewendet werden muss. Die niedrige Glasübergangstemperatur von durchschnittlich -50 °C bedingt eine geringe Temperaturabhängigkeit dieser Eigenschaften unter physikalischen Belastungen, so dass eine zyklische Reproduzierbarkeit gegeben ist [9].

2.2.3 Anwendungsmöglichkeiten

Aufgrund der vielfältigen Eigenschaften kommen Polysiloxane auch in vielen Gebrauchsgegenständen für den Endverbraucher vor. Im Folgenden werden die Einsatzmöglichkeiten skizziert. Siliconöle werden verwendet als [14]:

- Wärmeübertragungsmittel
- Transformatorenöl
- Bremsflüssigkeiten und Hydrauliköle
- Hydrophobierungsmittel (Textilien, Bautenschutz)
- Formentrennmittel
- Hautschutzmittel (Ausbildung einer wasserdampfdurchlässigen Schutzschicht)
- Entschäumer (Waschmittel, Papierherstellung, Kosmetika und Arzneimittel)
- Schaumstabilisatoren (in Kunststoffschäum wie PU-Schaum, Haarshampoo)
- Emulgator (Fassadenbeschichtung) und Mikroemulsionen (Bautenschutz)
- Tensid (Textilveredelung, Kosmetika, Autopolituren)

Siliconöle können aufgrund ihres hydrophoben Verhaltens hervorragend zum Hydrophobieren von Oberflächen eingesetzt werden. Der gleichzeitige Transport von Wasserdampf durch eine Siliconschicht ist trotzdem möglich. Aufgrund der Flexibilität der Silicium-Sauerstoff-Bindung und der Alkylseitenketten können die Polymere mit geringem Energieaufwand gegeneinander verschoben werden, so dass Gasmoleküle die Barriere passieren können. Aus dem gleichen Grund können

Siliconöle bis zu einem gewissen Grad auch als Gasspeicher eingesetzt werden [14, S.60].

Die Siliconelastomere können aufgrund des guten thermoelastischen Verhaltens unter extremen Bedingungen in der Luft- und Raumfahrttechnik eingesetzt werden. Die thermooxidative Beständigkeit ermöglicht die Anwendung in sicherheitsrelevanten Bauteilen wie Brandschutzkabeln. Die chemische Beständigkeit und die toxikologische Unbedenklichkeit wiederum ermöglichen eine Anwendung im Bereich der Nahrungsmittel, Kosmetika und der Medizinprodukte, um nur einige Beispiele zu nennen. Weitere Beispiele für Einsatzmöglichkeiten von Siliconen sind [9, S.1166]:

- Automobilindustrie (Dichtungen, Beschichtungen, Membranen und elektrische Isolierungen)
- Sicherheitskabel
- Elektronik (elektrische Isolierung durch Einbettung von elektrischen und elektronischen Bauelementen z.B. in Mobiltelefonen, Druck- und Schaltmatten als Keypads, Deckbeschichtungen von Solarzellen)
- Medizintechnik (Prothesen, Implantate, Kontaktlinsen, Katheterspitzen, Dichtungen)
- Nahrungsmittelindustrie (Beschichtungen von Backblechen und Backpapier, Küchengeräte, Weinflaschenkorken, Babyschnuller)
- Bauindustrie (Klebstoffe, Dichtmasse für Dehnungs-, Dichtungs-Abschlussfugen, in Betonverbundwerkstoffen, Strukturverfugung von Glasbauten)
- Formenbau (elastische Abformmassen für Kunstgewerbe, Herstellung und Duplikation seriennaher Prototypen, Abformungen für Zahnprothesen, Strukturfassaden)
- Trennmittel (Walzenbeschichtung, Präge- und Druckstempel)

2.2.4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Anwendungsmöglichkeiten von Polysiloxanen in Produkten des täglichen Gebrauchs vorgestellt. Es wird hier explizit auf diejenigen Beispiele eingegangen, die als Grundlage zur Entwicklung von schulexperimentellen Zugängen in Frage kommen. Die Auswahl wird in Kapitel 3 begründet. Die erarbeiteten Experimente werden in den Kapiteln 4 und 5 detailliert beschrieben.

2.2.4.1 Kosmetika

Die Polysiloxane werden über die Öl-Phase in ein Kosmetikprodukt eingebracht, da sie hier gut emulgierbar sind. Die Polymere eignen sich aufgrund vieler verschiedener Eigenschaften als Inhaltsstoff. Im Folgenden werden exemplarisch einige Funktionen vorgestellt. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Anwendungsmöglichkeiten von Siliconen in Kosmetikprodukten (ergänzt nach [15, S.140])

| Eigenschaft | Verwendungszweck in Kosmetikprodukten |
|----------------------------------|--|
| gute Hautverträglichkeit | allgemein |
| hydrophobe Eigenschaften | Erhöhung der Haftungsdauer von Lippenpflegeprodukten |
| erhöhter Weichgriff | Pflegeprodukte für Haar und Haut |
| fimbildende Eigenschaften | Nagellack und Lippenpflegeprodukte |
| niedrige Oberflächenspannung | Verminderung der Bildung von Mikro-Schäumen beim Auftragen von Deodorant und Sonnencreme |
| mäßig rückfettende Eigenschaften | gute Verteilbarkeit bei niedrigem Spreitvermögen Pflegeprodukte |

Dies ist beispielsweise die geringe Temperaturabhängigkeit der Viskosität eines Siliconöls über einen weiten Temperaturbereich im Gegensatz zu einem Mineralöl. Ein solches Polysiloxan kann daher verlässlich als Konsistenzgeber oder zur Einstellung der Viskosität eines flüssigen Kosmetikprodukts wie Shampoo verwendet werden, da die Außentemperatur einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Fließigenschaften des Siliconöls hat.

Die niedrige Oberflächenspannung erhöht die sogenannte Spreitfähigkeit (oder Verteilbarkeit) eines Kosmetikprodukts. Entsprechend modifizierte Kosmetika lassen sich mit weniger Kraftaufwand gleichmäßig auf einer Oberfläche verteilen [16, S.123]. So werden einzelne Haare beispielsweise vollständig umhüllt, so dass sie sich beim Kämmen leichter voneinander trennen lassen. Die Haptik wird ebenfalls verändert, so dass sich eine Oberfläche, die mit einem Siliconöl behandelt wurde, weicher anfühlt.

Silicone mit funktionellen Gruppen, wie Polyethersiloxane, können als Schaumstabilisatoren eingesetzt werden, weil sie hier selbst als lamellenbildendes Tensid fungieren [14, S.37 ff.], [15, S.140], [17].

Pflegeprodukte mit einem Silicon-Inhaltsstoff verbleiben länger auf dem Auftragungsort auf der Haut als vergleichbare Produkte ohne Siliconanteil [17], [18, S.527]. Aufgrund der hydrophoben

Eigenschaften des Silicons dauert ein Abwaschen länger. Gerade bei Pflegeprodukten wird die Bildung einer Schutzschicht gegen Feuchtigkeitsverlust als Vorteil der Verwendung von PDMS betont. Dies wird kontrovers diskutiert, da eine Siliconschicht selbst keinerlei rückfettende, bzw. pflegende Eigenschaften hat, wie es bei einem fetten Öl der Fall wäre [19]. Manche Hersteller setzen auf den kurzfristigen Effekt der angenehmen Haptik und sparen an zusätzlichen Inhaltsstoffen mit rückfettenden Eigenschaften.

Die Polysiloxane werden auch als Filmbildner eingesetzt. Die verwendeten Siliconharze beeinflussen u.a. die Glanzeigenschaften eines Lackes. Sie bewirken die Ausbildung einer besonders glatten Oberfläche, da sie strukturelle Unregelmäßigkeiten aufgrund ihrer geringen Oberflächenspannung besonders gut benetzen und auffüllen. Diese Oberfläche erscheint mit bloßem Auge glatter und glänzender, da auftreffendes Licht gleichmäßig reflektiert wird. Dies wird bei dekorativer Kosmetik wie Lippenpflegeprodukten oder Nagellack genutzt. Die Nebeneffekte der einheitlichen Oberfläche sind eine erhöhte Schlagfestigkeit und Kratzfestigkeit eines Lacks, was eine längere Haltbarkeit der Lackschicht zur Folge hat [9, S.1187], [17], [20].

Funktionalisierte Silicone, wie Polyaminosiloxane, sind im Vergleich zu den hydrophoben PDMS gut wasserlöslich. Sie werden auch als Silicontenside bezeichnet und weisen oberflächenaktive Eigenschaften auf. Diese Tenside bewirken im Shampoo eine Reduzierung der statischen Aufladung nach dem Trocknen des Haars und können leichter mit Wasser abgewaschen werden als Vertreter der hydrophoben PDMS [9, S.1098], [17].

2.2.4.2 Dichtstoffe

Die Fugenmasse ist wohl das bekannteste Alltagsprodukt, das aus Siliconen besteht. Fachlich korrekt wird diese als „Dichtstoff“ bezeichnet. Der Begriff ist im Bereich der Baustoffchemie geprägt worden und dient zur Abgrenzung von Klebstoffen. Solche Fugendichtstoffe aus Siliconen sind seit den 1960er Jahren in Deutschland weit verbreitet.

Umgangssprachlich ist oft von „der“ Siliconfugenmasse die Rede. Tatsächlich gibt es aber eine ganze Reihe von Dichtstoffen, die auf Basis der Vernetzung von Siliconpolymeren arbeiten. Diese unterscheiden sich hauptsächlich in ihrem Vernetzungssystem, bzw. in Füll- und Zuschlagstoffen, da eine Dichtstoffformulierung an die Substrate angepasst wird [21, S.123].

Im Handel erhältlich sind sogenannte einkomponentige Vernetzungssysteme, was sich auf die Anzahl der eingesetzten Siliconkomponenten bezieht. Die luftdicht verschlossene Kartusche enthält ein reaktionsfähiges Präpolymer. Erst bei Kontakt mit der Luftfeuchtigkeit beim Ausdrücken aus der Kartusche reagiert das Präpolymer zu einem wenig reaktiven Polysiloxan, das den eigentlichen Dichtstoff darstellt. Während dieses Aushärtungsvorgangs findet eine Polykondensation von

endgruppenfunktionalisierten Polysiloxanen statt. Dies ist in Abbildung 5 beispielhaft für den bekannten Acetoxy-Silicondichtstoff dargestellt.

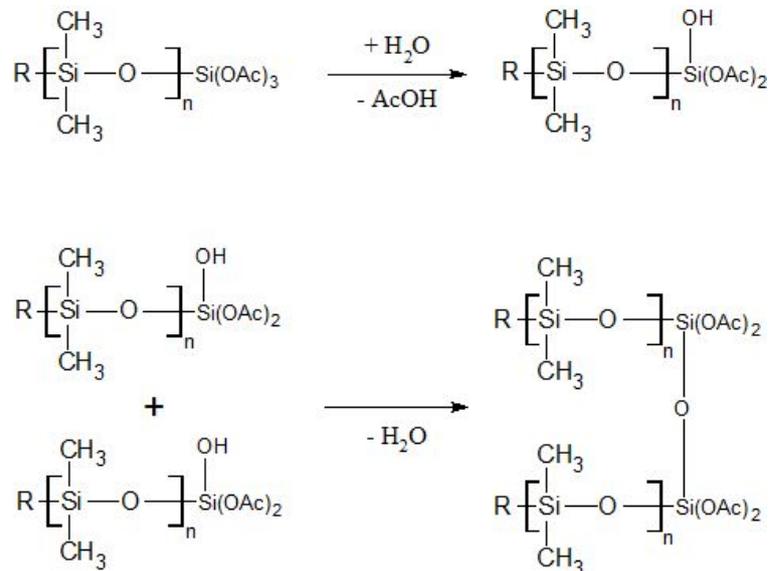


Abbildung 5: Polykondensation des Acetoxy-Silicondichtstoffs verändert nach [9, S.1148]

Die Acetoxy-Gruppe stellt eine gute Abgangsgruppe dar, die durch Reaktion mit Wasser eliminiert wird. Es entsteht Essigsäure als Eliminierungsprodukt. Die Anwendung dieses Dichtstoffs wird daher nicht für säureempfindliche Substanzen wie Marmor oder Kupfer empfohlen. Hier werden andere Vernetzungssysteme eingesetzt, die neutrale oder basische Abgangsgruppen eliminieren [9, S.1149], [21, S.95].

Während bis vor einigen Jahren vor allem Oxim-Systeme weit verbreitet waren, werden diese aufgrund vermuteter Reproduktionstoxizität nun verstärkt von Alkoxy-Systemen abgelöst. Neutrale Systeme kommen vor allem auf Beton, Kunststoffen und Natursteinen zum Einsatz [21, S.127]. In Tabelle 3 ist eine Auswahl der gängigsten Eliminierungsgruppen dargestellt.

Während der Polykondensation werden hier kurzkettige Alkohole eliminiert. Ein Silicondichtstoff mit basischem Eliminierungsprodukt spaltet beispielsweise Amine ab. Die Reaktion verläuft analog wie in Abbildung 5, aber auf den Positionen der Acetoxy-Gruppen befinden sich dann entsprechend Alkoxy- oder Amino-Gruppen.

Generell erfolgt die Auswahl des passenden Silicondichtstoffs anhand des zu verfügbaren Substrats.

Die im Einzelhandel erhältlichen Silicondichtstoffe unterscheiden sich nicht nur aufgrund ihres Eliminierungsprodukts sondern auch in der gesamten Dichtstoff-Formulierung voneinander. Oft sind Zusatzstoffe angepasst an einen speziellen Anwendungszweck zugesetzt. Dichtstoffe für Natur-

Tabelle 3: Auswahl verschiedener Vernetzungssysteme von Silicondichtstoffen nach [9, S.1150]

| Vernetzungssystem | Spaltprodukt | pH-Bereich |
|-------------------|--------------|------------|
| Acetoxy | Essigsäure | sauer |
| Oxim | Oxim | neutral |
| Alkoxy | Alkohol | neutral |
| Isopropenoxy | Aceton | neutral |
| Amid | Amid | neutral |
| Amin | Amin | basisch |
| Aminoxy | Hydroxylamin | basisch |

steine enthalten beispielsweise wenig Weichmacher aufgrund deren hoher Migrationsneigung in das Substrat [22]; Dichtstoffe für den Sanitärbereich enthalten dagegen wasserlösliche Fungizide, um eine Schimmelpilzbesiedelung im feuchten Bad länger zu vermeiden [23].

2.2.4.3 Abformmassen

Silicone können auch zum Abformen von Gegenständen genutzt werden. Bei einem typischen Kopierverfahren dieser Art wird ein Gegenstand in einen noch flüssigen Siliconkautschuk gegeben und nach der erfolgreichen Vernetzung der Masse erhält man eine elastische Blindform des Gegenstands, die nun zum Vervielfältigen mit beliebigen Substanzen wie Gips, Wachs oder Kuchenteig genutzt werden kann. Dieses Verfahren ist bei Kunsthistorikern, wie Zahnärzten gängig. Die Vernetzung des zweikomponentigen Siliconkautschuks kann nach verschiedenen Mechanismen ablaufen (siehe Abschnitt 2.2.1). Exemplarisch wird eine RTV-2-Polyaddition vorgestellt, da viele frei verkäufliche Abformmassen aus diesem System aufgebaut sind. Solche Massen werden im experimentellen Abschnitt der Arbeit thematisiert.

Es werden lineare, endgruppenfunktionalisierte Alkenyl-Polysiloxane, besonders Vinyl-Polysiloxane, mit SiH-funktionalisierten Oligosiloxanen unter Katalyse mit Platin-Komplexen umgesetzt. Der Vernetzungsgrad wird dabei über die Konzentration der Alkenylgruppen gesteuert. Die Reaktion läuft bereits bei Raumtemperatur spontan ab, so dass die Lagerung der beiden Komponenten räumlich voneinander getrennt erfolgen muss.

Die Reaktionsgeschwindigkeit lässt sich durch Erhöhung der Reaktionstemperatur noch steigern und generell über eine Variation des bereitgestellten Katalysators steuern [9, S.1141 f.], [14, S.46 f.],[24, S.53 f.]. In Abbildung 6 ist ein Reaktionsschema dargestellt.

Der Mechanismus der Hydrosilylierungsreaktion mittels Platin-Katalysator gilt inzwischen als aufgeklärt. In der Induktionsphase wird der Katalysatorkomplex abhängig von der Oxidationszahl des Platins und der Struktur der Liganden in die eigentlich katalytisch wirksame Spezies umgewan-

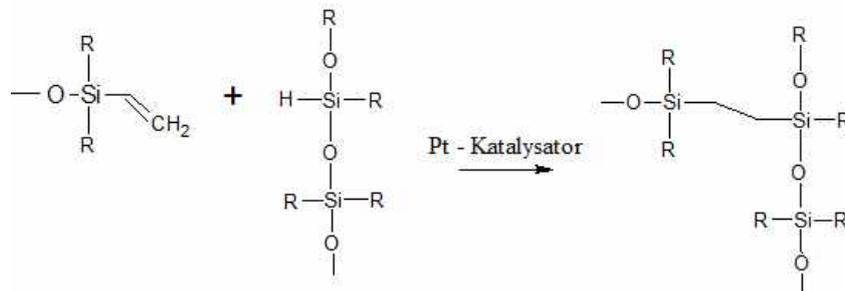


Abbildung 6: Reaktionsschema für eine Polyaddition nach RTV-2 mit Platin-Katalysator nach [14, S.47]

delt, indem eine freie Koordinationsstelle am Platin gebildet wird. Es schließt sich die Hydrosilylierungsreaktion zwischen den SiH-Gruppen des Vernetzers und den Vinylgruppen des linearen Polysiloxans an, die nach dem sogenannten Chalk-Harrod-Mechanismus abläuft [25], [26].

2.2.4.4 Backformen

Neben dem Silicondichtstoff ist die Backform aus Siliconelastomeren ein ebenso allgemein bekannter Gebrauchsgegenstand aus Polysiloxanen. Die elastischen Backformen werden nach dem Prinzip der Negativ-Abformung hergestellt, wie in vorangegangenen Abschnitt über die Abformmasse beschrieben.

Die Verwendung als Backform wird aufgrund der hohen Temperaturstabilität und der toxikologischen Unbedenklichkeit der Silicone ermöglicht. Dies kann auch auf andere Bedarfsgegenstände im Bereich der Nahrungsmitteltechnik übertragen werden [9, S.1167].

Alle Gebrauchsgegenstände, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, müssen die Vorgaben für Lebensmittel- und Bedarfsgegenstände nach § 5 Abs. 1 Nr. 1 des Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände und Futtermittelgesetzbooks (LFGB) vom 01.09.2005 erfüllen [27, S.9]. Die eingesetzten Edukte zur Herstellung der Backform müssen daher einen hohen Reinheitsgrad aufweisen und dürfen möglichst keine flüchtigen Vorläuferverbindungen enthalten.

Das Bearbeitungsverfahren des Temperns schließt sich der eigentlichen Herstellung einer Backform an, um noch enthaltene Nebenprodukte oder Edukte frei zu setzen. Dies wird besonders wegen des vorgesehenen Lebensmittelkontakts empfohlen. Daneben werden die mechanischen Eigenschaften mit dem Ziel der Verlängerung der Lebensdauer einer Backform optimiert [28, S.66]. Ein starker Eigengeruch kann ein Hinweis auf mangelhafte Qualität einer Siliconbackform sein,



Abbildung 7: Backform aus einem Siliconelastomer

da er von enthalten Nebenprodukten des Herstellungsprozesses stammen kann, die wegen einer Einsparung der Nachbearbeitung durch Tempern in der Backform verbleiben können.

Es lassen sich aber nicht alle Arten von Backwerk mit Hilfe solcher Backformen herstellen. Der Teig für Laugengebäck ist zu basisch, so dass die Lebensdauer einer Siliconbackform deutlich verkürzt werden kann. Die Einwirkung des basischen Teigs kann die Oberfläche des Siliconelastomers angreifen [29, S.5].

2.2.4.5 Funktionskleidung

Als Funktionskleidung werden solche Kleidungsstücke bezeichnet, die optimal an eine bestimmte Anwendung angepasst sind [30, S.141]. Die Entwicklung von geeigneten Materialien verfolgt dabei eine Optimierung von Kleidung für die Freizeitgestaltung und bestimmte Arbeitsbedingungen hinsichtlich praktischer, sicherheitstechnischer und gesundheitlicher Aspekte [31]. Das kann beispielsweise im Bereich Tragekomfort oder Pflegeleichtigkeit sein.

Im Hinblick auf physiologische Funktionen rückt der Schutz vor äußeren Klimaeinflüssen bei gleichzeitiger körpereigenen Thermoregulation unter wechselnden Klima- und Tätigkeitsbedingungen gerade im Freizeitbereich verstärkt in der Fokus der Textilindustrie [32, S.43].

Exemplarische werden weitere Anwendungsmöglichkeiten wie Stoffe mit Lichtschutzfaktor, Silberionen gegen Körpergeruch oder Lufteinschluss in Stoff zur Wärmeisolation genannt [33, S.34]. Auch Schutzkleidung wird aus multifunktionalen Stoffen hergestellt [30, S.385]. Dabei sind Materialien, die einen Schutz vor Regen und Wind bieten in Kategorie I, Schutzkleidung für geringeres Risiko gemäß EG-Richtlinie 89/686/EWG für persönlichen Schutzausrüstung (PSA) einzuordnen [30, S.386], [34, S.381 ff.].

Die Idee zur multifunktionalen Optimierung von Kleidungsstücken ist bei weitem nicht neu. Der sogenannte „Ostfriesennerz“ war beispielsweise eine frühe Entwicklung von Wetterschutzkleidung. So bestrich Helly Hansen bereits 1875 Textilien aus Baumwolle mit Ölfarbe, um Matrosen bei der Arbeit auf See vor Wind und Regen zu schützen. Ein weiterer Meilenstein war die Entwicklung von mikroporösen Membranen aus PTFE (Gore-Tex, 1969), die als eine Lage in mehrlagigen Kleidungsstücken eingenäht gleichzeitig winddicht, wasserdicht und atmungsaktiv sind [33, S.34].

Die Entwicklung multifunktionaler Kleidungsstücke erfolgt zum einen durch Einführung von neuem Fasermaterial selbst, zum anderen durch eine Veredelung konventioneller Fasern durch eine Ausrüstung mit einer anwendungsorientierten Beschichtung [35].

Die Polysiloxane können für unterschiedliche Anwendungen eingesetzt werden. Zur Hydrophobierung von Gewebe wird dieses mit einer amphiphilen Chemikalie, wie einem funktionalisierten Polysiloxan, imprägniert, so dass die hydrophilen Strukturanteile mit der Faser in Wechselwirkung treten. Die hydrophoben Strukturanteile sind von der Faser weg ausgerichtet und verhindern ein

Benetzen mit Wasser. Silicone eignen sich besonders gut, da sie für nahezu alle Fasertypen variiert werden können. Die Hydrophobierung dient gleichzeitig als schmutzabweisende Ausrüstung zur Verhinderung einer sogenannten Feuchtanschmutzung verursacht durch färbende wässrige Lösungen.

Eine weitere verbreitete Anwendung ist die Ausrüstung von Textilien zur Erhöhung des Weichgriffs, als eine „gesteigerte Geschmeidigkeit durch weichen, glatten und geschmeidigen Warengriff“ [36, S.72 ff.]. Viele Textilien des täglichen Gebrauchs werden entsprechend ausgerüstet, da eine angenehme Haptik ein angenehmes Tragegefühl verspricht.

Neben der Kleidungsindustrie werden Polysiloxane auch bei der Fertigung von technischen Textilien eingesetzt. Einige Einsatzmöglichkeiten sind Beschichtungen für Airbags, Transportbänder und Medizintextilien [30, S.391 f.].

2.2.5 Wirtschaftliche Bedeutung

Entgegen der verbreiteten Annahme, dass es sich bei den Polysiloxanen um eine wenige Jahrzehnte junge Stoffklasse handelt, wurden erste Synthesen bereits vor über hundert Jahren realisiert. Die Herstellung von sogenannten Organosilanen wurde erstmals von C. Friedel und J. M. Crafts im Jahre 1863 beschrieben. Sie nutzten die ebenfalls gerade erst aufgekommene Grignard-Synthese. Die Organosilane sind die Vorläuferverbindungen der Polysiloxane. Die erste erwähnte Synthese von Polysiloxanen gelang F. S. Kipping im Jahr 1904. Zu dieser Zeit waren die Verbindungen aber von rein akademischer Bedeutung und es wurde ihnen noch keine Bedeutung für technische Anwendungen zugeschrieben.

Industriell wurde die Stoffklasse in den 1930er-Jahren aufgrund ihrer elektrisch isolierenden Eigenschaften zur Imprägnierung von Glasfaserbändern genutzt, womit die Etablierung der Polysiloxane in der Polymerchemie ihren Anfang nahm. Unabhängig voneinander entwickelten daraufhin R. Müller und E. G. Rochow eine Syntheseroute zur Direktsynthese von Chlorsilanen, einer Vorstufe in der Polysiloxan-Synthese, ausgehend von Silicium und Chlormethan, die seit 1947 industriell genutzt wird. Noch heute werden die Verbindungen nach der Müller-Rochow-Synthese hergestellt [9, S.1099].

Ausgehend von der steigenden Verwendung von Siliconharzen als Elektroisolatoren im Flugzeugbau seit dem 2. Weltkrieg nahm und nimmt die wirtschaftliche Bedeutung von Siliconen immer weiter zu. Von 1975 bis 2000 stiegen etwa die Verbrauchsmengen an Siliconen um durchschnittlich 14 % pro Jahr. Die wichtigsten Produktgruppen innerhalb der Siliconchemie sind dabei Dichtstoffe, Elastomere und Öle (linear und cyclisch), die im Jahr 2000 insgesamt 50 % der Siliconprodukte weltweit ausmachten. Nach *Dow Corning* und *General Electric* findet sich die deutsche Firma *Wacker Chemie AG international* an der dritten Stelle der führenden Siliconproduzenten, so dass

diese Sparte der chemischen Industrie auch für die deutsche Wirtschaft von nicht unerheblicher Bedeutung ist [9, S.1002]. Beispielsweise steigerte sich der Gesamtumsatz der Wacker-Sparte *Silicones* von 2011 bis 2013 um ca. 4,9 % [37].

2.3 Silica

2.3.1 Definitionen und Bezeichnungen

In diesem Abschnitt soll synthetisches, röntgenamorphes Siliciumdioxid thematisiert werden. Die Fernordnungsreichweite dieses Siliciumdioxids ist geringer als die Kohärenzlänge von Röntgenstrahlung, so dass mittels Röntgendiffraktometrie keine Aussage zum strukturellen Aufbau gemacht werden kann.

Es ist auch unter der Bezeichnung Kieselsäure (gefällt und pyrogen), Kieselgel oder Kieselzol bekannt (siehe Abbildung 8). Diese Verbindungen unterscheiden sich in ihrem Vernetzungsgrad unter Beteiligung von Wasser. Im englischen Sprachraum werden sie daher unter der Bezeichnung *Silica* zusammengefasst [38, S.850]. Im deutschen Sprachraum ist historisch bedingt die Bezeichnung *Kieselsäure* für röntgenamorphes Siliciumdioxid geläufig. Das ist fachlich nicht richtig, da es sich bei getrocknetem Siliciumdioxid nicht um eine Säure nach Lewis handelt. Dies gilt auch für im Rahmen der Versuche verwendete HDK[®] Kieselsäure von *Wacker Chemie* [39, S.3].

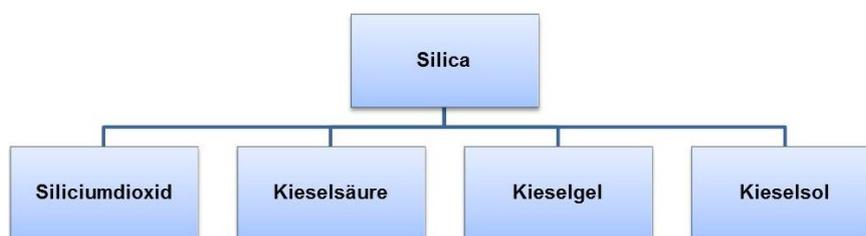


Abbildung 8: Übersicht der Substanzen hinter dem Sammelbegriff *Silica* nach [16, S.123], [38, S.850]

2.3.2 Eigenschaften von amorphen Silica

Alle Arten von Silica sind röntgenamorph. Das kann durch die Bildung von Agglomeraten erklärt werden, die sich beim Trocknen der primär entstandenen Partikeln bilden. Prinzipiell weisen Silica eine große spezifische Oberfläche auf. Je nach Herstellungsprozess kann diese von 50 bis 800 m²g⁻¹ schwanken. Über flammenhydrolytische Methoden kann eine größere spezifische Oberfläche generiert werden, da die mittlere Partikelgröße kleiner ist als bei der Fällungsmethode. Damit

geht einher, dass Fällungskieselsäure ein größeres Porenvolumen hat, also makroporös ist. Der Herstellungsprozess bedingt damit auch mögliche Verwendungszwecke.

Pyrogenes Siliciumdioxid enthält weniger als 1 % Wasser. Das ist auch von der Verteilung der vorhandenen Silanol- und Siloxan-Gruppen abhängig. Die Silanolgruppen-Dichte ist bei flammenhydrolytisch gewonnenen Produkten immer niedriger als bei Fällungsprodukten. Die weiteren Verarbeitungsschritte des Vermahlens und Sichtens bei letzteren tragen ebenfalls zu einer geringeren Silanolgruppen-Dichte bei. Sie haben daher weniger Möglichkeiten intermolekular Wasser zu binden und weisen einen geringeren Trocknungs- und Glühverlust auf [38, S.865 f.], [40, S.467 f.].

Allen Silica-Produkten ist gemeinsam, dass sie für den Menschen nicht toxisch sind. Sie wirken weder auf Augen oder Haut reizend und rufen auch bei oraler Aufnahme keine Veränderungen oder Schädigungen hervor, so dass sie als Zusatzstoff für Nahrungsmittel und Kosmetika zugelassen sind. Die Inhalation von kristallinem Quarzstaub kann bei hohen Konzentrationen und langen, wiederkehrenden Verweildauern zur Silikose („Staublung“) führen. Bei Silica-Staub ist dies nicht bekannt [38, S.872 f.], [41].

2.3.3 Anwendungsmöglichkeiten

Silica finden in der Industrie aufgrund der vielfältigen Eigenschaften breite Anwendung. In Frage kommen Funktionen wie Stabilisierung, Verdickung und Verstärkung beispielsweise bei Kautschuken, Kleb- und Dichtstoffen, sowie Polymeren wie PVC oder diversen ungesättigten Polyestern. Als Füllstoffe können sie einerseits eine verstärkende Wirkung haben, wie beispielsweise in Autoreifen und Schuhsolen. Die Siliciumdioxid-Partikel werden über Bindungen mit Silanen mit dem Kautschuk verknüpft und ermöglichen eine höhere Abriebfestigkeit des Reifens bei erniedrigtem Rollwiderstand und verbesserter Nassrutschfestigkeit [38, S.870 ff.], [40, S.469 ff.], [42].

Die pyrogenen Silica finden ein breites Anwendungsspektrum in der Veränderung des rheologischen Verhaltens von Flüssigkeiten. So wird die Schwefelsäure in Autobatterien mit Siliciumdioxid verdickt, um bei einem Unfall ein Auslaufen zu verhindern. In Farben oder Lacksystemen werden Silica als Thioxotropierungsmittel beigemischt, damit sie sich einerseits leicht verstreichen lassen, andererseits nicht tropfen und schnell trocknen. Denselben Zweck erfüllen sie in Nahrungsmitteln und Kosmetika. Als Zusatz in Farben wird die sogenannte Lagerstabilität erhöht, indem die Pigmentpartikel von Silica umhüllt werden und eine bessere Wechselwirkung mit dem Lösungsmittel ermöglichen. Dies verhindert eine Sedimentierung fester Bestandteile [39], [40, S.469 ff.], [38, S.870 ff.]. Es lassen sich auch optische Effekte wie die Mattierung von Lackoberflächen erreichen [43, S.103].

Aufgrund der großen Oberfläche und der hohen Adsorptionskapazität können Silica in der richti-

gen Dosierung als Träger für Flüssigkeiten fungieren. Dabei können flüssige Substanzen in rieselfähige Pulver überführt werden, wobei bis zu 70 % Flüssigkeit aufgenommen werden können.

Der Einsatz als Fließhilfsmittel für hygroskopische und leicht zum Verbacken neigende Feststoffe geht damit einher. Es werden 0,1 bis 6 % Siliciumdioxid zugesetzt, um eine bessere Rieselfähigkeit und Dosierbarkeit zu erreichen. Hier reichen die möglichen Einsatzgebiete von Feuerlöschpulver und Schwefel über Kalkentferner und Kosmetika bis zu Gewürz- und Molkepulver. In Pulverlacken (z.B. in Farbkartuschen für Laserdrucker) verhindern hydrophobe Silica zusätzlich eine elektrostatische Aufladung. Das Sprühverhalten von Tonern im Laserdruck lässt sich ebenfalls durch den Einsatz von pyrogener Kieselsäure steuern [40, S.469 ff.], [38, S.870 ff.], [39].

In Entschäumungssystemen findet man eine Kombination aus hydrophobierter Silica und Siliconölen. Sie kommen bei technischen Prozessen wie der Papierherstellung oder der Wasserbehandlung zum Einsatz, werden aber auch Produkten für den Endverbraucher beigemischt. Prominente Beispiele sind Flüssigwaschmittel und Weichspüler [40], [17].

2.3.4 Ausgewählte Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele von alltäglichen Anwendungsmöglichkeiten der Silica-Verbindungen detaillierter vorgestellt. Es handelt sich um die Gebrauchsgegenstände, die im weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit zur Entwicklung experimenteller Ansätze herangezogen werden. Die Begründung für die Auswahl dieser Alltagsgegenstände erfolgt ebenfalls in Kapitel 3.

2.3.4.1 Kosmetika

Die Einsatzmöglichkeiten für Silica in Kosmetikprodukten sind so vielfältig wie in anderen Anwendungsfeldern. Silica mit einem sehr feinen Körnungsgrad werden als Stabilisierungsmittel oder Konsistenzgeber in Pflegeprodukten, Shampoo oder Haarstylingprodukten verwendet. Die Silanol-Gruppen auf der Oberfläche der Silica-Partikel können mit der wässrigen Umgebung in Wechselwirkung treten und beeinflussen so die Konsistenz einer Flüssigkeit. Weiter werden sie als Rieselhilfe in allen trockenen Puderprodukten wie Lidschatten und Make-up-Puder eingesetzt (siehe Abschnitt 2.3.3) [16, S.123]. Im Folgenden werden besonders die Einsatzmöglichkeiten in Nagellack und Zahncreme beschrieben, da diese besonders zur Entwicklung von Schulversuchen herangezogen wurden (siehe Kapitel 3).

In einem Lack, wie beispielsweise einem Nagellack, können Silica mit Hinblick auf verschiedene Funktionen als Hilfsstoff in einem Lacksystem eingesetzt werden (siehe Abschnitt 2.3.3). Sie kommen u.a. zur Einstellung von Oberflächeneigenschaften (seidenglänzend oder sogar matt) zum Einsatz. Der Mattierungseffekt kommt dadurch zustande, dass die Siliciumdioxid-Partikel mit

den anderen Lackbestandteilen nicht mischbar sind und während des Trocknungsvorgangs in die Lackoberfläche eingelagert werden. Die resultierende unregelmäßige, auf mikroskopischer Ebene aufgeraute Struktur der Oberfläche hat ein verändertes Reflexionsverhalten für Licht zur Folge. Die Streuung von auftreffendem Licht erfolgt diffuser, so dass die Oberfläche weniger glatt erscheint. In der Folge wird der Glanz herabgesetzt [17], [38, S.870], [43, S.103].

Es finden sich zunehmend solche Lacke mit mattierenden Eigenschaften in Drogeriemärkten unter der Bezeichnung *Effekt-Lacke* [44]. Bei höheren Konzentrationen beeinflusst der Einlagerungsvorgang der Silica-Partikel den Vorgang der Filmbildung während des Trocknens und es kommt zur Rissbildung in der Lackoberfläche. Dies ist für die übliche Anwendungen von Lacken unerwünscht, wird aber aus ästhetischen Gründen bei speziellen Nagellacken, den sogenannten *Crackling-Lacken*, genutzt [45].

Silica finden sich heutzutage in veränderlichen Konzentrationen in beinahe jeder kommerziell erhältlichen Zahncreme und können die Funktion eines Bindemittels sowie eines Poliermittels erfüllen (siehe Abbildung 9) [16, S.123]. Ein Bindemittel verhindert eine vorzeitige Trennung der einzelnen Komponenten und sorgt für Lagerstabilität.

Als Bindemittel beeinflussen die Silica direkt das thixotrope Verhalten der Zahncreme. Ohne einen solchen Füllstoff würde diese aus der geöffneten Tube ausfließen. Die Beimischung von Silica verhindert dies, indem die Viskosität erhöht wird. Derartig verdickte Flüssigkeiten verhalten sich wie Nicht-Newtonsche Flüssigkeiten, d.h. sie zeigen unter Einwirkung einer äußeren Kraft ein anderes Viskositätsverhalten [46, S.111]. Im Ruhezustand bilden sich Wasserstoffbrücken-Bindungen zwischen der Oberfläche der Silica-Partikel und der wässrigen Umgebung aus. Die Viskosität nimmt zu, so dass das Fließverhalten gehemmt wird. Bei Krafteinwirkung werden diese Wasserstoffbrücken wieder getrennt und die Flüssigkeit verhält sich weniger viskos.

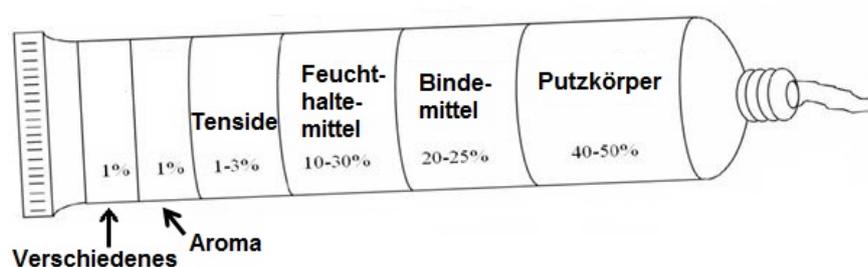


Abbildung 9: Inhaltsstoffe einer Zahncreme verändert nach [47]

Die Putzkörper oder Schleifmittel ergänzen die aktiven Inhaltsstoffe und die chemische Wirkung der Tenside um eine mechanische Reinigung der Zähne von Zahnbelag (Plaque), Essensresten und Verfärbungen. Es werden hauptsächlich unlösliche anorganische Bestandteile wie feinörniges

Siliciumdioxid eingesetzt. Die Partikelgrößen der eingesetzten Stoffe variieren zwischen 1 und 15 μm . Die Korngröße wird möglichst klein gewählt, da das Dentin der Zähne selbst nicht durch eine zu intensive Schleifwirkung angegriffen werden soll [48, S.180 ff.]. Es finden sich verschiedene Zahncremes am Markt, die Silica als Poliermittel enthalten, sich in der Korngröße und Härte des verwendeten Silica aber deutlich voneinander unterscheiden, was unterschiedliche Abriebeigenschaften zur Folge hat [49].

2.3.4.2 Bauzement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel mit großer Bedeutung für die Bauindustrie. Vereinfacht dargestellt wird Zement aus Kalk und Ton gewonnen, ergänzt durch den Zusatz von Sekundärstoffen wie Flugasche oder Hochofenschlacke. In mehreren Schritten wie Trocknen, Mischen und Mahlen erhält man zunächst das sogenannte Rohmehl. Es wird in einem Drehrohrföfen, eine geneigte von außen beheizte Stahlröhre, bei Temperaturen von bis 1450 °C erhitzt. Von den verschiedenen Reaktionen, die in Abhängigkeit zur Temperatur ablaufen, werden nur die wichtigsten genannt: Während des Erhitzens erfolgt bei 600 bis 900 °C die Umsetzung von Calciumcarbonat zu Calciumoxid und Kohlenstoffdioxid. Bei höheren Temperaturen bilden sich die verschiedenen Silicate (besonders Tri- und Dicalciumsilicat), beim anschließenden Kühlen die Aluminate (wie Tricalciumaluminat). Es entsteht der Zementklinker, der fein gemahlen schließlich als Zement bezeichnet wird. Die verschiedenen Arten von handelsüblichem Zement werden über den Massenanteil reinen gemahlten Zementklinkers und über die Zusätze definiert [50, S.61 ff.].

Zement wird in der Praxis immer mit Sand oder Kies unterschiedlicher Körnung, Wasser und weiteren an die jeweilige Anforderung angepassten Zuschlagstoffen verarbeitet. Beim Aushärten erfolgt die Reaktion zwischen Zementklinker und dem Sand- und Kiesbestandteil.

Die zu erreichende Festigkeit hängt direkt davon ab, wie viel Wasser bei der Verarbeitung zugesetzt wird (Wasser-/Zement-Wert). Tendenziell ergibt ein geringer Wasseranteil eine hohe Festigkeit, der Baustoff lässt sich aber schlecht verarbeiten und muss mit Fließverbesserern versetzt werden. Ein hoher Wasseranteil führt zu einer guten Fließfähigkeit, aber einer geringeren Endfestigkeit.

Nach Zugabe von Wasser zum Zementklinker erhält man den sogenannten Zementleim, in dem sofort der Ablauf von Hydratationsreaktionen beginnt. In der ersten Phase bilden sich dünne Schichten aus Calciumsilicathydraten und Calciumaluminatsulfathydraten; der Zementleim steift an. In der zweiten Phase wachsen diese Partikel weiter an. Nach etwa vier Stunden setzt mit der dritten Phase das Erhärten ein, da die wachsenden Kristalle Faserbüschel und blattartige Strukturen bilden, die einzelne Zementpartikel miteinander verbinden. Im Verlauf von bis zu 28 Tagen verdichtet sich dieses noch labile Grundgefüge, die Festigkeit des Betons nimmt weiter zu [50, S.114 ff.].

Zementmehl enthält bereits Siliciumdioxid in Form von Silicaten. Im Zement reagiert dieses Siliciumdioxid analog wie ein Silicat aus dem Zementmehl mit Calciumoxid, bzw. dem sich daraus bei Wasserzugabe bildenden Calciumhydroxid. Durch die große spezifische Oberfläche des Siliciumdioxids erfolgt diese Reaktion sehr schnell. Eine verbesserte Frühfestigkeit von Zement wird erreicht, da sich faserig vernetzte Kristalle aus Calciumsilicathydrat bilden. Vereinfacht kann man die ablaufenden Reaktionen folgendermaßen darstellen:



Ein Hinweis auf diese vergleichsweise schnell ablaufende Reaktion ist der Temperaturanstieg in frischem Zement, der ohne die Zugabe von Siliciumdioxid geringer ausfällt.

Gleichzeitig sorgt das pyrogene Siliciumdioxid für eine leichtere Verarbeitung. Es kommt der bekannte thixotrope Effekt zum Tragen, der die Fließeigenschaften des Werkstoffs verändert. Beim Gießen von Beton wird eine Entmischung der Bestandteile und ein Austreten von Wasser (sog. "Bluten") vermieden [51]. Auch die Rissbildung durch ungleichmäßiges Schrumpfen beim Aushärten oder durch Absetzen von Füllstoffen und Pigmenten wird vermindert [52].

2.3.5 Wirtschaftliche Bedeutung

Während Kieselgele bereits vor dem 1. Weltkrieg industriell hergestellt wurden, begann die Arbeit an Verfahren zur technischen Herstellung von amorphem Siliciumdioxid erst kurz vor dem 2. Weltkrieg. Die Firma *Degussa* entwickelte schließlich 1942 ein Verfahren zur Synthese von pyrogenem Siliciumdioxid. Die Motivation war die Entwicklung eines vom Erdöl unabhängigen Verfahrens zur Herstellung eines Ersatzstoffs für Ruß als Füllstoff in Autoreifen, was heute aus Gründen des Umweltschutzes wieder modern ist. Man spricht daher auch vom "weißen Autoreifen".

Heute werden jährlich weltweit etwa $1,5 \cdot 10^6$ t (Jahresproduktion 2002) der sogenannten synthetischen amorphen Silicas (SAS) hergestellt. Bekannte Handelsprodukte der Fällungsprodukte sind *Ultrasil*[®] von *Evonik Industries* und *Vulcasil*[®] von *Lanxess* (ehemals *Bayer*). Unter den pyrogenen Silica sind dies *Aerosil*[®] von *Evonik Industries* oder *HDK*[®]-Kieselsäuren von *Wacker-Chemie* [38], [40].

2.4 Silicium

Das Kapitel zum elementaren Silicium fällt kürzer aus als die vorangegangenen Kapitel zu Siliconen und Silica und gibt nur einen kleinen Einblick in die Chemie des Siliciums. Dies wird mit der Schwerpunktsetzung der experimenteller Erarbeitung begründet, da überwiegend experimentelle Ansätze für Verbindungen aus den Gruppen der Silicone und der Silica entwickelt wurden.

2.4.1 Synthese

Der Ausgangsstoff für die Synthese von Silicium ist überwiegend Quarz. Technisch wird das sogenannte Rohsilicium auf elektrothermischem Wege durch Reduktion von Quarz mit Kohlenstoff nach folgender Gleichung gewonnen:



Im Technikum oder unter Laborbedingungen wird Magnesium als Reduktionsmittel eingesetzt: [5, S.418], [7, S.877], [38, S.853]:



Für metallurgische Anwendungen ist das gewonnene Silicium mit einer Reinheit von 96 % bis 99,1 % rein genug [53]. Für eine Verwendung in der Photovoltaik oder der Elektrotechnik erfolgt eine Aufreinigung über eine Umsetzung zu leicht flüchtigen Verbindungen, wie Trichlorsilan, das destillativ gereinigt werden kann (siehe Gleichung 7).



Anschließend kann durch Reduktion mit Wasserstoff wieder elementares Silicium zurückgewonnen werden [7, S.854]. Dieses polykristalline Reinstsilicium wird auf beheizbaren, stabförmigen Trägern abgeschieden [53, S.11].

Die elektrische Leitfähigkeit von Silicium-Einkristallen ist der von polykristallinem Reinstsilicium deutlich überlegen, weshalb zur Herstellung von elektronischen Bauteilen und auch immer mehr zur Herstellung von Solarmodulen Silicium-Einkristallen verwendet werden. In polykristallinem Silicium treffen viele Kristallgitter unterschiedlicher kristallographischer Orientierung zusammen, während ein Einkristall eine einheitliche Fernordnung über den gesamten Kristall hinweg aufweist. Solche Siliciumkristalle werden aus polykristallinem Reinstsilicium nach verschiedenen Züchtungsmethoden hergestellt.

2.4.2 Anwendungsmöglichkeiten

Sogenanntes technisches Silicium ist ein Legierungsbestandteil für Werkzeugstahl o.ä., besonders wichtig ist Ferrosilicium als Grundlage für die Stahlherstellung. Außerdem wird es auch als Ausgangsverbindung zur Synthese weiterer Siliciumverbindungen genutzt.

Neben der industriellen Verarbeitung dient es als Ausgangsmaterial für die Herstellung von monokristallinem Silicium. Hier sind das Tiegelzieh-Verfahren (oder Czochralski-Verfahren) und das

Zonenziehverfahren nach Pfann zu nennen. Mit diesen Methoden wird die Reinheit des Siliciums erhöht und die Wachstumsrichtung des Kristalls optimiert. Die nach beiden Verfahren gewonnenen, hochreinen Einkristalle werden in weiteren Arbeitsschritten wie Schneiden, Ätzen, Trennen, Polieren und Reinigen zu Scheiben verarbeitet. Diese dienen als Grundlage zur Herstellung elektronischer Bauelemente für integrierte Schaltkreise oder für Solarelemente [54].

Hochreines Silicium kommt in der Photovoltaik-Industrie zur Herstellung von Solarzellen und als Halbleiterelement für elektronischen Bauteile zum Einsatz [7, S.880], [55, S.846]. Gerade auf diesem Sektor hat der Werkstoff Silicium eine herausragende Stellung, da er hochrein und in einer guten Kristallqualität hergestellt werden kann [55, S.846].

2.4.3 Wirtschaftliche Bedeutung

Silicium wird mit einem Marktanteil von 62 % in China produziert. Weltweit hat im Jahr 2012 allein Deutschland über 230.000 t hochreines Silicium importiert. Dazu kommen noch einmal beinahe 250.000 t Ferrosilicium. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate der Raffinerieproduktion hat allein in China von 1998 bis 2012 um 11,8 %, weltweit um 9,5 % zugenommen [56]. Neben der direkten Verwendung von technischem Silicium verarbeitet die chemische Industrie Silicium zur Erzeugung von Reinstsilicium oder zur Synthese von Siliconen und anderen Siliciumverbindungen.

2.4.4 Vergleich mit der Kohlenstoffchemie

Abschließend soll ein Vergleich der Chemie des Siliciums mit der Chemie des Kohlenstoffs vorgenommen werden. Einführend werden die prägnantesten Unterschiede genannt. Es können Parallelen und Unterschiede zwischen den beiden Gruppenhomologen aufgezeigt werden, die mögliche Anknüpfungspunkte für den Einsatz im Chemieunterricht liefern. Die theoretische Betrachtung der beiden Elemente ausgehend von der Einführung des Periodensystems der Elemente in der Sekundarstufe I bietet sich als ein möglicher Zugang zu der Siliciumchemie im Unterricht an.

Das Element Silicium wird im Periodensystem der Elemente in der 4. Hauptgruppe, bzw. der 14. IUPAC-Gruppe, aufgeführt. Elementares Silicium liegt bei Raumtemperatur in einer kubischen Diamantstruktur mit einer Gitterkonstante von 0,357 nm als sogenanntes α -Silicium vor [38, S.844]. Silicium ist ein Halbmetall und damit ein typischer Halbleiter [7, S.878]. Es ist mit einer Mohshärte von 6,5 ein hartes Material [57, S.20].

In Form seiner Verbindungen wird es als essenzielles Spurenelement mit Wirkung auf das Wachstum von Knochen und Haaren aufgenommen.

Silicium verbrennt bei Anwesenheit von Sauerstoff erst bei Temperaturen über 1000 °C zu Siliciumdioxid. Es verhält sich inert gegenüber den meisten, nicht-oxidativen Säuren, da sich im ersten Reaktionsschritt eine Passivierungsschicht aus Siliciumdioxid bildet, die einen weiteren Angriff verhindert. Im Gegensatz dazu löst sich Silicium in heißen Laugen sehr leicht unter exothermen Bedingungen unter Freisetzung von Wasserstoff [7, S.879 f.].

Ein Vergleich mit dem leichteren Gruppenhomologen Kohlenstoff zeigt Gemeinsamkeiten, vor allem aber deutliche Unterschiede im chemischen Verhalten. Es gibt Analogien in der Elektronenkonfiguration des Grundzustandes (s^2p^2) im 3P_0 -Grundterm und einer ähnlichen Energiedifferenz zwischen den s- und p-Valenzorbitalen (5,3 eV für Kohlenstoff und 5,4 eV für Silicium), was sich in vielen analog zusammengesetzten Verbindungen wie EH_4 , EO_2 und EO widerspiegelt (E = Si oder C) [7, S.882 ff.].

Die Elemente unterscheiden sich hingegen vom leichteren zum schwereren Element in einer Erniedrigung der Elektronegativität, der abnehmenden Bindungsbereitschaft des s-Valenzorbitals, der Erniedrigung der Ionisierungsenergie und der Zunahme der Elektronenaffinität. Bei [7] heißt es dazu, es sei erst das „abweichende Verhalten des Siliciums und seiner Verbindungen, das siliciumhaltige Massengebrauchsgüter wie Halbleiter, Silicate (Beton, Ton, Keramik, Gläser, Wasserglas) bzw. Silicone nützlich“ macht [7, S.882].

Bei einem Vergleich der Verbindungen von Kohlenstoff und Silicium mit Wasserstoff kann eine Umkehrung der Bindungspolarität von der Kohlenstoff-Wasserstoffbindung zu der Silicium-Wasserstoffbindung beobachtet werden, da sich der Wasserstoff hinsichtlich seiner Elektronegativität betrachtet zwischen den beiden Elementen findet. Die Bindungspolarität ändert sich wegen kürzerer Bindungsabstände und gleichzeitig zunehmender Bindungsenergie, sowie eines größeren Bindungswinkels. Aus dem gleichen Grund ist Silanol eine stärkere Säure als Methanol.

Die Abnahme der Bindungsbereitschaft des s-Valenzorbitals von Kohlenstoff zu Silicium führt zu einer wachsenden Stabilität der hypovalenten Verbindungen, so dass Silylene beispielsweise leichter komproportionieren als Carbene. Die Beteiligung der d-Valenzorbitale des Siliciums zur Erhöhung der Koordinationszahl bedingt wiederum eine erhöhte Neigung zur Aufweitung der Koordinationssphäre, so dass nucleophile Substitutionen im Vergleich zum Kohlenstoff bevorzugt und sehr rasch ablaufen können. Obwohl die Bindung zwischen Silicium und Chlor in Siliciumtetrachlorid stabiler ist als in der analogen Kohlenstoffverbindung Tetrachlorkohlenstoff, ist Siliciumtetrachlorid deutlich hydrolyseempfindlicher. Die Bindungsverhältnisse in hypervalenten Siliciumbindungen sind nach quantenmechanischen Berechnungen trotzdem nicht von einer Beteiligung der d-Valenzorbitale geprägt. Stattdessen ist von Mehrzentrenbindungen auszugehen [7, S.882 ff.], [58].

Die Neigung zur Bildung von $p_\pi - p_\pi$ -Mehrfachbindungen ist bei Kohlenstoff stark, bei Silicium

nur gering ausgeprägt. Aufgrund zunehmender Atomradien und größerer Bindungslänge wird die Überlappung zwischen p_{π} -Orbitalen vom Kohlenstoff zum Silicium zunehmend diffuser. Vergleicht man Verbindungen von Kohlenstoff und Silicium, so stehen oft monomere ungesättigte Kohlenstoffverbindungen und polymere Siliciumverbindungen mit Einfachbindungen gegenüber. Dies sind beispielsweise Ethylen und Polysilylen, Ketone und Silicone oder Kohlenstoffdioxid und Silicate. Nur unter extremen Bedingungen (hohe Temperaturen und niedrig Drücke) sind Mehrfachbindungen zwischen Siliciumatomen darstellbar, die allerdings während des Abkühlens ohne geeignete Gegenmaßnahmen polymerisieren. Nur bei tiefen Temperaturen lassen sich Mehrfachbindungen zwischen Siliciumatomen aufgrund der hohen sterischen Abschirmung geeigneter Substituenten stabilisieren [58], [59], [60].

Bei den Substanzen, die aus Silicium und Sauerstoff aufgebaut sind, handelt es sich um kovalente Feststoffe. Hier sind die Atome über Einfachbindungen mit $p_{\pi} - d_{\pi}$ -Charakter verbunden [6, S.9], [61, S.54].

3 Didaktik - Begründung zur Behandlung des Themas im Chemieunterricht

In diesem Abschnitt wird die Thematisierung der Siliciumchemie im Schulunterricht aus didaktischer Sicht unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte begründet. Es wird der aktuelle Stand der fachdidaktischen Forschung wiedergegeben und als Grundlage zur Auswahl und Eingrenzung der Themengebiete für die experimentelle Erarbeitung herangezogen.

3.1 Begründung für die Thematisierung der Siliciumchemie im Chemieunterricht

3.1.1 Fachliche Relevanz

Die Siliciumverbindungen sind von den anorganischen Festkörperverbindungen mit kristalliner Struktur, wie den Silicaten, über amorphe Verbindungen, wie Glas, bis hin zu den Siliconen in der Polymerchemie sehr unterschiedlich aufgebaut. Entsprechend breit gefächert sind die Einsatzmöglichkeiten im Alltag (siehe Kapitel 2). Dies bietet eine Vielzahl von Anknüpfungsmöglichkeiten für den Chemieunterricht.

Seit Jahrhunderten werden Siliciumverbindungen von den Menschen für Anwendungen im Alltag genutzt. Die Verwendung von Silicaten, wie in Sand und Zement, als Baustoffe ist weltweit seit langem bekannt. Die industrielle Nutzung von elementarem Silicium und Siliconen beginnt zwar jüngeren Datums, bietet aber immer noch Raum für die Entwicklung innovativer Produkte.

Neben den wissenschaftlichen und technischen Aspekten der Siliciumchemie sind auch deren Umweltaspekte für den Unterricht des Faches Chemie von Bedeutung. So lassen sich die Silica-Verbindungen beispielsweise als umweltfreundliche Füllstoffe einsetzen (siehe Kapitel 2.3.1). Andererseits kann man die Problematik des Recyclings von Kunststoffen anhand der Silicone diskutieren (siehe 2.2.2).

3.1.2 Bezüge zur Lebenswelt der SchülerInnen und gesellschaftliche Relevanz

Die Verbindungen des Siliciums sind in der Lebenswelt der SchülerInnen weit verbreitet. Bereits im Sandkasten kommen sie mit einer einfachen Siliciumverbindungen, dem Siliciumdioxid in Form von Sand, in Kontakt. Später ist dies bei bekannten Spielzeugen, wie dem Magischen Sand, der Fall. Weitere, konkrete Anwendungsmöglichkeiten für Siliciumverbindungen im Alltag finden sich in den Kapiteln 2.2.4, 2.3.3 und 2.4.2. Dies kann im Chemieunterricht aufgegriffen werden und bietet viele lebensweltbezogene, wie fachliche Anbindungsmöglichkeiten.

Die Bedeutung von Siliciumverbindungen in der Lebenswelt der SchülerInnen ist vielleicht nicht sofort ersichtlich, offenbart sich aber schnell bei genauerer Betrachtung. Ein Themengebiet mit

einem hohen Alltagsbezug und großer Akzeptanz seitens der SchülerInnen ist die Kosmetik. Oft entwickeln die SchülerInnen ein besonderes Interesse an Themen, die den eigenen Körper betreffen [62]. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass Pflegeprodukte in ähnlichem Maße für Mädchen und Jungen interessant sind, da die Verwendung von Duschgel, Haarshampoo und Deodorant ein Teil der täglichen Körperpflege ist. Eine gesteigerte Bedeutung für die Jungen deutet sich durch einen Umsatzanstieg der Kosmetikindustrie im Bereich der Männerkosmetik im Drogerimarktsegment an, beispielsweise um über 11% in den Jahren 2007 bis 2009 [63]. Besonders Duschgele und Haarstylingprodukte von Modemarken werden von den Jungen favorisiert und können den Status eines „Kultobjekts“ erlangen [64].

Die Kosmetika eröffnen die Möglichkeit eines alltagsorientierten Zugangs für die Polymerchemie unter Verwendung eines motivierenden Themas. Experimente zu Anwendungsmöglichkeiten von Siliconen in Kosmetikprodukten können mit wenig experimentellen Aufwand und bei geringen Gefahrenpotenzial als Schülerversuch erarbeitet werden. Die Einbettung der Silicone in das Thema Kosmetik stellt hier eine interessante Alternative zu den bewährten Versuchen zu Werkstoffen aus Siliconen dar. Das Thema Kosmetik bietet mit Einbindungsmöglichkeiten für Silicone und Silica sogar den weiteren Vorteil mehrere verschiedene Siliciumverbindungen thematisieren zu können (siehe Abschnitt 2.2.4 und 2.3.3).

Die SchülerInnen kennen aus ihrem Alltag eine aktuelle Werbestrategie, die mit dem Verzicht bestimmter Verbindungen in einem Produkt wirbt. Neben Parabenen und Mineralölen finden sich hier immer öfter auch Silicone (siehe Abb. 10). In Produkten der Naturkosmetik dürfen diese Verbindungen generell nicht eingesetzt werden. Dies kann im Chemieunterricht aufgegriffen und diskutiert werden.

Ein mögliches, konkretes Beispiel ist die kontroverse Diskussion in den Medien über einen möglichen schädlichen Einfluss von Siliconen in Haarshampoo, was sich unter anderem in einem veränderten Verhalten beim Färben des Haars zeigen soll. Solche Beiträge sind den SchülerInnen bekannt und können als Grundlage zur Thematisierung der Verbindungen in Kosmetika verwendet werden.

Die Verwendung von Siliconen als Implantate, wie Brustimplantate, ist den SchülerInnen ebenfalls aus Pressemeldungen bekannt. Die Verwendung solcher Implantate zum Experimentieren im Chemieunterricht wird als nicht geeignet angesehen, dennoch kann über die Reinheit von Chemikalien für einen Einsatz unter physiologischen Bedingungen im Chemieunterricht diskutiert werden.



Abbildung 10: Haarshampoo mit dem Werbeaufkleber "ohne Silikone"

In der Tagespresse finden sich auch Meldungen über das sogenannte *Scratching* oder *Etching* auf. Der Begriff bezeichnet eine Art des Graffiti, bei welcher mit Hilfe von Flusssäure Glasoberflächen geätzt werden. Solche Artikel können als Anlass genommen werden, die chemische Beständigkeit von Glas zu untersuchen. Diese Ätzversuche können weitestgehend auf elementares Silicium übertragen werden. Weitere Anwendungsmöglichkeiten von Siliciumverbindungen in Lebenswelt und Industrie werden ausführlich im vorangegangenen Kapitel besprochen (siehe Kapitel 2).

Aktuell ist das Bewusstsein der SchülerInnen für die unmittelbare Alltagsanwendung vielleicht noch nicht sehr ausgeprägt, doch eine verstärkte Aufmerksamkeit für dieses weite Themenfeld ist durch die aktuelle Forschung mit ihren Auswirkungen auf viele Bereichen des täglichen Lebens zu erwarten.

Die Betrachtung der Relevanz der Siliciumchemie für den Unterricht setzt bei den schülerrelevanten lebensweltlichen Bezügen an, geht aber weit darüber hinaus. Die wirtschaftliche Bedeutung der zugehörigen Industriezweige in der chemischen Industrie für die deutsche Wirtschaft ist enorm. Es gibt zwar keine nennenswerte Herstellung von Rohsilicium in Deutschland; es wird zum größten Teil aus China importiert. Dieses Rohsilicium wird aber einerseits direkt für metallurgische Zwecke verwendet, andererseits dient es als Grundlage für eine reichhaltige Siliciumchemie. Die zahlreichen Verbindungen werden als Fein- und Spezialchemikalien in den verschiedensten Branchen in der chemischen Industrie eingesetzt. Hier ist besonders die Synthese von Silanen, als Vorstufe für die Silicone hervorzuheben.

Bei den Silicaten hingegen werden verschiedene Verbindungen, besonders die Bentonite, hierzulande abgebaut und weiterverarbeitet. Daraus ergeben sich besonders lokal starke gesellschaftliche und wirtschaftliche Bezüge zum Thema Siliciumchemie (siehe Abschnitt 2.2.5, 2.3.5 und 2.4.3).

3.1.3 Curriculare Relevanz - Einbindungsmöglichkeiten in Unterrichtsinhalte des Landes Hessen

Stellvertretend für ein Kern- oder Schulcurriculum werden im Folgenden die Inhalte der „alten“ Lehrpläne für einen Abgleich auf einer inhaltlichen Ebene herangezogen. Es werden am Beispiel des Lehrplans des Landes Hessen für das Fach Chemie im gymnasialen Bildungsgang für G9 [65] die Möglichkeiten zur Einbindung der Siliciumchemie in den Chemieunterricht geprüft und aufgezeigt. Auf einen zusätzlichen Vergleich mit dem Lehrplan für G8 wird zugunsten einer übersichtlichen Darstellung verzichtet. Es finden sich hier dieselben Lehrplaninhalte zur Siliciumchemie,

allerdings um ein Jahr nach vorne versetzt.

Im ersten Abschnitt des Lehrplans wird der Aufbau einer naturwissenschaftlichen Grundbildung durch Erwerb von Fachwissen und Methodenkompetenz als übergeordnetes Ziel des Chemieunterrichts angeführt. Die SchülerInnen sollen darauf vorbereitet werden Fragestellungen und Probleme in allen Lebensbereichen mit naturwissenschaftlichem oder technischem Hintergrund kritisch bewerten zu können [65, S.1]. Dies legitimiert hinreichend die Beschäftigung mit der Siliciumchemie im Unterricht.

Insgesamt ist festzustellen, dass zwar einzelne Siliciumverbindungen Erwähnung finden, dies aber ausschließlich auf einer unverbindlichen, fakultativen Ebene geschieht. Ferner werden keine Bezüge zwischen diesen Teilbereichen der Siliciumchemie hergestellt, so dass die Chemie des Elements Silicium insgesamt für die SchülerInnen nicht greifbar wird. Abschließend bleibt also festzustellen, dass keine explizite Thematisierung der Siliciumchemie in all ihren verschiedenen Facetten vorgesehen ist.

Die Einbindungsmöglichkeiten für die Siliciumchemie sind laut Lehrplan auf die Sekundarstufe II beschränkt. Im Rahmen des Themas *Angewandte Chemie* finden sich Vorschläge für ein Wahlthema im zweiten Halbjahr der 13. Jahrgangsstufe. Zum Unterpunkt *Werkstoffe* werden die Silicate, elementares Silicium und Gläser genannt [65, S.46-48]. Einzig die Silicone werden zusätzlich dazu im 12. Schuljahr als fakultativer Unterrichtsinhalt im Rahmen des Themas *Synthetische Makromoleküle* angeführt [65, S.39, 41]. Die Silica-Verbindungen werden in den hessischen Lehrplänen nicht explizit genannt.

Eine sinnvolle Behandlung von Siliciumverbindungen ist bereits in der Sekundarstufe I auf einer phänomenologischen Ebene möglich. Eine Einbindung in den Chemieunterricht bleibt auch nicht auf den gymnasialen Bildungsgang beschränkt, sondern ist bei einer sinnvollen didaktischen Elementarisierung auch in der Haupt- und Realschule möglich. Bei der Auswahl eines stark anwendungsbezogenen Kontexts mit konkreten Beispielen kann eine Thematisierung von Aspekten der Siliciumchemie ebenfalls für geeignete Fachrichtungen an berufsbildenden Schulen sinnvoll sein. Beispielsweise können Silica-Verbindungen aufgrund ihrer Verwendung in Baustoffen im Rahmen des Ausbildungsgangs *Maler/in und Lackierer/in* oder Silicone als Inhaltsstoffe in Kosmetika im Rahmen des Ausbildungsgang *Drogist/in* thematisiert werden.

In der folgenden Tabelle sind alle im Rahmen dieser Arbeit entwickelten oder optimierten Experimente mit einer Zuordnung zu Lehrplaninhalten mit Angabe der entsprechenden Jahrgangsstufe aufgelistet. Der Schwerpunkt der experimentellen Arbeit liegt auf den Siliconen und den Silica, da in der Forschung für diese Stoffklasse in den vergangenen Jahren mit Abstand die meisten innovativen Entwicklungen hervorgebracht worden sind, die auch in unserem Alltag Einzug gefunden

haben.

Tabelle 4: Experimente mit Zuordnung zu Lehrplaninhalten

| Experimente | fachlicher Inhalt | Jhr.stufe (nach G9) |
|--|---|------------------------------------|
| Silicone | | |
| Temperaturbeständigkeit von Silicon- und Naturkautschuk | Verbrennung; Angewandte Chemie | 8, 12, 13 |
| Chemikalienbeständigkeit von Silicon- und Naturkautschuk | Chemische Reaktion; Angewandte Chemie | 8, 12, 13 |
| <i>Silicon- und Acrylatdichtstoffe</i> | | |
| Vergleich von Temperatur und Geruch | Chemische Reaktion; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Vergleich der Überstreichbarkeit | Struktur-Eigenschafts-Beziehungen; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Vergleich des Verhaltens gg. Wasser | Löslichkeit, Angewandte Chemie | 12, 13 |
| <i>Silicondichtstoffe</i> | | |
| Unterscheidung von Eliminierungsprodukten | pH-Wert; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 10, 12, 13 |
| Nachweis eines Alkohols | Redoxchemie; funktionelle Gruppen; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 11, 12, 13 |
| Identifizierung als Methanol | funktionelle Gruppen; Analytik; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Nachweis von Essigsäure | funktionelle Gruppen; Analytik; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Modellversuche zu Funktionskleidung | Struktur-Eigenschafts-Beziehungen; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Recycling von Dichtstoffen | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Synthese von „Hüpfendem Kitt“ | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| <i>Siliconabformmassen</i> | | |
| Fortsetzung auf der nächsten Seite | | |

Tabelle 4 – Fortsetzung

| Experimente | fachlicher Inhalt | Jhr.stufe (nach G9) |
|---|---|------------------------------------|
| Störfaktoren der Polyaddition | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse | Polymerchemie; Struktur-Eigenschafts-Beziehungen | 12, 13 |
| <i>Silicone in Kosmetika</i> | | |
| Wasserfeste Wimperntusche | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Glanzoptimierung von Lipgloss | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Deostift ohne Mikro-Schaum | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Silicontenside in Haarshampoo | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Entschäumen mit Körperlotion | Polymerchemie; Tenside | 12, 13 |
| Schauminhibitor und -stabilisator | Tenside; Polymerchemie, Angewandte Chemie | 12, 13 |
| <i>Versuche mit Siliconöl</i> | | |
| Viskositätsvergleich von Mineral- und Siliconöl | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Lernzirkel zur Untersuchung von Ölen | Struktur-Eigenschafts-Beziehungen; Naturstoffe; Redoxchemie; Polymer- und Angewandte Chemie | 11,12 12, 13 |
| Herstellung von „Magischem Sand“ | | |
| Silicone und Silica | | |
| Modellversuch zur Herstellung einer Backform | Füllstoffe; Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Viskositätseinstellung von Nagellack | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Kratzfestigkeit von Nagellack | Polymerchemie; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Herstellung und Modifizierung eines Nagellacks | Polymerchemie; Farbstoffe; Angewandte Chemie | 12, 13 |
| Silica | | |
| <i>Nachweis von Silica</i> | | |
| Fortsetzung auf der nächsten Seite | | |

Tabelle 4 – Fortsetzung

| Experimente | fachlicher Inhalt | Jhr.stufe (nach G9) |
|---|---|------------------------------------|
| Qualit. Nachweis von löslichen Silica in Gewürzpulver | Analytik; Komplexchemie | 13 |
| Qualit. Nachweis von löslichen Silica in Zahncreme | Analytik; Komplexchemie | 13 |
| Quant. Nachweis von löslichen Silica in Mineralwasser | Analytik; Angewandte Chemie | 13 |
| <i>Silica in Zahncreme</i> | | |
| Silica als Bindemittel in Zahncreme | Angewandte Chemie | 13 |
| Thixotropie von Zahncreme | Struktur-Eigenschafts-Beziehungen; Angewandte Chemie | 13 |
| Putzkörper in Zahncreme | Teilchenmodell; Säure-Base-Chemie; Angewandte Chemie | 8, 9, 13 |
| <i>Silica in Nagellack</i> | | |
| Mattierungseffekt in Nagellack | Anwendung des Teilchenmodells; An- gewandte Chemie | 8, 13 |
| <i>Silica in Zement</i> | | |
| Silica in Zement | Angewandte Chemie | 13 |
| Silica als Füllstoff in Kautschuk | Angewandte Chemie | 13 |
| Bestimmung des Gelpunkts bei der Bil- dung von Kieselgel | | |
| Silicium | | |
| Leitfähigkeit von mono- und polykrist. Silicium | Leitfähigkeit; Werkstoffe | 9, 13 |
| Saures Ätzen von Silicium | Säure/ Base; Werkstoffe | 10,13 |
| Basisches Ätzen von Silicium | Säure/ Base; Werkstoffe | 10,13 |
| Basisches Ätzen von Glas | Säure/ Base; Werkstoffe | 10,13 |

Silicone

Die Silicone lassen sich im Rahmen des Themas *Polymerchemie* als alternative Beispiele für Polymere in den Chemieunterricht einbinden. Bei der Verwendung von bekannten Gebrauchsgegenständen wie Fugendichtstoffen und Backformen lässt sich ein hoher Bezug zum Alltag der SchülerInnen herstellen. Die Darstellung der Polymerverbindungen wird so um eine Verbindungsgruppe erweitert.

Im Rahmen der Polymerchemie kann einerseits die Verbindungsgruppe mit ihren Eigenschaften fokussiert werden. Die Funktionen von Siliconen in verschiedenen Kosmetika lassen sich beispielsweise gut in Modellexperimenten von den SchülerInnen nachvollziehen; es können aber auch kommerziell erhältliche Produkte untersucht werden, was die Motivation der SchülerInnen zur Beschäftigung mit diesem stark kontextorientiertem Thema noch steigern kann. So können Siliconöle als schaumregulierendes Agens in Kosmetika und Waschmittel, bzw. in PU-Schaum zum Einsatz kommen [1, S.48], [65, S.46]. Letzteres bietet gleichzeitig eine Anknüpfungsmöglichkeit an die Polymerchemie.

Die Recyclingproblematik von Kunststoffen kann ebenfalls anhand der Silicone behandelt werden. Im Rahmen eines Modellversuchs kann ein Silicondichtstoff zur Herstellung von Funktionskleidung herangezogen werden, die in weiterführenden Versuchen einem Recyclingansatz unterworfen wird (siehe Unterkapitel 4.1.3).

Tiefergehend können die Eigenschaften von Siliconen beispielhaft anhand einer genaueren Betrachtung von Dichtstoffen aus Siliconen untersucht werden. Es wurden daher Experimente zum Vergleich von Acrylat- und sauer vernetzendem Silicondichtstoff entwickelt, da es sich hier um die am häufigsten und oft auch am günstigsten erhältlichen Dichtstoffe handelt. Ein Vergleich von Temperaturverläufen während des Abbindens lässt einen Rückschluss auf die zugrundeliegende physikalische oder chemische Reaktion zu. Diese Experimente können in der Einstiegsphase der Polymerchemie, aber auch in früheren Jahrgangsstufen zum Einsatz kommen, da hauptsächlich Struktur-Eigenschafts-Beziehungen mit der Betrachtung des Einflusses der Molekülstruktur auf die Vernetzungsreaktion fokussiert werden.

Ein Vergleich der Dichtstoffe untereinander lenkt den Fokus auf die Polykondensation, die beim Aushärten des Dichtstoffs abläuft. Dies ermöglicht die Einbindung von Siliconen als alternatives, alltagsnahes Beispiel für diesen Polymerisationstyp neben klassischen Beispielen, wie Nylon.

Die Polyaddition lässt sich mit Bezug zu der flexibel verformbaren Siliconbackform thematisieren, da diese Polymerisation bei der Reaktion in der zweikomponentigen Abformmasse abläuft. Eine vertiefende Behandlung der Reaktion ist möglich, da sich der Einfluss von Störfaktoren auf die Reaktionsgeschwindigkeit mit einem genaueren Blick auf die Reaktionen am Katalysator gut

experimentell untersuchen lässt. Weiter lassen sich im Schülerexperiment verschiedene Abformmaterialien hinsichtlich bestimmter Eigenschaften miteinander vergleichen. Solche Abformmaterialien sind den SchülerInnen beispielsweise vom Zahnarztbesuch bekannt.

Bei der experimentellen Reihe um die Dichtstoffe (siehe oben) lassen sich unterschiedliche Eliminierungsprodukte, die während des Aushärtens abgespalten werden, nachweisen. Dies stellt mit einer Erarbeitung der Anwendungsgrenzen der Dichtstoffe einen Bezug zum Alltag her und liefert Anbindungsmöglichkeiten an andere Themengebiete im Chemieunterricht. Diese Experimente können auch im Rahmen der Thematisierung von verbindlichen Lehrplaninhalten genutzt werden. Dies ist in der E-Phase in der Redoxchemie oder der Einführung von organischen Verbindungen, hier am Beispiel Essigsäure, oder als weitergehender Versuch bei der Anwendung von Indikatoren in der Säure-Base-Chemie möglich.

Generell lassen sich die Silicone nicht nur im Rahmen der Polymerchemie und als mögliches Thema in der Angewandten Chemie in der Sekundarstufe II im Chemieunterricht behandeln. Bei einer angemessenen Elementarisierung hinsichtlich der Betrachtung der Struktur-Eigenschafts-Beziehungen ist es denkbar viele der genannten Versuche bereits in der Sekundarstufe I im Rahmen anderer Lehrplaninhalte im Unterricht einzusetzen.

Einige Experimente eignen sich nicht nur für die Siliconchemie, sondern ermöglichen auch eine Behandlung verschiedener Siliciumverbindungen. So können am Beispiel der Backform zusätzlich Silica-Verbindungen in ihrer Funktion als Füllstoffe untersucht werden. Die SchülerInnen können experimentell die Auswirkung auf die Verarbeitungsmöglichkeiten und die Stabilität nachvollziehen. Dies lässt sich auch auf die Versuche zur Herstellung und Modifizierung eines Nagellacks übertragen.

Silica

Die Silica-Verbindungen kommen in vielen Gegenständen des alltäglichen Gebrauchs vor und sind dort mit einem einfachen analytischen Verfahren qualitativ nachweisbar. Im Rahmen der experimentellen Entwicklung haben sich einige Alltagsgegenstände als besonders geeignet für diesen Nachweis herausgestellt.

Ein erfolgreicher Nachweis von löslichem Silica alleine genügt für eine sinnvolle Behandlung eines Alltagsgegenstands im Unterricht noch nicht. Die Silica-Verbindungen können daher in Zahncreme nachgewiesen und in weiterführenden Versuchen einer genaueren Betrachtung hinsichtlich ihrer Funktionen in Zahncreme als Bindemittel und Putzkörper unterzogen werden. Diese Ver-

suche zielen auf ein Verständnis der zugrundeliegenden Struktur-Eigenschafts-Beziehungen ab. Selbst die quantitative Variante ist in verschiedenen Schwierigkeitsabstufungen durchführbar.

Die Verwendung als Werk- und Zusatzstoff in vielen Gegenständen des täglichen Gebrauchs und anderen industriellen Produkten eröffnet weitere Möglichkeiten zur Thematisierung im Unterricht. In diesem Bereich der Siliciumchemie kann eine Brücke zu den Baustoffen geschlagen werden, die traditionell viele Siliciumverbindungen beinhalten können. Neben diesen altbekannten Vertretern der Siliciumchemie in Werkstoffen können leicht neue Entwicklungen aufgegriffen und experimentell erarbeitet werden. So kann in einem Schülerexperiment der Einfluss von hochdispersivem Siliciumdioxid auf die Abbindeprozesse von Zement nachvollzogen werden. Die Behandlung von anorganischen Baustoffen ist im Themenfeld der *Angewandte Chemie* im letzten Schulhalbjahr möglich.

Unter diesem Thema findet sich auch das Wahlthema *Analytik*. Die Herstellung eines Kieselgels, die an sich in ihrer praktischen Durchführung gut bekannt ist, kann hier mit einem anderen Schwerpunkt genutzt werden. Die Bestimmung des Gelpunkts, der den Beginn der Gelbildung während der Reaktion anzeigt, kann normalerweise nur mit komplexen Apparaturen untersucht werden. Hier wird die Entwicklung eines einfachen Blasenviskosimeters vorgestellt, das eine experimentelle Umsetzung auch für die SchülerInnen zulässt. Auf die komplexe mathematische Herleitung wird aus Gründen der didaktischen Elementarisierung in diesem Versuch verzichtet.

Silicium

Es werden in dieser Arbeit bereits bekannte Versuche zur Leitfähigkeitsuntersuchung des Halbleiterelements Silicium aufgegriffen. Diese können dahingehend erweitert werden, dass eine Unterscheidung von mono- und polykristallinem Silicium möglich ist. Der Versuch ist schnell und sicher von SchülerInnen durchführbar und kann zur experimentellen Unterstützung dienen, wenn die Einsatzmöglichkeiten von Halbleiterelementen besprochen werden. Dies ist laut Lehrplan im Thema *Angewandte Chemie* möglich. Die Leitfähigkeitsuntersuchungen zeigen, wie der unterschiedliche Wirkungsgrad von Solarzellen mit Silicium in verschiedenen kristallinen Ausrichtungen zustande kommt.

Im Chemieunterricht wird daneben auf den Herstellungsprozess der Halbleiterbauteile eingegangen. Bei verschiedenen Schritten während des Prozesses ist ein Ätzen der Siliciumoberfläche vorgesehen, was sich aufgrund der chemischen Beständigkeit aber nur unter speziellen Bedingungen realisieren lässt. Diese beiden Varianten können im Unterricht umgesetzt werden. Die Variante zum Ätzen unter basischen Bedingungen ist als Schülerexperimente geeignet. Bei einer

begleitenden Untersuchung mit dem Mikroskop können die SchülerInnen die Veränderungen auf der geätzten Oberfläche leicht nachvollziehen und die Beobachtungen auch zum Aufstellen der Reaktionsgleichung der ablaufenden Reaktion nutzen.

Die Variante zum Ätzen mit Flusssäure bleibt als Demonstrationsversuch vorbehalten, kann aber von der Lehrkraft mit einem geringen Gefahrenpotential im Mikromaßstab durchgeführt werden. In diesem Versuch kann das Silicium leicht durch ein Glasstück ersetzt werden. Dies ermöglicht die Thematisierung der Graffiti-Methode des *Etchings*.

3.2 Derzeitiger Stand der fachdidaktischen Forschung

In diesem Abschnitt soll der Stand der fachdidaktischen Forschung in der Siliciumchemie aufgezeigt werden. Es werden zunächst ausführlicher diejenigen Teilbereiche der Siliciumchemie vorgestellt, die für diese Arbeit relevant sind. Dies sind die Silicone, die Silica und das elementare Silicium. Bereits in der Fachdidaktik Chemie ausführlicher bearbeitete Teilbereiche werden nachfolgend nur einführend vorgestellt, um eine Abgrenzung der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Verbindungsgruppen zu ermöglichen.

Die Behandlung der Siliciumchemie in Schulbüchern für den Chemieunterricht wurde genauer untersucht, da diese das am häufigsten verwendete Lehrmittel im Unterricht darstellen. Dazu wurden 17 willkürlich ausgewählte Schulbücher von 1975 bis 2013 auf die Erwähnung der Teilbereiche Silicone, Silica, elementares Silicium, Glas, Silicate und Wasserglas geprüft. Innerhalb jeder dieser Untergruppen wurde zusätzlich unterschieden, welcher Art die Thematisierung im Schulbuch ist. Dazu wurden die Beiträge in die Kategorien „fachliche Informationen“, „Aufgaben“ und „Experimente“ eingeordnet. Die Ergebnisse sind in den Abschnitten über die jeweilige Untergruppe der Siliciumverbindungen tabellarisch aufgelistet.

3.2.1 Silicone

Die Stoffklasse der Silicone ist kein neues Gebiet in der Polymerchemie, denn sie wurde bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts entdeckt und wird seitdem rege beforscht. Die Silicone wurden aber erst in den späten 70-er Jahren zögerlich für die fachdidaktische Forschung entdeckt. Bereits seitdem sind erste experimentelle Entwicklungen bekannt (siehe Tabelle 5). [66]. In der fachdidaktischen Forschung sind die Silicone im angloamerikanischen Sprachraum bedeutend früher als Forschungsobjekt interessant geworden als in Deutschland. Doch auch hier sind die meisten Veröffentlichungen als Fachartikel einzuordnen, die theoretische Hintergrundinformationen liefern und eher für die Hochschullehre geeignet sind [67]. Vereinzelt finden sich experimentelle Ansätze [68].

Bei Körperth tauchen erstmals Versuche zu Siliconen im deutschen Sprachraum auf. Es handelt sich um Experimente zu prägnanten Eigenschaften, welche die Silicone von anderen Polymeren unterscheiden, wie das Verhalten beim Erhitzen oder die Chemikalienbeständigkeit. Es werden auch einfachere Varianten von Versuchen zu Anwendungsmöglichkeiten, wie einer imprägnierenden Beschichtung und als Trennmittel, vorgestellt [69, S.87 ff.]. Diese Versuche werden in den neueren fachdidaktischen Veröffentlichungen aufgegriffen, optimiert und weiterentwickelt.

In den letzten 15 Jahren wurde die Thematik auch hierzulande intensiv von der fachdidaktischen Forschung bearbeitet. Es findet sich eine Vielzahl fachlicher Übersichtsartikel, die sich mit der Chemie der Silicone, ihrer Eigenschaften und den resultierenden Anwendungsmöglichkeiten beschäftigen [70], [71], [72]. Oft wird eine spezielle Fragestellung heraus gegriffen, die sich auf eine spezifische Alltagsanwendung bezieht und so einen kontextorientierten Zugang zu den Siliconen ermöglicht, wie bei Standke et al. mit silanbasiertem Graffitienschutz [73]. Hier steht die Verwendung als hydrophobierendes Agens in der Gebäudesanierung und der Denkmalpflege im Vordergrund. Auch auf Brillengläsern können Siliconbeschichtungen aufgebracht werden. Dies wird in einem Modellexperiment bei Wong vorgestellt [74]. Der Versuch wird hier aufgrund des Gefährdungspotentials der verwendeten Chemikalien in die Hochschullehre eingeordnet.

Tabelle 5: *Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Siliconen in der fachdidaktischen Literatur*

| |
|---|
| Synthese von Silanen [75], [76], [77] |
| Hydrolyse von Chlorsilanen zur Herstellung von Siliconen [75], [78] |
| Synthese von Siliconkitt [79] |
| Vulkanisation von Siliconkautschuk [80], [75], [79] |
| Abbinden von Fugendichtstoffen [75], [81] |
| Brennbarkeit von Siliconen [80], [75], [82], [83] |
| Hydrophobieren mit Siliconen [80], [75] |
| Schaumkontrolle [84], [80], [85], [86] |

Explizite Möglichkeiten für eine experimentelle Einbindung des Themas Silicone in den Chemieunterricht werden u.a. bei Tausch und Krees vorgestellt [75], [80], [87]. Einige Versuche sind aufgrund der Entwicklung eines Experimentierkoffers zur Siliconchemie in Zusammenarbeit mit der Firma *Wacker Chemie AG* entstanden. Die aktuelle Ausgabe beinhaltet, wie die Vorgängerausgabe, zusätzlich Versuche zu Cyclodextrinen, enthält aber dafür weniger Versuche zu den Siliconen. Die Experimente des letzten *Wacker-Koffers*, der sich ausschließlich mit Siliconen beschäftigte, finden sich bei Wagner [85].

Ausgehend von den dort vorgeschlagenen Experimenten wird bei der Entwicklung von experimen-

tellen Ansätzen im Rahmen dieser Arbeit ein starker Fokus auf einen Alltagsbezug zur Lebenswelt der SchülerInnen gesetzt.

Einzelne ältere Experimente, die in der fachdidaktischen Literatur vorgeschlagen werden, sind aufgrund aktueller Gefährdungsbeurteilungen heute in der vorgeschlagenen Form so nicht mehr durchführbar und bedürfen einer Überarbeitung. Die Herstellung von Siliconkautschuk mit Hilfe von Octamethylcyclotetrasiloxan ist beispielsweise davon betroffen [88]. Dieser Versuch dient als Grundlage zur Herstellung der sogenannten *Intelligenten Knete* (siehe Kapitel 4.1.4).

In den Schulbüchern tauchen die Silicone erst seit einigen Jahren vermehrt auf; zunächst in Form eines Exkurses oder als thematische Umrahmung für eine Aufgabe, in den aktuellen Auflagen auch in Form eines eigenen Unterkapitels im Rahmen der Polymerchemie in der Sekundarstufe II (siehe Tabelle 6). Dabei finden sich zunehmend Aufgaben, allerdings nur in Einzelfällen Experimente. Bei den Aufgaben werden hauptsächlich einzelne Reaktionsschritte aus der mehrstufigen Synthese herausgegriffen. Andere Aufgaben fordern eine Erklärung von Eigenschaften der Silicone, welche über Struktur-Eigenschafts-Beziehungen hergeleitet werden sollen. Solche Aufgaben werden gerne von der Anführung entsprechender Anwendungsmöglichkeiten "umrahmt". Diese dienen aber oft nur als Anknüpfungspunkt und werden nicht weiter verfolgt.

Tabelle 6: Silicone in Schulbüchern

| Kategorie | Inhalt |
|-------------------------|---|
| fachliche Informationen | [89, S.253 ff.], [90, S.388] Unterkapitel im Kapitel zur Polymerchemie [91, S.333], [92, S.239] Exkurs im Kapitel zur Polymerchemie [91, S.333] [93, S.324 f.], [94, S.112 f.] |
| Aufgaben | Hydrophobie, Temperaturunabhängigkeit von Bremsflüssigkeit, Dichtstoffe im Kapitel Kunststoffe [94, S.113], [95, S.329] Reaktionsgleichung für die Herstellung von Silanen [94, S.240] Reaktionen von Silanen [93, S.325] |
| Experimente | Abformen mit Siliconkautschuk [90, S.388] |

3.2.2 Silica

Fachliche Beiträge zur Chemie der Silica-Verbindungen oder zu ihren Anwendungsmöglichkeiten im Alltag sind in der fachdidaktischen Literatur nur vereinzelt zu finden (siehe Tabelle 7). Das Interesse für diese Verbindungsgruppe über die "klassischen" Versuche zur Synthese hinaus ent-

wickelt sich erst seit einigen Jahren, da die Silica-Verbindungen als umweltfreundlicher Füllstoff auch in der breiten Gesellschaft immer bekannter werden.

In der experimentelle Schulchemie werden die Silica-Verbindungen oft nur als Hilfsmittel bei der Betrachtung eines anderen Sachverhalts herangezogen. Die Verbindung steht jedoch nicht im Fokus des Interesses und zugehörige chemische Eigenschaften werden nicht weiter erläutert. Ein bekanntes Beispiel eines solchen Versuchs ist die chromatographische Trennung eines Stoffgemisches mit Hilfe eines Silicagels als stationäre Phase. Man findet Versuchsdurchführungen mit Blattfarbstoffen, Farbstoffen aus Stiften usw. in der fachdidaktischen Literatur [96]. Für die Hochschullehre ist die Substanzsammlung beliebig erweiterbar.

Tabelle 7: *Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Silica in der fachdidaktischen Literatur*

| |
|--|
| Adsorption von Wasser an Kieselgel und Trocknung von Kieselgel [97, S.110 ff.] |
| Chromatographie mit Kieselgel [96] |
| Fällung von Kieselsäure aus Wasserglas [98], [99] |
| pH-Wert-Untersuchungen [98], [100] |
| Löslichkeitsverhalten und Reaktion mit verd. Salzsäure [101] |
| Nachweis durch Reaktion mit Ammoniummolybdat [102], [103] |
| Nachweis mittels Bleitiegelprobe [104] |
| Kieselsäure als Hilfsmittel in Zement [97, S.110 ff.] |
| Streufähigkeit von Salz und Rieselfähigkeit von Schwefel [85], [105] |

Die wenigen Experimente, die explizit auf eine Silica-Verbindung eingehen, fokussieren oft Synthesemöglichkeiten oder Eigenschaften in Lösung. Es wird dann eine Synthese in einem kleinen Maßstab durchgeführt, wie er in einem schulischen Rahmen möglich ist. Zu dieser Kategorie zählt die Fällung von Siliciumdioxid aus Wasserglas unter Verwendung einer Säure. Dies kann auch als Nachweisreaktion herangezogen werden. In der Literatur wird allerdings ausschließlich auf die Durchführung eingegangen (siehe Tabelle 7). Der Versuch wird für die SchülerInnen oft als abstrakte Methode aus dem chemischen Labor eingeführt. An die Herstellung können sich Untersuchungen zum Löslichkeitsverhalten und zum pH-Wert anschließen.

Der Nachweis von löslichen Silicaten und Silica-Verbindungen ist mittels Bleitiegelprobe oder durch Komplexierung und Bildung von Heteropolysäuren mit Molybdatsalzen möglich. Bei der ersten Methode wird ein Silicat mit Calciumfluorid und Schwefelsäure zu Siliciumtetrafluorid umgesetzt. Die leicht flüchtige Verbindung verdunstet und reagiert mit Wasser auf einer angefeuchteten Pappe, wo wieder die Abscheidung eines Silicates erfolgt. Dieser Nachweis ist für ungeübte Experimentatoren leider wenig geeignet, da er sehr fehleranfällig ist und eine längere Wartephase

beinhaltet. Aufgrund des großen Gefährdungspotentials des entstehenden Calciumfluorids und der entstehenden Flusssäure ist der Versuch nur als Lehrerdemonstrationsversuch geeignet und erfordert eine besondere Prüfung der Versuchsbedingungen.

Die Nachweismöglichkeit über die Reaktion mit Molybdatsalzen und die damit verbundene Farbänderung erscheint in vielerlei Hinsicht deutlich sicherer. Bei Wloka und Schwedt wird dieser Nachweis auf Gebrauchsgegenstände angewendet [102], [103]. Ein positiver Nachweis ist durch eine gelbliche Verfärbung der Lösung erkennbar. Allerdings fällt diese Färbung bei geringen Konzentrationen, wie es oft in Alltagsprodukten der Fall ist, nur sehr schwach aus.

Nur vereinzelt sind lebensweltnahe Experimente zu finden, die beispielsweise die Beeinflussung der Streufähigkeit durch den Zusatz von Silica zeigen. Dies sind beispielsweise Modellversuche zur Rieselfähigkeit mit Schwefel oder Salz [85]. Diese Versuche stammen aus einer früheren Version eines Schulversuchskoffers der Wacker Chemie AG [106, S.19 ff.]. Mögliche Anwendungszwecke von Siliciumdioxid in Alltagsprodukten oder für Prozesse in der Industrie werden in der neuen fachdidaktischen Literatur mit der verstärkten Nutzung von Silica als poröse Materialien als Katalysatorträger wieder verstärkt diskutiert [107].

In Schulbüchern finden sich nur vereinzelt fachliche Informationen zu Silica-Verbindungen (siehe Tabelle 8). Hier werden oft nur die einfache Synthese, aber auch Vergleiche auf theoretischer Ebene zwischen Kohlenstoff- und Siliciumverbindungen thematisiert. Als Beispiel für alltägliche Anwendungsmöglichkeiten von Silica wird häufig der Einsatz als Hilfsmittel in Beton und Zement gewählt. Diese Einbindungsmöglichkeit findet sich bereits seit mehreren Jahrzehnten, wird aber immer weniger tiefergehend behandelt und dient lediglich als Einführung [108], [109]. Es werden leider keine zugehörigen Experimente vorgestellt.

Die insgesamt selten vorkommenden Experimente zu diesen Verbindungen behandeln ausschließlich die Synthese über eine Fällung aus Wasserglas.

Tabelle 8: *Silica in Schulbüchern*

| Kategorie | Inhalt |
|-------------------------|--|
| fachliche Informationen | Eigenschaften von Siliciumdioxid in Quarz [89, S.253], [94, S.362 ff.], [110, S.221] Vergleich von Kohlenstoff- und Siliciumoxiden [92, S.232 f.] |
| Aufgaben | Kieselgur als Verpackungsmaterial [110, S.226] |
| Experimente | Fällung aus Wasserglas [110, S.221], [111, S.290 ff.] |

3.2.3 Silicium

In der fachdidaktischen Literatur findet sich eine Vielzahl von Publikationen, die sich mit dem elementaren Silicium beschäftigen. Die überwiegende Anzahl ist den Fachbeiträgen zuzuordnen und dient der Vermittlung von Fachwissen an den Lehrenden. Diese Beiträge enthalten aber nur selten Hinweise zur Einbindung des Themas in den Chemieunterricht hinsichtlich Unterrichtsplanung und Arbeitsmaterial. Neben Kurzeinführungen zu Fakten über das Element wird die Chemie des Siliciums mit der Chemie des Kohlenstoffs verglichen [112]. Die Schwerpunktsetzung ist dabei sehr unterschiedlich: Es wird auf die strukturellen Unterschiede bei den Elementen in der 4. Hauptgruppe untereinander und verglichen mit der 5. Hauptgruppe [6], [113] eingegangen. Daneben werden die Neigung zur Vermeidung von Doppelbindungen oder eine Beteiligung von d-Orbitalen bei chemischen Reaktionen thematisiert [60], [114], [115].

Andere Beiträge thematisieren die industrielle Verwendung von Silicium als Halbleiterelement für elektronische Bauteile und Solarelemente. Es werden die Herstellungsprozesse von Reinstsilicium mit der weiteren Verarbeitung bis zum Wafer mit verschiedenen Schwerpunkten hinsichtlich zugrundeliegender chemischer Prozesse oder hinsichtlich Methoden und Abläufe in der industriellen Fertigung beschrieben [53], [116], [117].

Mit der Zunahme der Nutzung von Solarenergie findet auch in der fachdidaktischen Literatur eine Verschiebung in der Schwerpunktsetzung im Umgang mit dem elementaren Silicium statt. Dies sind differenzierte Fachbeiträge zu Solarzellen mit unterschiedlichen Akzenten, wie Erläuterungen zur Herstellung und Funktionsweise von Solarzellen, sowie zu den Grundlagen der Photovoltaik [118], [119], [120].

Die Bedeutung des Elements Silicium für die zukünftige Energiegewinnung und die Ressourcen unserer industriell geprägten Gesellschaft rücken ebenfalls mehr in den Vordergrund [121], [122]. Dabei werden auch Informationen zu aktuellen wirtschaftlichen Entwicklungen thematisiert [123]. Gleichzeitig finden sich vermehrt kritische Stimmen, die den geringen Stellenwert des Siliciums im Chemieunterricht bei einer gleichzeitig zunehmenden wirtschaftlichen Bedeutung ansprechen [98].

Neben diesen überwiegend theoretischen Arbeiten existieren auch experimentelle Ansätze zur Thematisierung der chemischen Eigenschaften des elementaren Siliciums im Chemieunterricht. In Tabelle 9 sind die wichtigsten Kategorien an Experimenten aufgeführt. Die Darstellung von Silicium mittels Reduktion aus feinkörnigem Siliciumdioxid unterschiedlichen Ursprungs (aluminothermisch oder unter Verwendung von Magnesium) ist in verschiedenen Varianten bereits seit Jahrzehnten in der fachdidaktischen Literatur zu finden. Der Nachweis von Silicium erfolgt oft über lösliches Siliciumdioxid in Anlehnung an klassische, nasschemische Nachweisreaktionen (siehe 3.2.2).

Silicium kann unter basischen oder unter sauren Bedingungen in Lösung gebracht werden. Dieser Ätzvorgang ist ein Arbeitsschritt bei der Nachbehandlung von Silicium-Waferscheiben zur Herstellung von elektronischen Bauteilen. Die vorgeschlagenen Versuche von Lasher [124] und Swisher [125] nutzen beide Vorgehensweisen, sind aber aufgrund der komplexen Analytik für Studenten der Chemie konzipiert und aus Kostengründen nicht für eine Umsetzung im Chemieunterricht geeignet.

Tabelle 9: *Auswahl von experimentellen Ansätzen zu elementarem Silicium in der fachdidaktischen Literatur*

| |
|--|
| Untersuchung der Halbleitereigenschaften [98], [126], [127] |
| Darstellung von Silicium aus Glas- oder Quarzpulver [97, S.110 ff.], [98],[100, S. 85 ff.], [101, S.230 ff.], [108], [102] |
| Abscheidung von Silicium aus der Gasphase [128] |
| Nachweis durch Reaktion mit Ammoniummolybdat [102] |
| Alkalisches Ätzen von Wafer-Scheiben für Studenten der Chemie [124] |
| Darstellung von porösem Silicium durch Ätzen mit HF und HNO ₃ [125] |

Tabelle 10: *Silicium in Schulbüchern*

| Kategorie | Inhalt |
|-------------------------|---|
| fachliche Informationen | Herstellung bis zum Reinkristall [89, S.253], [92, S.236 f.] Exkurs zu Silicium im Kapt. über Ionenbindung [91, S.49], [129, S.240] Infbox zu Silicium [95, S.39], [130, S.315], [131], [132, S.329] Vergleich von Kohlenstoff mit Silicium [133, S.191] Dotierung von Photo- und Halbleiterelementen [111, S. 283 ff.] Silicium in Computer-Chips [134] |
| Aufgaben | Reaktionsgleichung für die Reaktion von Siliciumdioxid mit Magnesium [133, S.191], [110, S.226], [92, S.237], [94, S.240] |
| Experimente | Herstellung aus Quarz und Leitfähigkeitsuntersuchungen [92, S.236 f.],[111, S. 283 ff.] |

Das elementare Silicium wird seit Jahren durchweg in den Schulbüchern thematisiert (siehe Tabelle 10). Die Art und Weise, sowie die fachliche Tiefe variieren dabei beträchtlich. Binahe immer werden kurz der Herstellungsprozess von Reinstsilicium und die häufigsten Anwendungsmöglich-

keiten im Alltag vorgestellt. Das kann stark verkürzt in einer Infobox [132, S.329], in einem etwas ausführlicherem Exkurs [129, S.240] oder in einem eigenem Abschnitt erfolgen [92, S.236 f.]. Nur in solch seltenen Fällen ist ein eigenes Kapitel zu Teilen der Siliciumchemie vorhanden. Dies wird im nachfolgenden Kapitel ausführlicher besprochen.

Die Aufgaben und Experimente beschränken sich in den untersuchten Schulbüchern auf die Synthese von Silicium mittels der Reaktion von Magnesium und Siliciumdioxid. Mit Hinblick auf einen Alltagsbezug wird auch ein Experiment zur Abhängigkeit der Leitfähigkeit von der Temperatur als typische Eigenschaft eines Halbleiterelements vorgestellt (siehe Tabelle 10).

3.2.4 Glas

Die Beschäftigung mit Glas ist kein neues Thema in der Fachdidaktik der Chemie. Das Thema wird sowohl von der fachlichen Seite als auch experimentell ausführlich beleuchtet. Die experimentellen Ansätze reichen von der Glasbearbeitung über die Synthese mit Hilfe verschiedener Wärmequellen bis hin zur Prüfung der alkalischen Reaktion von Glas in Wasser. In Tabelle 11 ist eine kleine Auswahl der wichtigsten Experimente aufgeführt.

Tabelle 11: *Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Glas in der fachdidaktischen Literatur*

Herstellung von Glas im Mikrowellenofen [135]
Herstellung mit dem Gasbrenner [136, S.13 f.]
Herstellung an der Platinöse [137]
Alkalische Reaktion von Silikatgläsern [97], [136, S.13 f.]
Beschichten von Glas [138]

Dies steht in einer deutlichen Diskrepanz zur Thematisierung von Glas im Chemieunterricht. Die Behandlung von Glas im Chemieunterricht für das Gymnasium ist zumindest in Hessen nicht verpflichtend im Lehrplan verankert. Das Thema kann in der Q4-Phase, bzw. im zweiten Halbjahr des 13. Schuljahres, als Wahlthema behandelt werden. Dementsprechend finden sich zwar oft fachliche Informationen in Schulbüchern, allerdings sehr uneinheitlich von Kurzinformationen bis zu Unterkapiteln (siehe Tabelle 12).

Wenn Experimente zu Glas im Schulbuch vorkommen, sind dies solche zur Einführung in die Glasbearbeitung oder oben genannte Versuche zur Herstellung von Glas. Aufgaben zu diesem Thema beschäftigen sich mit dem amorphen Aufbau von Glas, aber auch mit Fragestellungen aus dem Alltag zum Thema Recycling. Es sind aber nicht bei allen Fundstellen in den Schulbüchern Aufgaben und/ oder Experimente zu finden.

Tabelle 12: *Glas in Schulbüchern*

| Kategorie | Inhalt |
|-------------------------|--|
| fachliche Informationen | Herstellung und Eigenschaften [89, S.352], [92, S.232 f.], [94, S.362 ff.], [110, S.222 f.], [134, S. 226 f.], [139, S.232 f.] |
| Aufgaben | Aufbau von Glas [89, S.252], [92, S.235], [94, S.240], [110, S.226] |
| Experimente | Herstellung und Bearbeitung von Glas [89, S.255], [92, S.232 f.], [110, S.222 f.], [134, S. 226 f.] Färben einer Glasschmelze [139, S.232 f.] |

3.2.5 Wasserglas

Das Wasserglas ist seit langer Zeit gerade in der Baustoffchemie fest etabliert und wird hier unter der Bezeichnung "Wasserglaskitt" als Klebstoff verwendet. Andere Nutzungsmöglichkeiten aus dem Alltag, wie das Konservieren von Eiern, verlieren dagegen mit stagnierender Anwendung deutlich an Bekanntheitsgrad.

Tabelle 13: *Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Wasserglas in der fachdidaktischen Literatur*

| |
|---|
| Synthese von Wasserglas [97, S.110 ff.], [98, S.169 ff.], [99, S.73], [140, S.77] |
| Untersuchung des pH-Werts [97, S.110 ff.], [98, S.169 ff.], [140, S.77] |
| Flammschutzwirkung [98], [101, S.230 ff.] |
| Hydrophobierung [128], [141] |
| Konservierung von Eiern [128] |
| Kristallzucht oder "Chemischer Garten" [82, S.23], [142], [140] |
| Klebstoff für Porzellan und Glas [82, S.30], [101, S.230 ff.], [128] |
| Verkieselung mit mineralischen Substraten [143] |

In der fachdidaktischen Literatur finden sich neben Übersichtsartikeln zu Herstellung, Geschichte und Anwendung wie bei Häusler und Kuhr verstärkt alltagsorientierte Ansätze, welche die genannten Anwendungen im Experiment wiedergeben [98], [143]. In den letzten Jahren wurden neue innovative Entwicklungen, wie die hydrophobierende Wirkung von Wasserglas im Bautenschutz ebenfalls zum Forschungsgegenstand [141], [144]. In diesem Zusammenhang wird vor

allem eine kontextorientierte Einführungsmöglichkeit für Wasserglas vorgestellt, die zur Einbindung größtenteils bekannter Experimente dient. In Tabelle 13 sind die bekanntesten Versuche zu dieser Thematik wiedergegeben.

Wasserglas wird im Chemieunterricht gerne im Rahmen des Versuchs *Der chemische Garten* als Matrix für Kristallwachstum eingesetzt. Es bildet sich eine semipermeable Membran aus schwerlöslichen Schwermetallsalzen an der Grenzfläche zwischen Festkörper und Flüssigkeit. Diese bläht sich aufgrund des osmotischen Drucks des Wassers auf, bis sie reißt und sich eine neue Wachstumsstelle bildet [142].

Tabelle 14: *Wasserglas in Schulbüchern*

| Kategorie | Inhalt |
|-------------------------|---|
| fachliche Informationen | Flammschutz [111, S. 290 ff.] |
| Aufgaben | - |
| Experimente | Herstellung und Untersuchung von Wasserglas [92, S.232 f.], [111, S. 290 ff.] |

In Schulbüchern werden ggf. die Herstellung und die Untersuchung von Eigenschaften von Wasserglas thematisiert (siehe Tabelle 14). Der am meisten genannte Anwendungszweck ist der Flammschutz. Im Gegensatz zu der Verbreitung von Wasserglas im Alltag und der guten fachdidaktischen Erforschung findet sich das Thema nur selten in Schulbüchern.

3.2.6 Silicate

Die große Gruppe der Silicate umfasst sehr viele Verbindungen natürlichen und synthetischen Ursprungs, die in großem Maßstab in Verbindungen des täglichen Gebrauchs eingesetzt werden. Aufgrund dieser Vielfalt ist dieses Themengebiet von der Fachdidaktik gut erschlossen, da es zum einen Anknüpfungspunkte an Lehrplaninhalte bietet und zum anderen einen kontextorientierten Chemieunterricht ermöglicht.

Ein prominentes Beispiel sind die Zeolithe, die in Waschmitteln, Geschirrspülmaschinen und Trocknungsmitteln eingesetzt werden. In den letzten Jahren gab es vermehrt Nutzungsansätze für Zeolithe als Wärmespeicher. Bei der Adsorption einer Substanz, bsp. Wasser, wird Wärme frei; umgekehrt kann durch Wärmezufuhr diese adsorbierte Substanz wieder freigesetzt werden. Dieses Wechselspiel aus Ad- und Desorption lässt sich hervorragend zur Wärmespeicherung oder Kühlung nutzen und wird u.a. zur Getränkekühlung und in der Gebäudedämmung eingesetzt. In der fachdidaktischen Literatur ist dieser Sachverhalt aufgegriffen worden [156], [157]. In der folgenden

Tabelle 15: *Experimentelle Ansätze zu Silicaten in der fachdidaktischen Literatur*

Isolierung von Zeolithen aus Waschmittel [145]
 Herstellung von Zeolithen [146], [147], [148]
 Untersuchung der Adsorptionseigenschaften von Zeolithen bei verschiedenen Temperaturen und Selektivitätsunterschiede [145]
 Zeolithe als Wärmespeicher [149]
 Untersuchung von pH-Wert, Polarität und Reaktionsfähigkeit von Zeolithen in wässrigen Lösungen [146]
 Nachweis von löslichen Silicaten in Waschmittel [150]
 Zeolithe als Molekularsieb und Adsorptionsmittel [146], [79], [149]
 Verwendung von Zeolithen als Katalysatoren [151]
 Synthese von Perglanzpigmenten [152]
 Reinigung von Apfelsaft und Bleichen von Altöl [153], [154]
 Geruchsabsorption in Katzenstreu [153], [155]
 Bentonit als Katalysator bei Synthese von Salicylsäuremethylester [153]
 Vergleich der Quell- und Dichteigenschaften von Bentoniten [153], [154]

Tabelle 16: *Silicate in Schulbüchern*

| Kategorie | Inhalt |
|-------------------------|---|
| fachliche Informationen | Zeolithe in Waschmittel [89, S.253 ff.], [132, S.416] [94, S.362 ff.], [93, S.391] Mörtel und Zement [89, S.254 f.], [134, S. 224 f.], Mörtel, Zement und Keramik [110, S.224 ff.] |
| Aufgaben | Silicatstrukturen, Tonschichten im Boden, Vergleich von Kalkmörtel und Zement [110, S.226] Silicatstrukturen, Zeolithe in Molekularsieben [94, S.240] |
| Experimente | Zeolithe in Waschmittel [89, S.253 ff.] Vergleich von Kalk- und Zementmörtel [89, S.254 f.] Wasseraufnahme von Ton [134, S. 224 f.] Herstellung und Vergleich von Kalk und Zement [110, S.225] |

Tabelle 15 sind die wichtigsten Experimente zu Schicht- und Gerüstsilicaten zusammengetragen.

Analog zu der guten Etablierung der Silicate in der fachdidaktischen Literatur sind die Fundstellen in den untersuchten Schulbüchern zahlreich (siehe Tabelle 16). Allerdings wird die große Verbindungsgruppe der Silicate in den meisten Fällen nur exemplarisch am Beispiel der Zeolithe behandelt.

In Schulbüchern werden Silicate oft den Baustoffen zugeordnet. Die Betrachtung bleibt aufgrund der komplexen chemischen Vorgänge meistens auf der phänomenologischen Ebene ohne auf die Bedeutung der enthaltenen Siliciumverbindungen einzugehen. Es finden sich Experimente zum Vergleich verschiedener Baustoffe.

3.3 Thematische Eingrenzung

Die Siliciumchemie lässt sich in so viele Teilbereiche mit ihren jeweils eigenen Schwerpunkten aufteilen, dass eine Bearbeitung aller Themen im Rahmen dieser Arbeit nicht zielführend wäre. Eine ausführliche Darstellung der Ausgangslage in der Literatur in Unterkapitel 3.2 wurde daher als Grundlage für die thematischen Eingrenzung genutzt. Einige Teilbereiche sind bereits ausgiebig in der fachdidaktischen Literatur dokumentiert. Die Themenfelder wurden danach ausgewählt, ob sie für den Chemieunterricht thematisch und experimentell ergiebig sind. Neben einer Behandlung in einem kompetenzorientierten Unterricht war die Entwicklung von Experimenten, die vom Schwierigkeitsgrad und dem Gefährdungspotential für SchülerInnen geeignet sind, maßgeblich. Die Teilbereiche Glas, Wasserglas und Silicate zählen zu den gut etablierten Themen der Siliciumchemie in der fachdidaktischen Forschung. Dies umfasst sowohl klassische Herangehensweisen, wie auch neuere, kontextorientierte Ansätze, die einen lebensweltlichen Bezug berücksichtigen. In anderen Bereichen der Siliciumchemie stellt sich die Sachlage deutlich anders dar: Besonders Silica-Verbindungen dienen bei experimentellen Durchführungen überwiegend als Hilfsstoffe und werden nicht weiter thematisiert. Mit Hinblick auf die stetig wachsende Anzahl von Gegenständen des täglichen Gebrauchs, die eine Silica-Verbindung enthalten, stellt die Untersuchung der Verbindungsgruppe im Chemieunterricht einen wichtigen Beitrag für einen sinnstiftenden Wissenserwerb dar.

Einer der innovativsten Verbindungsgruppen sind die Silicone mit ihrem großen Entwicklungspotential. Die aktuellen Ansätze zur Thematisierung der Polymere im Chemieunterricht berücksichtigen bereits viele Bezugsmöglichkeiten zur Lebenswelt der SchülerInnen. Die Verbindungen finden sich aber in so vielen verschiedenen Alltagsgegenständen, dass hier noch Raum zur Entwicklung ist. Es bieten sich viele Ansätze für eine direkte Arbeit mit Gegenständen aus dem Alltag anstelle von Industriechemikalien, zu denen die SchülerInnen wenig Bezug haben. Lohnenswerte

Themen sind vor allem ausgewählte Baustoffe und die Kosmetika.

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt bei der Entwicklung von Experimenten und Materialien zu den Siliconen und den Silica-Verbindungen unter einer bevorzugten Nutzung von Alltagsgegenständen. Wenn dies nicht möglich war, wurden entsprechende Modellexperimente entwickelt. Zusätzlich wurden einzelne experimentelle Ansätze für die Arbeit mit elementarem Silicium optimiert. Die zugehörige Thematik ist zwar seit Jahren in der Fachdidaktik bekannt, es gibt aber bezüglich des experimentellen Zugangs Möglichkeiten der Optimierung, um das Potential bereits bestehender Versuche voll auszuschöpfen. Die einzelnen Experimente werden in Kapitel 4 genauer vorgestellt und in Kapitel 5 vollständig mit allen Details der Durchführung aufgelistet.

Die experimentelle Arbeit zu den Siliconen, den Silica und dem elementaren Silicium nimmt mit der bevorzugten Nutzung von Gegenständen des täglichen Gebrauchs deutlichen Bezug zur Alltagsorientierung, da die Lebenswelt der SchülerInnen bei der Auswahl der untersuchten Gegenstände und Phänomene berücksichtigt werden soll.

3.3.0.1 Umfragen zur Bekanntheit von Alltagsgegenständen aus Siliciumverbindungen

Es wurde auch die Bekanntheit von Alltagsgegenständen aus den ausgewählten Siliciumverbindungen bei Lehrkräften miteinbezogen. Gerade wenn diese Gegenstände zur Klärung fachlicher Inhalte hinzugezogen werden sollen, wäre ein hoher Bekanntheitsgrad nützlich. Es wurden daher in einer nicht-repräsentativen Umfrage 41 Lehrkräfte zu diesen Verbindungen und ihren Alltagsanwendungen befragt. Der Fragebogen ist im Anhang aufgeführt.

Die Befragten nahmen an Fortbildungsveranstaltungen des Lehrerfortbildungszentrums Frankfurt teil, die Themen abseits der Siliciumchemie behandelten. Es kann daher nicht von einem überdurchschnittlich hohen Interesse an der Chemie des Siliciums ausgegangen werden.

Bei den Siliconen wurden besonders oft Begriffe aus der Kategorie *Dichtstoffe* genannt, gefolgt von solchen, die unter *medizinische Anwendungen* einzuordnen sind (siehe Tabelle 17). Etwas weniger oft wurden Begriffe der Kategorien *Hitzebeständige Anwendungen*, besonders die elastischen Backformen, und *Kosmetika* genannt. Dies lässt einen Rückschluss auf einen hohen Grad der Bekanntheit von Dichtstoffen, Implantaten und Backformen aus Siliconen zu. Auch die Verwendung in Kosmetikprodukten ist bekannt.

Bei den Silica-Verbindungen überwog deutlich die Nennung als Trockenmittel oder als Hilfsmittel in der Chromatographie. Dies deckt sich mit der fachdidaktischen Literatur, welche überwiegend diese Funktion als Hilfsstoff nutzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt.

Das elementare Silicium schließlich wurde besonders oft in der Verwendung als Halbleiterelement, auch für Solarelemente genannt. Hier tauchen auch Begriffe zur Herstellung von Waferscheiben

Tabelle 17: Aussagen der Umfrageteilnehmer zu Siliconen im Alltag

| Kategorie Anwendung | von den Befragten genannte Begriffe |
|-------------------------|---|
| Kleben und Dichten | Dichtungsmittel, Dichtungsmasse, Abdichten, Kleben, Abdichtungen, Dichtungen, Fugenfüller, Fugenmasse, Ver fugungen, Dichtmittel, Abdichtstoffe, Fugen Silicondichtung, Dichtungsmaterial, Fugenmaterial |
| Medizin | Brustimplantate, „Silicon-Busen“, Schönheitschirurgie, Implantate |
| Kosmetika | Kosmetik, Shampoo, Kosmetika, Haarshampoo, Zahnpasten |
| Temperaturbeständigkeit | Backformen, Backfolien, Teigschaber, Hitzeschutzhandschuhe hitzebeständige Kunststoffe, Hitzeschutz |
| Schmierstoff | Schmieröle, Schmierstoffe, Schmiermittel, Fette, Siliconöl |
| anderes | Handy, Handyschutzhüllen, Computer, Solarzellen, Schnuller Tauchsportartikel, Spielzeug |

und Halbleiterelementen auf (siehe Tabelle 18). Diese Erkenntnisse werden bei der experimentellen Entwicklung berücksichtigt.

Tabelle 18: Aussagen der Umfrageteilnehmer zu Silicium im Alltag

| Kategorie Anwendung | von den Befragten genannte Begriffe |
|---------------------------------------|--|
| Herstellungsprozess Halbleitertechnik | Herstellung von Wafern, Wafer, Halbleiterproduktion Halbleiter, Informationstechnik, Computerschaltkreise, Technik, PC, Halbleitertechnik, Computerbranche, Bestandteil von Platinen, Mikrochips, Computerelektronik, Speicherkarten, Computer, Chipkarten, Computertechnik, Akkumulatoren |
| Solartechnik | Solarzelle, Solarenergie, Solarzellen, Solar |

Tabelle 19: Aussagen der Umfrageteilnehmer zu Silica im Alltag

| Kategorie Anwendung | von den Befragten genannte Begriffe |
|-------------------------------|--|
| Chromatographie Trockenmittel | Kieselgel, Chromatographie, DC-Platten, Adsorptionsmittel Trockenmittel, „Kissen“ zum Trocknen von Elektronik, Kieselgelgefüllte Tütchen in Kleidung, Trocknungsmittel, Trocknungsmittel in Schuhen und Handtaschen, Exikkator Trockenmasse im Exikkator |
| Kosmetik | Zahncreme, Peeling |
| Nahrungsmittel | Nahrungsergänzungsmittel |
| Füllstoff | Sprengstoffe, Kakaopulver, Tablettenhilfsstoffe, Füllmaterial, Zusatzstoff |

3.4 Begründung für neue Experimente

3.4.1 Bedeutung des Experiments für den Unterricht

Das experimentelle Arbeiten stellt ein zentrales Verfahren in der Fachwissenschaft Chemie dar, so dass eine Vermittlung dessen im Unterricht eine Einführung in die fachwissenschaftlichen Vorgehensweisen ermöglicht.

Im Gegensatz zum experimentellen Arbeiten in der Fachwissenschaft Chemie wird im Chemieunterricht nicht eine Hypothese mit unsicherem Ergebnis untersucht, sondern es wird ein bereits bekanntes Ergebnis didaktisch veranschaulicht. Das Experiment ist daher ein zentrales Element im Prozess der Erkenntnisgewinnung [158, S.292 ff.].

Guter Chemieunterricht beinhaltet nicht bloßen Wissenserwerb, sondern den Aufbau einer anschlussfähigen Grundbildung, welche die Grundlage für eine Auseinandersetzung mit naturwissenschaftlichen Fragestellungen des Alltags im späteren Leben in einer durch Naturwissenschaft-

ten und Technik geprägten Welt bildet [159]. Der Erwerb von Fachwissen reicht dazu nicht aus, vielmehr müssen die kognitiven Fähigkeit zum Umgang mit diesem inhaltlichen Wissen erlernt werden. Die Entwicklung dieser Kompetenzen, die zusätzlich motivationale Aspekte beinhalten, stellt die Grundlage für einen modernen Chemieunterricht dar [160].

Das experimentelle Arbeiten nimmt in einem kompetenzorientierten Chemieunterricht eine Sonderstellung ein, da es im besonderen Maße eine Eigenaktivität der SchülerInnen ermöglicht. Dies alleine genügt aber nicht zur Steigerung eines Lerneffekts im Vergleich zu Unterricht, in dem nicht von SchülerInnen experimentiert wird [161]. Das experimentelle Arbeiten in einem aktivierenden Unterricht darf dabei nicht im Sinne des „Abarbeitens eines Rezepts“ ablaufen, sondern muss die Eigenaktivität der SchülerInnen im Denken und Handeln fördert [162, S.14].

Die didaktische Funktion eines Experiments variiert mit dem Einsatz im Unterricht. Je nach Problemstellung lassen sich induktive oder deduktive Vorgehensweisen im Erkenntnisweg realisieren [158, S.292 ff.]. Die Durchführung eines Experiments umfasst aufeinander abfolgende Schritte, wie die Planung und die Durchführung des Experiments, die Protokollierung und die Auswertung der Beobachtungen. Bei der Unterrichtsmethode des forschend-entwickelnden Lernens sollten die SchülerInnen in allen Phasen in die Planung miteinbezogen werden, um einen hohen Anteil an Eigenaktivität zu ermöglichen.

Zu einer vorgegebenen Fragestellung werden daher keine zu engen Vorschriften hinsichtlich Aufbau und Geräten gemacht. Vielmehr müssen die SchülerInnen das Vorgehen zum Lösen eines Problems eigenständig planen und umsetzen. Diese Eigenaktivität ermöglicht das direkte Nachvollziehen und Üben von wissenschaftlichem Arbeiten und schafft wiederum selbst anschlussfähiges Wissen, auf dem die SchülerInnen aufbauen können.

Mit dieser Vorgehensweise werden neben dem Wissenserwerb weitere Kompetenzen im sozialen Umgang, bzgl. der Kommunikation oder im Bewerten von Sachverhalten gefördert. Eine ausführliche Darstellung dieses kompetenzorientierten Chemieunterrichts findet sich bei Parchmann [163]. Neben kognitiven Lernzielen werden auch psychomotorische Lernziele erreicht, indem handwerkliches Geschick, sowie genaues Beobachten und Beschreiben geschult werden. Es wird dabei immer voraus gesetzt, dass die gewählten Experimenten für die Altersstufe angemessen sind und das Vorwissen der SchülerInnen berücksichtigt.

Generell muss ein gutes Experiment für den Chemieunterricht einen deutlichen Effekt zeigen und mit hoher Gelingsicherheit in reproduzierbarer Weise durchführbar sein. Die Sicherheit der Lehrkräfte und SchülerInnen muss dabei immer gewährleistet werden [158, S.292 ff.].

3.4.2 Experimente zur Siliciumchemie

Eine Entwicklung neuer experimenteller Ansätze zur Siliciumchemie wird durch das Anknüpfen an den aktuellen Stand in der fachwissenschaftlichen Forschung begründet. Der wissenschaftliche Kenntnisstand entwickelt sich auch in dieser Teildisziplin der Chemie stetig weiter und bildet die Grundlage für innovative Neuerungen, die sich in neuen Anwendungsmöglichkeiten im Alltag wiederfinden (siehe Kapitel 2). Diese Gegenstände sind SchülerInnen und LehrerInnen gleichermaßen gut bekannt und eignen sich daher gut als Unterrichtsgegenstand.

Die Thematisierung von Gebrauchsgegenständen aus der Lebenswelt der SchülerInnen ermöglicht gleichzeitig eine Verknüpfung der chemischen Sachverhalte mit schülernahen Fragestellungen [164]. Die Motivation für eine intensive Beschäftigung mit einem Unterrichtsgegenstand wird nachweislich erhöht, wenn eine Einbettung in einen sinnstiftenden Kontext erfolgt. Dies funktioniert dann besonders gut, wenn ein Bezug zu einem bekannten Gegenstand oder Sachverhalt aus der Lebenswelt der SchülerInnen hergestellt werden kann [165].

4 Experimentelle Erarbeitung

In diesem Kapitel werden die Rahmenbedingungen zu den erarbeiteten Experimenten einführend vorgestellt. Es erfolgt eine thematische Einordnung der Experimente bezüglich der Lehrplaninhalte auf einer fachlichen Ebene. Ein Schwerpunkt neben der Thematisierung der Siliciumverbindungen als eigene Substanzklasse ist vor allem die Anschlussmöglichkeit an bereits vorhandene, grundlegende Themen des Chemieunterrichts als innovative Alternative.

Der Alltagsbezug der experimentellen Ansätze wird ebenfalls vorgestellt, da eine starke Kontextorientierung angestrebt wird.

Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Experimente folgt in dem sich anschließenden Kapitel 5.

4.1 Silicone

4.1.1 Besonderheiten von Siliconelastomeren

Die Silicone unterscheiden sich in ihren Eigenschaften teilweise beträchtlich von anderen Makromolekülen. Dies betrifft beispielsweise das Verhalten bei extremen Temperaturen oder das träge Reaktionsverhalten gegenüber vielen Chemikalien. Dieses abweichende Verhalten ist überwiegend auf die Bindung zwischen den Silicium- und den Sauerstoffatomen in Kombination mit den organischen Seitenketten zurückzuführen.

Für die vorgestellten Versuche wurde Naturkautschuk als Vergleichsmaterial gewählt, da es sich um ein typisches Polymer handelt, wie es meist verbindlich im Thema *Polymerchemie* im Chemieunterricht behandelt wird. So wird eine sinnvolle Anknüpfungsmöglichkeit für die Siliconchemie an andere Unterrichtsinhalte geschaffen.

Silicone und Naturkautschuk werden u.a. als Saugaufsatz für Babyflaschen verwendet, die im Handel leicht erhältlich sind. Alternativ werden Einmalhandschuhe aus Naturkautschuk und Siliconfolien aus dem Medizinbedarf empfohlen, wenn die Durchführungszeit der Experimente verkürzt oder die Untersuchung dünner Oberflächen fokussiert werden soll.

Die Temperaturabhängigkeit der elastischen Eigenschaften bei tiefen Temperaturen kann mit einfachen Mitteln nach dem Abkühlen der Polymerproben im Tiefkühlfach oder mit tiefkalt verflüssigtem Stickstoff (Variante für den Demonstrationsversuch) verglichen werden. Es wird auf einen Vergleich der elastischen Eigenschaften des Siliconelastomers und des Naturkautschuks bei hohen Temperaturen verzichtet, da sich hier in dem für die Schule realisierbaren Temperaturbereich nur geringe Unterschiede zeigen. Stattdessen wird die Untersuchung des Brennverhaltens aufgegriffen, wie bei Tausch gezeigt [75, S.25 ff.].

Im Vergleich zu anderen Polymeren, wie Naturkautschuk ($T_{Zersetzung} = \text{ca. } 300 \text{ } ^\circ\text{C}$), liegt der Flammpunkt von Siliconen bei ca. $750 \text{ } ^\circ\text{C}$ deutlich höher [166, S.588]. Die Auswahl geeigneter Seitenketten mit Fluorsubstituenten führen zu einer weiteren Steigerung, doch bereits für PDMS lässt sich das hochtemperaturstabile Verhalten gut untersuchen. Während der Verbrennung sollte auf die Flammenfarbe und die Rauchentwicklung geachtet werden; direkt nach der Reaktion werden die Konsistenz und Form des Verbrennungsrückstands miteinander verglichen (siehe Abschnitt 5.1.1).

In einem sich anschließenden Versuch wird die Reaktionsträgheit der Silicone beispielhaft im Vergleich mit Naturlatex gegenüber Leichtbenzin, Paraffin- und Siliconöl untersucht (siehe Abschnitt 5.1.2). Der Fokus liegt hier bei Chemikalien, die zur Reinigung der Elastomere in Frage kommen. Dieser Versuch ist eine Variante des Versuchs zur Chemikalienbeständigkeit bei Tausch [80]. Diese einfachen Experimente eröffnen die Möglichkeit mit einfachen Methoden ein Silicon und ein anderes Polymer im Experiment zu vergleichen. So können Aspekte der Polymerchemie mit motivierenden Inhalten aus dem Alltag erarbeitet werden.

4.1.2 Dichtstoffe

Die Silicondichtstoffe zählen zu den bekanntesten Alltagsgegenständen aus einem Siliconelastomer. Es ist anzunehmen, dass die meisten SchülerInnen die Anwendung eines solchen Dichtstoffs einmal miterlebt oder sogar selbst durchgeführt haben.

Im Folgenden werden zwei Gruppen von Experimenten vorgestellt. Dies sind zum einen Experimente zum Vergleich von Silicondichtstoffen mit einem anderen Dichtstoff, zum anderen Experimente, welche ausschließlich auf die Untersuchung von Silicondichtstoffen untereinander abzielen. Beide Experimentengruppen lassen sich mit einem unterschiedlichen Schwerpunkt einsetzen. Während die erste Gruppe auf die Materialeigenschaften abzielt, fokussiert die zweite Gruppe eine Thematisierung der Polymerisationsmechanismen, wie sie der Reaktion während des Aushärtens zugrunde liegen.

4.1.2.1 Vergleich von verschiedenen Dichtstoffen

In der fachdidaktischen Literatur werden experimentelle Ansätze für einen Vergleich von Silicondichtstoffen beschrieben, die sich auf Gips als Vergleichsmaterial beziehen [75]. Diese Ansätze wurden aufgegriffen und in einer erweiterten Form auf die zwei sehr gängige Dichtstoffe im Einzelhandel, einen Acrylatdichtstoff und einen sauer vernetzender Silicondichtstoff, angewendet. Es handelt sich meist um die beiden preisgünstigsten Dichtstoffe, die in jedem Baumarkt erhältlich sind.

Während der Silicondichtstoff auf chemischem Weg über eine Polykondensation vernetzt wird, liegen in dem Acrylatdichtstoff bereits fertig vernetzte Polymere in Wasser suspendiert vor. In diesem Dichtstoff finden während des Abbindens ausschließlich physikalische Vorgänge statt, da das Lösemittel verdunstet. Der Silicondichtstoff reagiert hingegen in einer chemischen Reaktion mit Wasser aus der Luftfeuchtigkeit. Eine Untersuchung der Temperaturentwicklung in den ersten Minuten der Abbindephase liefert daher einen Hinweis darauf, ob eine chemische Reaktion oder ein physikalischer Prozess abläuft (siehe Unterkapitel 5.1.3).

Ein weiteres zu überprüfendes Kriterium ist die Geruchsentwicklung während des Abbindens. Diese liefert erste Hinweise darauf, dass ein weiteres Produkt neben dem vernetzten Polymer in der Abbindephase entsteht. Dies ist nur bei dem Silicondichtstoff der Fall, da hier eine Polykondensation unter Eliminierung einer spezifischen Abgangsgruppe abläuft. Dies ist in Abschnitt 2.2.3 beschrieben worden.

In weiteren Experimenten wird das Verhalten der ausgehärteten Dichtstoffe miteinander verglichen. Es werden exemplarisch das Verhalten der Materialien gegenüber Wasser (Unterkapitel 5.1.4), sowie die Überstreichbarkeit untersucht (Unterkapitel 5.1.5). Es werden die Unterschiede in der Überstreichbarkeit der beiden Dichtstoffe verdeutlicht, was zusätzlich mögliche Anwendungsfehler in der alltäglichen Anwendung sichtbar macht.

Die Beständigkeit gegenüber Wasser ist nicht für alle Fugendichtstoffe gleich, da sie für verschiedenen Anwendungsfelder entwickelt wurden. Ein Silicondichtstoff kann problemlos in einer wässrigen Umgebung angewendet werden, da keine Wechselwirkung statt findet, was für den Acrylatdichtstoff nicht gegeben ist.

4.1.2.2 Silicondichtstoffe

Die folgenden Experimente dienen dem Vergleich der verschiedenen Silicondichtstoffe miteinander. Die Silicondichtstoffe vernetzen in einer Polykondensation mit Beteiligung von Luftfeuchtigkeit unter Eliminierung eines Spaltprodukts. Es wird mit drei ausgewählten Dichtstoffen gearbeitet, die im Handel gut erhältlich sind. Neben einem sauer vernetzenden Acetat-Dichtstoff (Eliminierungsprodukt Essigsäure) kommen ein neutral vernetzender Alkoxy-Dichtstoff (Eliminierungsprodukt Alkohol, oft Methanol) und ein basisch vernetzender Amin-Dichtstoff (Eliminierungsprodukt Amin) zum Einsatz. Der allbekannte sauer vernetzende Dichtstoff setzt einen charakteristischen Geruch nach Essigsäure frei. Der Alkoxy-Dichtstoff entwickelt keinen charakteristischen Geruch, während der Amin-Dichtstoff leicht nach verwesendem Fisch riecht. Dieser Geruch ist bei den heutzutage erhältlichen Dichtstoffen aber nur schwach ausgeprägt, so dass ein Vergleich des Geruchs höchstens als Vorversuch dienen kann.

Die Dichtstoffe lassen sich allerdings gut über den pH-Wert ihrer Eliminierungsprodukte in wässriger Lösung unterscheiden. Es wurde auf Versuchsvorschriften von Hardam zurückgegriffen [81]

und auf weitere Dichtstoffe neben dem bekannten sauer vernetzenden Silicon ausgeweitet. Darüber hinaus ist in den folgenden Versuchsvorschriften die Handhabung der Dichtstoffe optimiert worden. In Versuchsvariante 1 wird der Dichtstoff in eine Agar-Agar-Lösung eingebracht, bei der die Gelbildung bereits begonnen hat. Dies bietet den Vorteil, dass der Dichtstoff aushärtet, während der Agar-Agar geliert, so dass keine schwer entfernbaren Siliconreste auf den verwendeten Geräten zurück bleiben. Der ausgehärtete Dichtstoff in dem gelierten Agar-Agar kann nach dem abgeschlossenen Versuch leicht in den Hausmüll entsorgt werden, wobei eine Verschmutzung der verwendeten Glasgeräte vermieden wird.

Beim Arbeiten in wässriger Lösung werden Glasgeräte mit einer möglichst weiten Öffnung verwendet. Für den Schülerversuch eignen sich große Demonstrationsreagenzgläser, in welche der Dichtstoff mit Hilfe eines Glasstabs eingebracht wird. Für einen Ansatz in einem größeren Maßstab können große Standzylinder verwendet werden. Die Dichtstoffe werden auf Objektträger zum Mikroskopieren aufgetragen und mit Hilfe einer Tiegelzange in die Lösung im Standzylinder eingebracht.

Nach der Überprüfung des pH-Werts werden die Eliminierungsprodukte genauer mit Hilfe verschiedener Nachweisreaktionen identifiziert. Neben der Einbindung in das Themengebiet der Polymerchemie wird so ein weiterer Anknüpfungspunkt im Themenbereich *Analytik* im Wahlthema *Angewandte Chemie* ermöglicht.

Das Eliminierungsprodukt des sauer vernetzenden Dichtstoffs kann leicht über eine Reaktion der entstehenden Essigsäure mit Kupfer in einer feuchten Umgebung nachgewiesen werden. Es entsteht ein Gemisch verschiedener Kupferacetate, die sich deutlich sichtbar auf der Kupferoberfläche abscheiden. Dieser Versuch zeigt daher gleichzeitig auch anschaulich die Anwendungsgrenzen des Acetoxy-Silicondichtstoffs auf, da eine Anwendung auf Buntmetallen, wie Kupfer, nicht zu empfehlen ist (siehe Abschnitt 5.1.9).

Das Eliminierungsprodukt eines Alkoxy-Dichtstoffs kann zunächst über eine literaturbekannte Redoxreaktion mit Kaliumpermanganat von der Essigsäure unterschieden werden, wie in Abschnitt 5.1.7 gezeigt. Diese Reaktion ist sowohl im sauren, wie auch im basischen pH-Bereich durchführbar. Dies zeigt Möglichkeiten zur Thematisierung im Rahmen der Redoxchemie zu Beginn der Sekundarstufe II auf. Für diesen Versuch sollte ein sauer vernetzender Dichtstoff eingesetzt werden, der für die Verarbeitung an Aquarien und anderen Trinkwasserbehältern geeignet ist. Ein solcher Dichtstoff enthält keine Fungizide (bsp. Thiazoline), die fälschlicherweise einen vermeintlich positiven Nachweis in der Reaktion mit Kaliumpermanganat zur Folge haben. Im Gegensatz enthält ein Dichtstoff für den Einsatz im Sanitärbereich immer einen Fungizid, um die Haltbarkeit des ausgehärteten Materials zu verlängern.

Das alkoholische Produkt kann in einem abschließenden Experiment mit Hilfe der Chromotropsäure-

Reaktion eindeutig als Methanol identifiziert werden. Dies ist in Abschnitt 5.1.8 gezeigt.

Didaktisch erscheinen die Acetoxy- und Alkoxydichtstoffe als zwei alltagsnahe Beispiele interessant, an denen die Polykondensationsreaktion zur Synthese von Siliconen mit einfachen schul-experimentellen Möglichkeiten eindrucksvoll nachvollzogen werden kann. Die zugehörigen Experimente zur Untersuchung der Eliminierungsprodukte verschiedener Silicondichtstoffe eignen sich hervorragend zur Erarbeitung der Polykondensation als Polymerisationsreaktion. Sie stellen innovative experimentelle Zugänge unter Verwendung gut bekannter Alltagsprodukte dar, die alternativ zu klassischen Experimenten in diesem Themenfeld, wie der Grenzflächenkondensation zur Herstellung von Nylon, im Chemieunterricht genutzt werden können.

Andererseits bieten die Nachweisreaktionen Anknüpfungspunkte zu anderen Themen des Chemieunterrichts, so dass die Versuche auch in einem anderen Kontext als der Polymerchemie eingesetzt werden können.

Die Versuche lassen sich daneben mit Hilfe von Interaktionsboxen in den Chemieunterricht integrieren, so dass die SchülerInnen die unbekanntesten Dichtstoffe mit notwendigen Informationen und Materialien zur Verfügung gestellt bekommen und eigenständig experimentieren können.

4.1.3 Funktionskleidung

Silicone können, wie in Abschnitt 2.2.4 beschrieben, zur Ausrüstung von Kleidungsstücken eingesetzt werden. Die Vielfalt der Siliconverbindungen ermöglicht die Synthese von Polymeren, die zur Modifizierungen verschiedener Eigenschaften von Textilien genutzt werden können.

In den entwickelten Modellexperimenten werden zwei verschiedene Silicone zum Beschichtungen für Textilien genutzt. Zum einen wird eine aminofunktionelle Siliconverbindung verwendet, die polare Wechselwirkungen mit einer Baumwolloberfläche eingehen kann. Dies wird zum Ausrüsten von alltäglichen Kleidungsstücken, wie Pullovern oder T-Shirts, genutzt, um einen optimierten Weichgriff zu erzeugen.

Diese Einsatzmöglichkeit von Siliconen auf Textilien ist besonders interessant für den Chemieunterricht, da die SchülerInnen jeden Tag mit solchen Kleidungsstücken in Berührung kommen, sich aber im Regelfall nicht über die eingesetzten Chemikalien bewusst sind. Diese anwendungsorientierte Versuchsreihe wird dem Themenfeld der Polymerchemie zugeordnet.

Es wird ein vernetzungsfähiges Silicon zur Hydrophobierung einer Baumwolloberfläche herangezogen, wie es für Regenschutz- und Arbeitskleidung benötigt wird. Eine solche Beschichtung kann gleichzeitig die Neigung zur Verschmutzung reduzieren. Die vernetzungsfähigen Silicone werden in einer nachfolgenden Reaktion vernetzt. Als Modellmaterial wird hier im Experiment ein Acetoxy-Silicondichtstoff als gut erhältliches Beschichtungsmaterial aus dem Baumarkt genutzt.

Die beiden Silicone werden in nachfolgenden Experimenten hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Beschichtungsmaterial miteinander verglichen. Das aminofunktionalisierte Siliconöl soll die Haptik optimieren, hat aber keine hydrophobierende Wirkung. Nur der Silicondichtstoff ist für eine wasserabweisende Beschichtung geeignet (siehe Abschnitt 5.1.10).

In einfachen experimentellen Ansätzen können die SchülerInnen selbst die wasserabweisenden, sowie die schmutzabweisenden Eigenschaften der präparierten Stoffproben experimentell überprüfen (siehe Unterkapitel 5.1.11 und 5.1.12).

Eine Untersuchung der Durchlässigkeit für Wasserdampf rundet diese Versuchsreihe ab (siehe Abschnitt 5.1.13). Es wird die Durchlässigkeit für Wasserdampf der beschichteten Stoffproben getestet. Flüssiges Wasser kann den Stoff nicht durch die Siliconbeschichtung durchdringen. Dies soll das Regenwasser zurückhalten. Wasserdampf, der durch Transpiration entsteht, wird dagegen durch den Stoff vom Körper weg geleitet, denn Silicone sind durchlässig für die kleinen Wassermoleküle in der Gasphase (siehe Kapitel 2.2).

Der Nachweis von Wasser erfolgt nur qualitativ. Alternativ könnte entstehender Wasserdampf auch durch die Kondensation in einem Becherglas nach einem Vorschlag von Herzog nachgewiesen [167, S.32] oder halb-quantitativ nach Sieve durch Rückwiegen des Wassers zur Bestimmung der verdampften Wassermenge ermittelt werden [168, S.17].

Mit Hilfe der Versuchsreihe lernen die SchülerInnen zwei Arten der Textilausrüstung kennen, können dies auf die Struktur der jeweiligen Silicone ableiten und die Unterschiede zwischen den beiden Beschichtungen erkennen.

Es werden aber nicht nur Textilien für Kleidungsstücke entsprechend ihrer geplanten Einsatzmöglichkeiten chemisch ausgerüstet, sondern auch technische Textilien. Stabile Siliconbeschichtungen finden sich beispielsweise auf Airbags, wie sie in Kraftfahrzeugen verbaut sind. Inzwischen gibt es erste Ansätze zur Rückgewinnung der Siliconbeschichtung der Airbags, die vor dem Verschrotten des Fahrzeugs ausgebaut und wiederverwertet werden können. Dies wird in einem weiteren Experiment aufgegriffen.

4.1.4 Äquilibrierung und Recycling

Die Silicone lassen sich, wie alle anderen synthetischen Makromoleküle auch, nur schwer unter natürlichen Bedingungen und mit geringem Energieaufwand wieder in ihre Edukte zerlegen. Dies wird durch die ausgeprägte Chemikalienbeständigkeit, verglichen mit anderen Polymeren, zusätzlich erschwert.

Es kann aber eine Besonderheit der Siliconchemie genutzt werden: In der Äquilibrierungsreaktion finden unter sehr basischen Bedingungen gleichzeitig ablaufende Depolymerisations- und Poly-

merisationsreaktionen statt, bis sich eine Gleichgewichtslage einstellt (siehe Abschnitt 2.2.1). Ein bereits vernetztes Siliconelastomer wird über diese Reaktionen wieder in ein unernetztes Siliconöl überführt. Dies lässt sich mit Silicondichtstoff gut im Schülerversuch realisieren.

Es ist aber auch möglich eine mit einer dünnen Schicht eines Silicondichtstoffs beschichtete Stoffprobe, wie in Abschnitt 4.1.3 erläutert, dieser Reaktion zu unterziehen. Hier bietet sich die Verwendung eines gefärbten Dichtstoffs an, damit die SchülerInnen den erfolgreichen Ablauf der Reaktion bereits an einem optischen Vergleich der Stoffoberfläche erkennen können. Das gewonnene Siliconöl kann, falls gewünscht, weitergehend in einem einfachen Nachweisverfahren (siehe Abschnitt 5.1.1) identifiziert werden, es ist aber auch eine Charakterisierung mittels IR-Spektroskopie möglich.

Hier wurde ein Gerät *FTIR-8300* der Firma *SHIMADZU CORPORATION* mit dem Messprogramm *HYPERIR 1.57* verwendet. Es wurden die Standardeinstellungen des Programms für die Messparameter gewählt. Die Probenauftragung fand mithilfe eines Kaliumbromid-Presslings statt, der nach allgemeinen Arbeitsvorschriften angefertigt wurde.

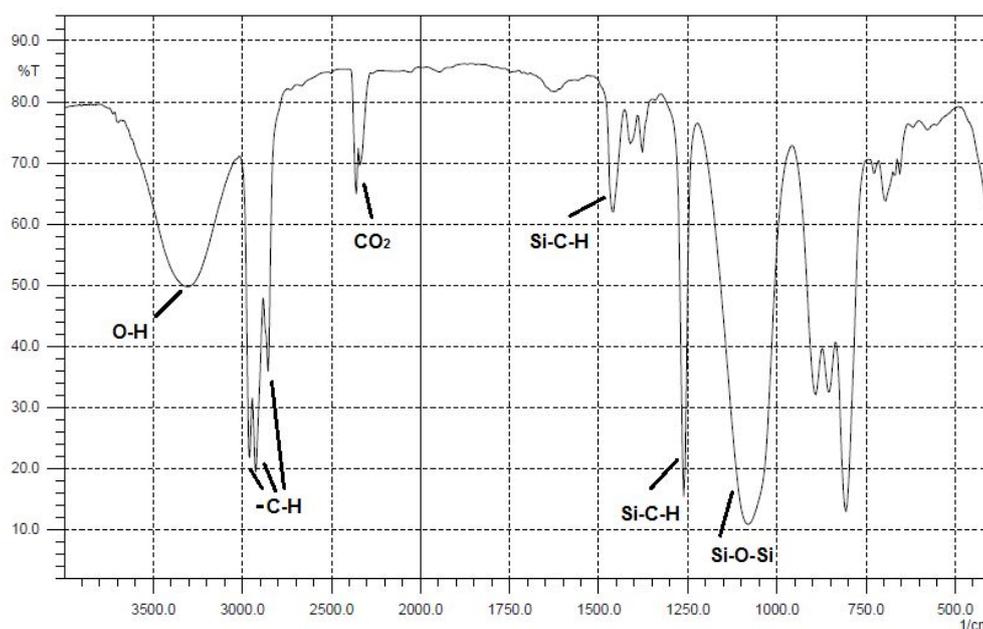


Abbildung 11: IR-Spektrum des äquilibrierten Siliconöls aus dem Dichtstoff

In aufgenommenen IR-Spektren des erhaltenen Öls und dessen Verbrennungsprodukts sind die typischen Banden der CH_3 -, der Si-C- und der Si-O-Schwingung zu erkennen (siehe Abb. 11 und 12).

Das in Abschnitt 5.1.14 beschriebene Experiment ist nach einer Bewertung des Gefahrenpotenti-

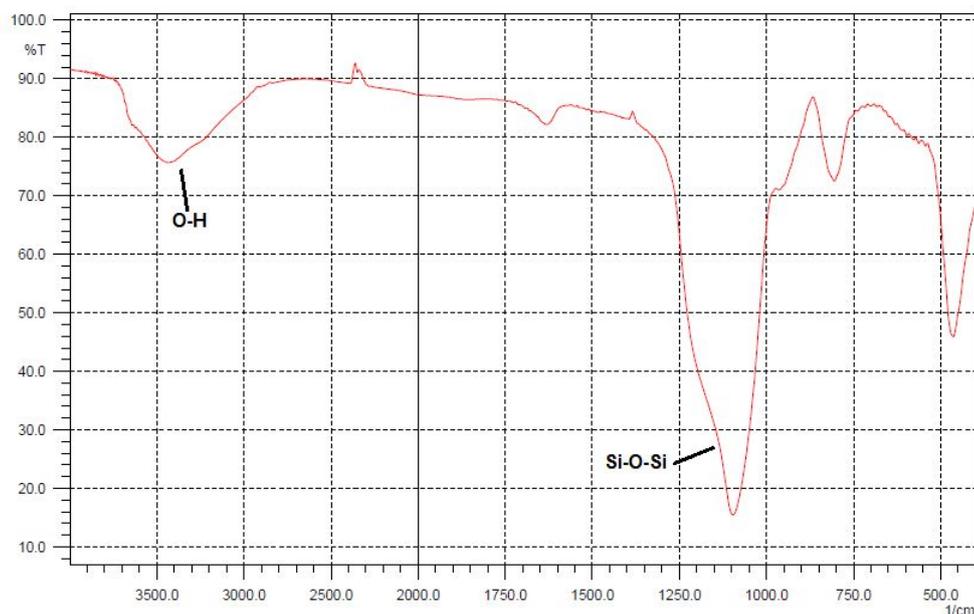


Abbildung 12: IR-Spektrum des Verbrennungsrückstandes des äquilibrierten Siliconöls

als für SchülerInnen geeignet, stellt sich aber als anspruchsvoll bezüglich der Durchführung dar. Mit der eigentlichen Reaktion und der anschließenden destillativen Trennung des Reaktionsgemischs ist es vergleichbar mit Experimenten aus dem organischen Grundpraktikum im Chemiestudium. Im Rahmen einer Facharbeit in der Sekundarstufe II ist die Durchführung gut möglich und kann einen Einblick in das chemische Arbeiten während eines Studiums mit chemischen Inhalten gewähren.

Das Experiment liefert einen lohnenswerten experimentellen Ansatz für die Thematisierung der Recyclingproblematik von Kunststoffen im Chemieunterricht. Die SchülerInnen kennen wiederkehrende Presseberichte über die Auswirkungen von unzureichender Abfallverwertung. Da bietet es sich an, gemäß des Recyclinggedankens das gewonnene Siliconöl als Edukt zu verwenden und wiederum in eine Reaktion einzusetzen. Die SchülerInnen können so auch ein „eigenes“ Produkt herstellen, was meistens einen sehr motivierenden Effekt hat. Um dies zu steigern wird die Synthese von *intelligenter Knetmasse* vorgeschlagen. Das beliebte Spielzeug stellt einen Bezug zu der Lebenswelt der SchülerInnen her und kann so für die Beschäftigung mit dem für viele SchülerInnen zunächst abstrakt erscheinenden Recyclingproblem motivieren.

Das Spielzeug ist je nach Hersteller unter verschiedenen Bezeichnungen, wie *Hüpfender Kitt*, *Silly*, *Bouncing*-, *Tricky*-, *Potty*-, *Thinking-Putty*, erhältlich und besteht aus einem Siliconelastomer, das

sich wie ein nichtnewtonsches Fluid verhält. Die Masse ändert ihre Viskosität in Abhängigkeit der einwirkenden Kraft: Sie zerfließt im Ruhezustand, lässt sich aber bei spontaner Krafteinwirkung zerreißen.

Die Herstellung ist normalerweise nur mit einer vorgeschalteten Silicon-Synthese möglich, die in zwei Stufen ausgehend von Dichlordimethylsilanen über die Zwischenstufe der Oligosiloxane abläuft [169, S.276 f.]. Mit dem hier vorgestellten Versuch wird eine alternative Syntheseroute über ein äquilibriertes Silicon aus einem Alltagsprodukt eröffnet. Diese experimentelle Variante zeichnet sich durch ein geringeres Gefahrenpotential, sowie eine kürzere Durchführung aus und ist als Schülerversuch in der Sekundarstufe II geeignet (siehe Abschnitt 5.1.15).

Die Herstellung der *Intelligenten Knetmasse* folgt literaturbekannten Versuchsvorschriften, unterscheidet sich aber im eingesetzten Edukt [170]. Es wird kein Siliconöl aus Dichlordimethylsilan synthetisiert und in die Reaktion eingesetzt, sondern es wird mit einem äquilibrierten Siliconöl gearbeitet.

4.1.5 Abformmassen

Im aktuellen Schulversuchskoffer *chem2do* der Firma *Wacker Chemie AG* findet sich ein Versuch zur Herstellung einer Abgussform zum Erstellen von Kopien eines Originals unter Verwendung eines zweikomponentigen Silicons der Firma *Wacker Chemie AG*. Ergänzend wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Edukte aus dem Einzelhandel zur Herstellung einer Abgussform getestet (siehe Abschnitt 5.2.1).

Dieses Experiment zur Herstellung einer eigenen Abgussform eignet sich sehr gut zur Thematisierung mehrerer Siliciumverbindungen gleichzeitig, da Silica-Verbindungen als Füllstoffe eingesetzt werden können. Die Beimischung von Siliciumdioxid führt zu einer Erhöhung der Viskosität in der unverarbeiteten Abformmasse. Dies erlaubt andere Verarbeitungsmöglichkeiten.

Bei Tausch und Krees wird vorgeschlagen kleine, abzuformende Gegenstände in einem Becher mit flüssiger Abformmasse einzudrücken [75, S.35 ff.]. Ausgehend davon wurde eine Variante entwickelt, die auf die Einsatzmöglichkeit von Siliciumdioxid als Füllstoff eingeht. Man erhält unter Zusatz einer definierten Menge Siliciumdioxid eine pastöse, streichfähige Masse, die mit einem Spatel leicht auf den abzuformenden Gegenstand aufgebracht werden kann. Dies erlaubt das Kopieren von größeren Gegenständen bei einer nur geringfügigen Steigerung des Verbrauchs an Abformmasse. Gleichzeitig kann experimentell die Wirkung eines Füllstoffs untersucht werden. Dieses Experiment ist in Abschnitt 5.2 eingeordnet, da die Silicone und die Silica-Verbindungen gleichermaßen thematisiert werden können.

Es lassen sich alltagsnahe Bezüge von Siliconabformmassen zur Lebenswelt der SchülerInnen

herstellen, wie z.B. der Gebissabdruck bei einem Zahnarztbesuch. Beinahe jeder hat bereits einmal einen Abdruck des Gebiss für eine Zahnspange o.ä. nehmen lassen. Dies ist eine alltagsbezogene Anwendungsmöglichkeit, die den Vorgang des Abformens fokussiert.

In der Zahnarztpraxis werden verschiedene Abformmassen in Abhängigkeit der weiteren medizinischen Behandlung genutzt. Die Genauigkeit eines Abdrucks mit dem Ziel zur Anfertigung bsp. eines Implantats muss größer sein als bei einem Abdruck des gesamten Gebisses zur allgemeinen Diagnostik.

Besonders oft werden Abformmassen aus Siliconen oder Alginaten eingesetzt. Die Silicone werden für Abdrücke mit einer hohen Genauigkeit und die Alginat für Abdrücke mit einer guten, aber nicht übermäßig präzisen Genauigkeit verwendet. Die Materialien unterscheiden sich in ihrem Dimensionsverhalten (Stabilität der Abmessungen der Form). Gerade bei den Alginatabformungen können sich Änderungen durch Schrumpfung oder Quellung in Abhängigkeit der Lagerbedingungen ergeben [171, S.5-6].

Das Alginatpulver enthält die leicht in Wasser löslichen Natriumsalze der Alginsäure (Polysaccharid aus Glucuron- und Mannuronsäure) und Calciumsulfat als Komplexierungspartner. Das Einrühren des Pulvers in Wasser ermöglicht die Dissoziation der Salze und die Bildung des in Wasser weniger gut löslichen Calciumalginats. Es bildet sich ein elastisches Gel, das rasch fest wird [172].

Es wurden zwei Experimente entwickelt, die einen Vergleich der Abformmaterialien hinsichtlich der Genauigkeit des Abdrucks und der Lagerbedingungen ermöglichen. Beide Experimente können für eine genauere Betrachtung der Materialien aus Sicht der Werkstoffwissenschaften und der zugrundeliegenden chemischen Vernetzungsreaktion herangezogen werden. Der in Abschnitt 5.1.16 aufgeführte Versuch zeigt den Unterschied der Präzision beider Materialien in einer Abformung.

Wenn mit Alginat gearbeitet wird, darf die Form nicht zu lange bis zur Weiterverarbeitung gelagert werden, da sie bei Wasserverlust zu schnell schrumpfen würden. Alginatabformungen können daher im Gegensatz zu Siliconabformungen in der Zahnarztpraxis nicht für permanente Zwecke genutzt werden. Dies wird mit dem experimentellen Ansatz in Abschnitt 5.1.17 verdeutlicht.

4.1.6 Backform

Nach den medizinischen Implantaten und dem Silicondichtstoff ist die elastische Backform einer der bekanntesten Alltagsgegenstände aus Siliconen. Die didaktische Verwendung dieser Backform im Chemieunterricht erweist sich daher als sehr lohnenswert.

Das im vorangegangenen Abschnitt 4.1.5 eingeführte Experiment zur Herstellung einer Abformmasse kann der Behandlung von Siliconbackformen im Chemieunterricht voran gestellt werden.

Dieser Ansatz eignet sich sehr gut zur Herstellung einer Abgussform, allerdings ist der Einsatz als Backform auch bei der Verwendung von lebensmittelechten Siliconen nicht ohne weiteres möglich. Dies ist mit der weiteren Verarbeitung der Abgussform zu begründen.

An den eigentlichen Herstellungsprozess schließt sich der Arbeitsschritt des Temperns an. Hier werden flüchtige Bestandteile, wie niedermolekulare Siloxane, aus der Siliconform ausgetrieben (Verbraucherschutz) und es werden die mechanischen Eigenschaften verbessert, was eine Voraussetzung für einen wiederholten Einsatz bei hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum ist. Dabei wird ein Temperaturprogramm im Trockenschrank (oder auch im Backofen) durchlaufen. Für einen Einsatz als Schülerexperiment erweist sich dies aber als zu unsicher, da die Abfolge des Temperaturprogramms sehr genau eingehalten werden muss. Es wird daher empfohlen die selbst hergestellte Abgussform nur bei Raumtemperatur zu verwenden (bsp. zum Abformen von Seife oder Ton). Das Experiment kann daher gut als Modellexperiment zur Verdeutlichung der Eigenschaften einer Backform aus Siliconelastomer herangezogen werden.

Bei Gussformen für Lebensmittel sollten nur lebensmittelechte Siliconmassen eingesetzt werden, die hinsichtlich der Verwendung mit Lebensmitteln geprüft sind und die Vorgaben für Lebensmittel und Bedarfsgegenstände nach § 5 Abs. 1 Nr. 1 des Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände und Futtermittelgesetzbuchs (LFGB) vom 01.09.2005 erfüllen [27, S.9]. Sie zeichnen sich durch eine hohe Reinheit aus. Die Herstellung muss außerhalb eines Laborarbeitsplatzes mit Geräten, die ausschließlich für Nahrungsmittel vorgesehen sind, erfolgen.

4.1.7 Siliconöle

4.1.7.1 Eigenschaften und Vergleich mit anderen Ölen

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden mit dem Begriff *Öl* Substanzen wie Speiseöl, Lampenöl oder Schmieröl bezeichnet. Dahinter verbergen sich verschiedene chemische Verbindungen wie fette Öle, Mineralöle, Siliconöle und ätherische Öle. Alle genannten Substanzen weisen zwar gemeinsame Eigenschaften auf, weshalb sie auch unter dem Begriff *Öl* zusammengefasst werden. Dazu zählt beispielsweise das hydrophobe Verhalten gegenüber polaren Verbindungen wie Wasser.

Die Öle unterscheiden sich aber in ihrer chemischen Struktur und zeigen daher in ausgewählten chemischen Reaktionen ein anderes Verhalten. Es sollte daher im Chemieunterricht erarbeitet werden, wie die Bezeichnung *Öl* zustande kommt und welches chemische Verhalten sich dahinter verbirgt.

Mit Hilfe einfacher, literaturbekannter Experimente lassen sich Öle der vier Kategorien *fettes Öl*, *Mineralöl*, *Siliconöl* und *ätherisches Öl* voneinander unterscheiden. Diese Experimente werden

zu einem Lernzirkel zur Unterscheidung von Ölen zusammengeschlossen. Das Konzept orientiert sich an einem Projekt von Blume zur Überprüfung der Eigenschaften von verschiedenen Ölen. Bei dem hier zusammen gestellten Lernzirkel sollen vier unbekannte Ölproben von den SchülerInnen untersucht werden. Der Fokus liegt stärker auf dem selbstständigen Experimentieren der SchülerInnen, da die SchülerInnen eine offene Aufgabenstellung erhalten. In Form einer Interaktionsbox werden die Geräte und Chemikalien, sowie die Durchführungshinweise für die vier genannten Teilversuche zur Verfügung gestellt. Es sollen vier unbeschriftete Ölproben aus den vier Kategorien identifiziert werden. Die SchülerInnen sollen nun selbstständig planen, in welcher Reihenfolge sie die Experimente durchführen, um schrittweise die Öle den einzelnen Kategorien zuordnen zu können.

Dazu werden die Experimente zur Fettfleckprobe nach Benz [173], zur Verseifungsreaktion und zur Brennbarkeit nach Tausch [75, S.23] kombiniert. Der Versuch zum Vergleich des Verhaltens in einer Verseifungsreaktion kann aus Zeitgründen gegen die Überprüfung der Oxidationsbeständigkeit ersetzt werden. Optional lassen sich verschiedene Pflanzenöle zusätzlich anhand ihres Chlorophyllgehalts über einfache Fluoreszenz-Untersuchungen unterscheiden (siehe Abschnitt 5.1.19).

Fette Öle sind Rohstoffe für die Seifenherstellung. Andere Öle kommen für die zugrunde liegende Verseifung nicht in Frage, weil sie nicht an der erforderlichen Reaktion teilnehmen. Sie können daher anhand dieser Reaktion von anderen Ölen unterschieden werden. Alternativ kann die Baeyer-Probe eingesetzt werden, da eine kürzere Reaktionszeit benötigt wird. Das experimentelle Vorgehen wurde von Blume übernommen [174, S.11].

Verschiedene Öle kann man durch ihre Brennbarkeit und vor allem durch den Ablauf der Verbrennung voneinander unterscheiden. Während des Verbrennung werden die Flammenfarbe, die Brenndauer, sowie die Rußentwicklung verglichen. Der Verbrennungsrückstand kann hinsichtlich Farbe und Konsistenz untersucht werden.

4.1.7.2 Viskositätsvergleich

In einem weiteren experimentellen Ansatz zur Untersuchung von Unterschieden bei Ölen liegt der Schwerpunkt auf einem Vergleich eines Mineral- und eines Siliconöls. Wie in Abschnitt 2.2.2 ausführlich beschrieben, unterscheiden sich die Eigenschaften von Siliconölen teilweise beträchtlich von denen vergleichbarer Mineralöle. Dies ist hauptsächlich auf den Einfluss der Silicium-Sauerstoff-Bindung zurückzuführen. Aus diesem Grund ist beispielsweise die Temperaturabhängigkeit der Viskosität für ein Mineralöl ausgeprägter als für ein vergleichbares Siliconöl. Vergleichbar bedeutet in diesem Fall, dass die Öle eine ähnliche Molekulargewichtsverteilung aufweisen, bzw. sich nur unwesentlich in Kettenlänge und Vernetzungsgrad unterscheiden.

Zur Unterscheidung eines Mineral- und eines Siliconöls wurde ein Experiment zur Überprüfung des

Fließverhaltens bei drei verschiedenen Temperaturen (Raumtemperatur, -10°C und 100°C) entwickelt. Es wird mit einer vereinfachten Apparatur zur Prüfung der Fließfähigkeit gearbeitet, die mit der Verwendung eines Tropftrichters auskommt. Ein selbstgebautes Kugelfallviskosimeter erwies sich aufgrund der großen Temperaturunterschiede leider nicht als geeignet. Der Versuch wird in Abschnitt 5.1.20 vorgestellt.

4.1.7.3 Beeinflussung einer Schaumbildung

Siliconöle können verschiedene Wirkungen bei der Schaumbildung haben. Silicone mit hydrophoben, unpolaren Seitengruppen setzen die Oberflächenspannung in Flüssigkeiten herab und verhindern so eine Schaumbildung. Siliconöle mit polaren Seitengruppen können hingegen zur Vereinheitlichung der Größe der eingeschlossenen Luftblasen im Schaum genutzt werden. Dies wird beispielsweise zur Stabilisierung von Polyurethanschaum genutzt. In Abschnitt 5.1.18 wird ein Experiment zur Verdeutlichung dieser Funktion vorgestellt. Ergänzend wird in Abschnitt 5.1.22 gezeigt, wie Kosmetika mit einer hohen Konzentration an Silicon-Inhaltsstoffen zur Verminderung einer Schaumbildung beitragen können. Dies ist zwar nur ein Nebeneffekt bei dem Einsatz in einem Kosmetikprodukt, ermöglicht aber eine Thematisierung von Aspekten der Siliconchemie in dem Kontext Kosmetik. Dieses Themenfeld findet sich wiederum in vielen Lehrplänen, wie beispielsweise in Rheinland-Pfalz.

4.1.8 Silicone in Kosmetikprodukten

Es werden einfache Modellexperimente vorgestellt, mit denen die unterschiedlichen Eigenschaften der Silicone und ihre diesbezügliche Verwendung als Inhaltsstoffe für Kosmetika verdeutlicht werden. Mit Hilfe der Experimente können Anwendungsmöglichkeiten von Polysiloxanen in Kosmetika überprüft werden und anschließend mit Hilfe des Struktur-Eigenschafts-Konzepts Rückschlüsse auf den strukturellen Aufbau der eingesetzten Silicone gezogen werden.

In einem ersten didaktischen Schritt wird im Sinne der Elementarisierung jeweils ein Kosmetikprodukt mit einer reduzierten Anzahl an Inhaltsstoffen hergestellt. Es wird eine Basisformulierung angesetzt, die auf Zusatz- und Hilfsstoffe wie Konservierungs-, Farb- und Aromastoffe verzichtet. Diese Inhaltsstoffe sind für die Experimente nicht relevant. Es handelt sich also nicht um vollwertige Produkte, die daher von den SchülerInnen auch nicht zur eigenen Anwendung mit nach Hause genommen werden dürfen. Aus diesem Grund werden bei diesen Experimenten bis auf eine Ausnahme auch keine kommerziell erhältlichen Produkte verwendet. Dabei werden bewusst nicht nur Beispiele aus dem Bereich der dekorativen Kosmetik ausgewählt, um Schülerinnen und Schüler gleichermaßen anzusprechen.

Gemäß einer didaktischen Elementarisierung kann man die Versuchsergebnisse ausschließlich

auf einer phänomenologischen Ebene auswerten. Die Versuche können daher bereits in den Chemieunterricht der Sekundarstufe I eingebunden werden. Auf dieser Abstraktionsebene ist eine stark anwendungsbezogene Einführung der Polymerchemie auch im Chemieunterricht der Haupt- oder der Realschule denkbar. Im Kerncurriculum dieser beiden Bildungsgänge werden Kunststoffe und die Prüfung der Eignung von Werkstoffen thematisiert. In dieser Kombination bietet sich das Thema Kosmetik als Anknüpfungspunkt zur Erarbeitung des Themas Polymerchemie an. Für die Sekundarstufe II kann die Auswertung auf einer komplexeren Elementarisierungsstufe erfolgen und so zum Beispiel konkret auf den molekularen Aufbau der Polysiloxane zur Erklärung der festgestellten Struktur-Eigenschaftsbeziehungen eingegangen werden [175].

Die entwickelten Schulversuche beinhalten ein Experiment mit einer kommerziell erhältlichen Pflege lotion zur Untersuchung des Einflusses von Siliconen auf die Schaumbildung (siehe Abschnitt 5.1.22). Eine Handcreme soll sich gut verteilen lassen. Wenn sie dabei schäumen würde, wäre dies nicht gut möglich. In diesem Versuch wird dies mit geeigneten Kosmetika überprüft. Das experimentelle Vorgehen wurde ausgehend von Tausch variiert [75, S.45 ff.]

Die weiteren Versuche zu diesem Themengebiet in den Abschnitten 5.1.23 bis 5.1.26 sind Modellversuche zur Darstellung der Funktionen von Siliconen in verschiedenen Kosmetikprodukten. Es werden bewusst nicht nur Beispiele aus dem Bereich der dekorativen Kosmetik ausgewählt, um SchülerInnen beider Geschlechter gleichermaßen ansprechen zu können.

Beispielsweise werden die Glanzeigenschaften von Lipgloss maßgeblich von den enthaltenen Filmbildnern beeinflusst, da diese direkt für die Struktur der Oberfläche verantwortlich sind. So können die Glanzeigenschaften durch Verwendung von Siliconen gesteigert werden (siehe Abschnitt 5.2.3). Dieses Experiment wird in Abschnitt 5.1.23 vorgestellt.

In einem weiteren Experiment (siehe Abschnitt 5.1.25) werden die hydrophoben Eigenschaften von unpolaren Siliconen zur Herstellung einer wasserabweisenden Wimperntusche genutzt.

Wie in dem Experiment in Abschnitt 5.1.22 gezeigt können Silicone zur Destabilisierung während einer Schaumbildung beitragen, da sie aufgrund der niedrigen Oberflächenspannung in die Oberfläche von Luftblasen in einem Schaum eindringen und diese durch Verdrängung von Tensidmolekülen zerstören können. Beim Auftragen eines Deostifts analog zu Sonnencreme wird die Bildung von Mikroschäumen auf der Haut beobachtet. Wenn die verwendeten Öl-in-Wasser-Emulsionen im Übermaß Fettalkohole enthalten, bilden sich beim Auftragen weiße Schlieren auf der Haut; es tritt das sogenannte "Weißein" auf. Die umgangssprachliche Bezeichnung meint Mikro-Schäume, die beim Verreiben des Kosmetikprodukts in Wechselwirkung mit der Feuchtigkeit auf der Haut entstehen. Es kann experimentell gezeigt werden, dass Silicone die Schaumbildung vermindern

und zu einer homogeneren Vermischung beitragen.

Gemäß eines gesellschaftskritischen und problemorientierten Chemieunterrichts zur Entwicklung von Bewertungskompetenz kann nach dem Erlernen von Fachinhalten mit Hilfe der Experimente der Einsatz von Polysiloxanen in Kosmetikprodukten kontrovers diskutiert werden. Ein Anknüpfungspunkt können Pressemeldungen sein, die den Einsatz von Siliconen in Kosmetikprodukten kritisch hinterfragen. Es kann auch eine aktuelle Marketingstrategie aufgegriffen werden, die den Verzicht bestimmter Inhaltsstoffe hervorhebt.

Ein anderer möglicher Aspekt ist die Problematik der geringen Wasserlöslichkeit bei gleichzeitiger chemischer Beständigkeit bei der Rückgewinnung: Die Siliconrückstände von Kosmetikprodukten lagern sich im Klärschlamm ab und werden bei der weiteren Entsorgung in Müllverbrennungsanlagen zu feinverteiltem Siliciumdioxid verbrannt. Unter den gegebenen Bedingungen kann es auf Bauteilen der Verbrennungsanlagen zur Bildung dünner Glasschichten kommen, was den Wartungsaufwand und die Instandsetzungskosten erhöht [176].

4.1.9 Nicht weiterverfolgte Ansätze

Die Aufnahmefähigkeit der Oberfläche eines Haars für Farbstoffe, wie sie beim Färben von Haaren aufgebracht werden, kann durch die Beschaffenheit der Haaroberfläche, sowie durch aufgetragene Substanzen, beeinflusst werden. Es wurde daher untersucht, ob sich ein Unterschied in der Aufnahmefähigkeit von Farbstoffen feststellen lässt, wenn Haare intensiv mit siliconhaltigem Shampoo vorbehandelt werden.

Der Anlass für diese Überlegungen bildeten Pressemeldungen und Beiträge in Blogs, welche den SchülerInnen gut bekannt sind.

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass sich die Aufnahmefähigkeit für Farbstoffe verschlechtert, wenn zuvor mehrere Siliconschichten auf das Haar aufgetragen worden sind. Neben gängigen Haarfärbeprodukten und siliconhaltigem Shampoo aus dem Drogeriemarkt wurde auch mit Modellmischungen der Kosmetikprodukte gearbeitet. Es wurden alle nicht relevanten Inhaltsstoffe eliminiert, dafür aber mit verschiedenen Konzentrationen an Siliconen im Shampoo und Farbstoff in dem Färbeprodukt gearbeitet. Die Hypothese ließ sich nicht eindeutig bestätigen, da zu viele Einflüsse die Aufnahmefähigkeit von Farbstoffen beeinflussen.

Für die Untersuchung wurden Echthaarsträhnen verwendet, die über den Friseur-Fachhandel bezogen wurden. Manche Hersteller unterziehen diese Haarsträhnen einer Vorbehandlung mit Siliconen, um das Erscheinungsbild hinsichtlich der Glanzeigenschaften positiv zu beeinflussen. Dies ist nicht immer eindeutig nachvollziehbar und verfälscht das Versuchsergebnis.

Generell sind die Haarsträhnen nicht immer von einer gleichbleibenden Qualität, was sich eben-

falls auswirkt. Die Wechselwirkung der Haaroberfläche mit einem Silicon und später mit dem Farbstoff ist auch von dem Grad der Verwitterung abhängig. Je älter ein Haar ist, desto hydrophiler reagiert die Oberfläche, da die hydrophobierende Beschichtung aus Talg abgetragen wird. Dieser experimentelle Ansatz wurde wegen mangelnder Reproduzierbarkeit nicht weiter verfolgt.

4.2 Silicone und Silica

In manchen Alltagsgegenständen werden mehrere Siliciumverbindungen gleichzeitig eingesetzt. Exemplarisch wird hier die Siliconbackform genannt, weil neben dem Hauptbestandteil Silicon auch andere Siliciumverbindungen als Füllstoffe enthalten sein können. Weitere Beispiele finden sich im Bereich der Kosmetik.

In der Regel wird bei der Behandlung der Kohlenstoffchemie großer Wert darauf gelegt, dass die Einführung der einzelnen Verbindungen im Unterricht so erfolgt, dass schrittweise aufeinander aufbauende Kenntnisse zu den jeweiligen Verbindungen in einer einheitlichen Systematik aufgebaut werden. Dies ist für die Siliciumchemie nicht der Fall, weil nur willkürlich herausgegriffene Verbindungen im Rahmen des Chemieunterrichts thematisiert werden.

Es wurden daher experimentelle Ansätze entwickelt, welche die Thematisierung mehrerer Siliciumverbindungen in einem einzigen Kontext ermöglichen, so dass leicht Verknüpfungen zwischen den Siliciumverbindungen hergestellt werden können. Als Unterrichtsgegenstand eignen sich besonders Alltagsprodukte aus der Lebenswelt der SchülerInnen, die in einem motivierenden, ansprechenden Kontext behandelt werden können.

Am Beispiel der Backform kann experimentell der Einfluss von Siliciumdioxid als Füllstoff untersucht werden. Es beeinflusst die Fließeigenschaften des Siliconkautschuks, was eine Erleichterung der Verarbeitung im Herstellungsprozess zur Folge hat. Die SchülerInnen können experimentell die Auswirkung der Silica-Verbindung auf die Verarbeitungsmöglichkeiten und die Stabilität der fertigen Backform nachvollziehen.

4.2.0.1 Silicone und Silica in Kosmetika

Ein weiterer lohnenswerter Themenbereich für eine kombinierte Behandlung mehrerer Aspekte der Siliciumchemie ist die Kosmetik. Jedes Kosmetikprodukt enthält immer mehrere Inhaltsstoffe, die nicht für die eigentliche Anwendung notwendig sind, sondern als Hilfsstoffe andere Funktionen erfüllen. Es wurde exemplarisch der Nagellack ausgewählt, weil hier Siliconharze und Silica-Verbindungen als Inhaltsstoffe eingesetzt werden können. Beide Substanzen beeinflussen die Viskosität des Lackes, was für die Verarbeitungsphase und die Trocknungsphase von Bedeutung ist.

Eine Einlagerung von Silica-Partikeln in die Lackschicht kann zur Erhöhung der Kratzfestigkeit bei-

tragen und wird in höheren Konzentrationen zum Erzeugen optischer Effekte genutzt. Dies reicht von einem Effekt der Mattierung bis hin zur Rissbildung in der Oberfläche. Diese Einsatzmöglichkeiten sind für viele Arten von Lacken gegeben.

Der Nagellack wurde zum einen aus Gründen der Anschaulichkeit gewählt, da es sich um ein wohlbekanntes Alltagsprodukt aus der Lebenswelt der SchülerInnen handelt, das viele Schülerinnen vielleicht sogar selbst benutzen. Dieser Bezug hat für die Thematisierung von Kosmetika im Chemieunterricht oft eine motivierende Wirkung auf die SchülerInnen zur Folge. Dies wurde bereits in Abschnitt 3.1.2 beschrieben.

Zum anderen lassen sich Nagellacke im Gegensatz zu anderen Lacken bei Raumtemperatur herstellen und verarbeiten. Dies wird bei den vorgestellten Experimenten durch die Verwendung eines Silicon-Kombinationsharzes anstelle eines reinen Siliconharzes unterstützt. Solche Kombinationsharze steigern die Löslichkeit in gängigen Lösemitteln, wie sie für die Herstellung von Nagellacken verwendet werden [38, S.1187]. Dies sichert die praktikable Anwendung im Rahmen des Chemieunterrichts, da sich die Durchführung der Versuche unkompliziert und zeitsparender gestaltet.

Es wurde ein experimenteller Zugang zur Untersuchung dieser Lackeigenschaften entwickelt (siehe Unterkapitel 5.2.2). Diese Versuchsreihe ist auf einer qualitativen Ebene mit einem geringen Abstraktionsgrad angesiedelt. Das primäre Lernziel ist die Beeinflussung der Viskosität in beide Richtungen mit verschiedenen Inhaltsstoffen. Quantitative Ergebnisse können mit dieser Versuchsdurchführung nicht geliefert werden. Die Experimente sind so aufgebaut, dass sie in verschiedenen didaktischen Elementarisierungsstufen eingesetzt werden können. Bei einer rein phänomenologischen Deutung der Versuchsergebnisse sind sie in der Sekundarstufe I an Haupt- und Realschulen oder auch in Berufsschulen für Ausbildungsgänge im naturwissenschaftlichen Bereich anwendbar [175].

4.3 Silica

4.3.1 Nachweis von Silica-Verbindungen in Alltagsprodukten

Silica-Verbindungen, wie Siliciumdioxid werden in den verschiedensten Gegenständen des täglichen Gebrauchs als Hilfsstoffe eingesetzt. Das Spektrum reicht von Kosmetikprodukten über Gewürzpulver bis zu Papier (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Silica-Verbindungen können leicht mit nasschemischen Methoden nachgewiesen werden, wenn sie in wasserlöslicher Form vorliegen oder sich leicht in eine solche überführen lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Beispiel der Zahncreme gewählt, die laut Umbach auch als Kosmetikprodukt in die Kategorie der Zahnpflegeprodukte eingeordnet wird [177]. Dieses Beispiel bietet den Vorteil, dass SchülerInnen beider Geschlechter gleichermaßen angesprochen werden,

da die Zahnpflege jeden Menschen betrifft.

Lösliches Siliciumdioxid kann in Form von Kieselsäure leicht als Molybdatosilicat nachgewiesen werden, das eine Probenlösung nach erfolgreicher Reaktion gelb färbt. Die Reaktion wird in dieser Form bereits für Experimente im Chemieunterricht vorgeschlagen ([102], [103]). Dies kann für den Einsatz als Schülerversuch aber Schwierigkeiten bergen, da die Gelbfärbung der Reaktionslösung bei niedrigen Konzentrationen an Kieselsäure sehr schwach ausfallen kann. Der Nachweis ist daneben ohne weitere Vorkehrungen störanfällig, da andere Ionen ebenfalls zu einer gelb erscheinenden Molybdatoverbindung reagieren können.

In dieser Arbeit wird daher das experimentelle Vorgehen für diese Nachweisreaktion, angelehnt an eine Vorschrift des *Normenausschusses für Wasserwesen*, erweitert [178]. Der Versuch wird damit zwar um zwei Arbeitsschritte verlängert, ist aber weniger störanfällig und kann auch für halb-quantitative Nachweise eingesetzt werden (siehe Abschnitt 5.3.1). Dies ist bereits bei einer optischen Beurteilung möglich, da die Intensität der Blaufärbung der Probenlösung bei einem positiven Nachweis proportional zu der Konzentration des enthaltenen Siliciumdioxids ist.

Bei der Übertragung der halb-quantitativen Durchführung auf andere Alltagsgegenstände muss bedacht werden, dass unter den Bedingungen im Chemieunterricht die in der Probe enthaltene Silica-Verbindung nicht bei jedem Alltagsprodukt vollständig in Lösung gebracht werden kann. Dies ist im Einzelfall zu prüfen.

In Unterkapitel 5.3.2 werden drei Mineralwasser mit deutlich voneinander unterschiedlichen Siliciumdioxid-Konzentrationen zur vergleichenden Analyse vorgeschlagen. Die Konzentrationen der Eichlösungen sind so gewählt, dass die Konzentrationen der Mineralwasser im mittleren Bereich der Eichgeraden liegen. Neben der photometrischen Bestimmung wird die Alternative der Verwendung einer Smartphone-App nach Lühken genutzt [179].

4.3.2 Funktionen von Silica in Zahncreme

Heutzutage werden in beinahe jeder Zahncreme Silica-Verbindungen in einer variablen Größenordnung von 5 - 10% eingesetzt [16, S.123]. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von der Funktion als Füllstoff (oder Bindemittel) bis zu der Funktion als Putzkörper (auch als Schleifmittel oder Abrasionsstoff bezeichnet). Am Beispiel des scheinbar trivialen Alltagsgegenstands Zahncreme können gewinnbringend verschiedene Einsatzmöglichkeiten von Silica beschrieben werden.

Dies lässt gleichzeitig eine unterschiedliche Schwerpunktsetzung hinsichtlich des fachwissenschaftlichen Hintergrunds zu: Die Thematisierung der Funktion als Füllstoff ermöglicht die Erarbeitung der intermolekularen Wechselwirkungen auf molekularer Ebene mit einem deutlichen Schwerpunkt auf einer chemische Eigenschaft. Die Fokussierung auf die Funktion als Schleifmittel thematisiert dagegen einen eher physikalisch-technischen Aspekt. Dies eröffnet die Einbindungs-

möglichkeit in den Chemieunterricht zum Thema Zahncreme in Form einer Unterrichtseinheit mit einem fächerverbindenden Ansatz.

4.3.2.1 Siliciumdioxid als Bindemittel

In Modellexperimenten werden die beiden genannten Funktionen von Siliciumdioxid-Partikeln in Zahncreme genauer herausgearbeitet. Siliciumdioxid trägt als Füllstoff zur Konsistenz der Zahncreme bei und bewirkt, dass diese sich ohne das Ziehen langer Fäden („fadefrei“) von der Masse aus der Tube trennen lässt. Die Bezeichnung als Bindemittel rührt daher, dass zeitgleich eine Phasentrennung der Suspension verhindert wird [15, S.277 f.].

Die Zahncreme stellt ein Hydrogel mit dem Gelbildner Siliciumdioxid dar. Es ist nicht übermäßig stark vernetzt, da es zur Anwendung streichfähig sein muss. Zum Übergang in den flüssigen Zustand ist daher nur eine geringe Krafteinwirkung notwendig, wie sie durch Schütteln erreicht werden kann. Ein solches System zeigt daher sogenannte thixotrope Eigenschaften [15, S.144 f.]. Die Zahncreme ist ein alltagsnahes Beispiel für die Anwendung eines Füllstoffs zur Einstellung der Fließeigenschaften. Anhand dieses Versuchs (siehe Abschnitt 5.3.3) kann man die allgemeinen Funktionen eines Füllstoffs zum Einstellen der Fließeigenschaften und zur Einführung des Begriffs der Viskosität nutzen.

4.3.2.2 Siliciumdioxid als Schleifmittel

Grobkörnige Siliciumdioxid-Partikel mit einem größeren Durchmesser eignen sich als Putzkörper für die mechanische Reinigung der Zahnoberfläche. Die Eigenschaften des Putzkörpers werden vor allem durch die Härte und die Form, so wie die Größenverteilung der Partikel beeinflusst. Der Härtegrad sollte unter 5 auf der Härteskala nach Mohs für Zahnschmelz liegen, weshalb sich verschiedene Siliciumdioxid-Größenverteilungen mit 4,2 bis 5,9 gut eignen [180]. Anhand so genannter RDA-Werte (Radioactive Dentin Abrasion-Werte) werden die Partikel klassifiziert. Die gleichnamigen Methode dient der Bestimmung des Grads der abtragenden Wirkung und liefert die grundlegenden Messergebnisse zur optimalen Einstellung der geringsten Abrasivität, die trotzdem eine gute Reinigungswirkung erzielt.

Die erarbeiteten Experimente zu der Funktion als Abrasivstoff fokussieren die Größe und Härte eines Partikels in Zusammenhang mit seinen Abriebfähigkeiten. Weitergehend wird neben der Einführung der nötigen Fachbegriffe auch die Thematisierung der Synthese von Silica ermöglicht, da so auf die Herstellung „maßgeschneiderter“ Partikel für eine spezielle Anwendung eingegangen werden kann. Es kann das Zusammenwirken mehrerer naturwissenschaftlicher Disziplinen für die Entwicklung eines alltäglichen Produktes aufgezeigt werden.

In diesem Versuch (siehe Abschnitt 5.3.4) werden zwei Zahncremes mit unterschiedlich großen Putzkörpern verglichen. Es werden zwei Produkte mit signifikant unterschiedlichen RDA-Werten

empfohlen. Die Zahnbürste und die Zahnputztechnik beeinflussen ebenfalls die Abrasionseigenschaften, so dass unter den experimentellen Bedingungen keine absolute Bewertung möglich ist. Bei den gewählten Zahncremes unterscheiden sich die RDA-Werte so stark, dass sich eindeutig Unterschiede im Abrieb feststellen lassen.

Weitergehend wird in dem sich anschließenden Abschnitt 5.3.5 eine Versuchsdurchführung für eine halb-quantitative Methode zur Ermittlung der Abriebstärke vorgestellt. In diesem Modellversuch werden feines und grobes Schleifpapier stellvertretend für Putzkörper mit kleiner und großer Korngröße verwendet. Der Abrieb wird durch einen erweiterten Versuchsaufbau stärker standardisiert. Es wird mit Hilfe eines Akkuschraubers mit einem Dremel-Polieraufsatz gearbeitet. Der Polieraufsatz dient als Träger für ein immer gleich groß zugeschnittenes Stück Schleifpapier.

Der Anpressdruck während der simulierten Putzbewegung wird mit Hilfe einer Laborwaage ständig kontrolliert. Trotz der Schwankungen, die sich hier ergeben, kann bei einer geeigneten Wahl des Schleifpapiers eine halb-quantitative Untersuchung des Abriebs durchgeführt werden. Eine quantitative Untersuchung ist mit dieser Methode im Rahmen der Messgenauigkeit und unter Berücksichtigung der Fehlerquellen nicht möglich.

Der nasschemische Nachweis von Kupfer(II)-sulfat aus dem Abrieb eines eingefärbten Gipsrohlings erlaubt bietet eine weitere Anknüpfungsmöglichkeit für die Anwendung im Chemieunterricht im Themenbereich der Komplexchemie in der Sekundarstufe II [65, S.51].

4.3.3 Silica in Bauzement

Kalk und Gips werden als Vertreter der Gruppe der Baustoffe gerne im Chemieunterricht thematisiert. In vielen Bundesländern ist dies auch im Lehrplan geregelt. Der Baustoff Zement ist nicht minder wichtig in der Baustoffchemie, wird aber leider nicht mit der gleichen Aufmerksamkeit berücksichtigt. Dies ist vermutlich auf die komplexen chemischen Prozesse zurückzuführen, die während des Aushärtens in dem Viel-Komponenten-System Zement ablaufen. Der Baustoff begegnet den SchülerInnen dennoch jeden Tag, so dass eine Thematisierung im Chemieunterricht gerade mit Hinblick auf den Erwerb von breit gefächertem Wissen lohnenswert sein kann.

Es findet sich nur vereinzelt fachdidaktische Literatur zu diesem Themengebiet. Die Schulversuche zum Thema Zement decken etwa die chemische Analyse von Zement, die Untersuchung des pH-Werts, sowie die Beeinflussung des Erstarrungsverhaltens ab [47], [181].

Die technologische Entwicklung ist gerade bei einem viel genutzten Werkstoff von wirtschaftlicher Bedeutung, so dass auch Zement stetig weiter entwickelt wird. Neben einer Verstärkung durch eingelagerte Carbonfasern lässt sich auch die Verarbeitung des frisch angerührten Zements hinsichtlich der Handhabung optimieren. Siliciumdioxid kann hier als Prozesshilfsmittel eingesetzt werden, um Eigenschaften wie Frühfestigkeit und Homogenität zu beeinflussen. Dies ist im Schul-

versuch mit einfachen Mitteln bereits in der Sekundarstufe I gut durchführbar.

Die Konsistenz von frisch angerührtem Zementleim aus Zementmehl, Sand und Wasser wird durch das Verhältnis von Wasser zu festen Bestandteilen beeinflusst. Dieser sogenannte Zementleim muss eine geeignete Konsistenz für die weitere Verarbeitung haben, darf nicht zu dünnflüssig, aber auch nicht zu zähflüssig sein. Das sogenannte Wasser-/ Zement-Verhältnis beschreibt dies. Bei der Verwendung von Siliciumdioxid als Additiv muss die Wassermenge angepasst werden, da dieses unter Verbrauch von Wasser mit Calciumhydroxid aus dem Zementmehl zu Calciumsilikathydrat reagiert. Der Versuch in Abschnitt ist 5.3.6 daher als Vorversuch zu sehen, um dies bewerten zu können.

Die Wärmeleitfähigkeit von Zement lässt sich durch die Einlagerung von Silica-Aerogelen deutlich verringern. Diese werden als Additiv für thermisch besonders isolierenden Beton eingesetzt. Bedingt durch die Verfahrensweise bei der Synthese sind Aerogele sehr poröse Materialien und können viel Luft in ihr Porengefüge aufnehmen. Dies hat wärmeisolierende Eigenschaften zur Folge.

Leider sind Aerogele im Schulversuch nur unter erschwerten Bedingungen herstellbar und im Einkauf sehr teuer, so dass hier auf ein Hydrogel ausgewichen wurde. Es besitzt potentiell ähnliche Eigenschaften, allerdings schwächer in der Ausprägung [182]. Dies zeigt zwar einen geringeren Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit von Zement, lässt sich aber bereits einsatzfertig erwerben. Besonders günstig und ausreichend rein ist es im Einzelhandel als Katzenstreu erhältlich (siehe Abschnitt 5.3.7).

Bei einer ausführlichen schulischen Behandlung mit leistungsstarken Lerngruppen, etwa unter dem Thema *Mineralische Baustoffe*, können theoretische Gesichtspunkte im Vordergrund stehen. Es ist aber ebenso möglich, bautechnische Anforderungen und Lösungsansätze zu akzentuieren und eine phänomenologische Zugangsweise zu wählen [52].

4.3.4 Nicht weiterverfolgter Ansätze

Die photometrische Bestimmung von Siliciumdioxid wurde auch auf die Möglichkeit der quantitativen Analyse untersucht. Ausgehend von der quantitativen Konzentrationsbestimmung in Wasser sollte das Verfahren auf Alltagsprodukte übertragen werden, die Silica als Füllstoff enthalten. Es wurden Produkte, wie Gewürzpulver, Fertiggerichte in Pulverform und frei verkäufliche Arzneimittel in Pulverform untersucht.

Leider kann nicht bei jedem Produkt zuverlässig sicher gestellt werden, dass das enthaltene Siliciumdioxid während der Probenaufnahme komplett gelöst wird. Dies hat auch mit der variierten

Probenaufnahme, wie in Abschnitt 5.3.1 dargestellt, eine lange, oft variable Wartezeit zur Folge. In dieser Form ist der Versuch daher nicht für den Unterricht geeignet. An dieser Stelle kann auf eine halb-quantitative Variante, wie in Abschnitt 5.3.2 gezeigt, verwiesen werden. Diese kann reproduzierbar durchgeführt werden.

Die Einsatzmöglichkeiten von Siliciumdioxid in Zement wurden breit angelegt untersucht. Es wurde beispielsweise die Hypothese überprüft, dass es während der ersten Stunden in der ersten Phase des Aushärtens einen deutlichen Unterschied im pH-Wert des überstehenden Wassers über dem Zementleim gegenüber einem Ansatz ohne Siliciumdioxid gibt. Dieser Unterschied ist allerdings so gering, dass er mit gängigen Geräten und Versuchsaufbauten in der Schule nur mit einem großen Fehlerbereich nachgewiesen werden kann. Dieser Ansatz wurde daher verworfen. Ähnlich verhielt es sich mit dem Vergleich der Temperaturentwicklung in der gleichen Phase des Abbindens.

4.4 Silicium

Wenn die Siliciumchemie im Fokus einer konzeptionellen Arbeit stehen soll, dann dürfen Experimente zu elementarem Silicium nicht fehlen. Gerade in diesem Themenbereich existieren bereits verschiedene experimentelle Ansätze, wie in Abschnitt 3.2.3 dargestellt wurde.

Es wurden literaturbekannte Ansätze aufgegriffen und weiterentwickelt. Dies sind Versuche zum Ätzen von Silicium und zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit des Elements.

4.4.1 Ätzen von Silicium

Silicium ist chemisch sehr widerstandsfähig, so dass nur mit starken Säuren oder Laugen ein Ätzvorgang möglich ist. Dieser stellt einen Arbeitsschritt bei der Herstellung von elektronischen und mikromechanischen Bauteilen dar. Es können starke Basen wie Natrium- oder Kaliumhydroxid genutzt werden. In solchen stark alkalischen Medien wird Silicium anisotrop geätzt. Dabei wird entlang der Hauptkristallebenen im Einkristall unterschiedlich schnell Silicium abgetragen, was von der Kristallorientierung abhängig ist und sich um mehrere Größenordnungen unterscheiden kann.

Das in Unterkapitel 5.4.1 vorgestellte Experiment kann daher auch im Rahmen der Thematisierung des Siliciums über die Behandlung des technischen Verfahrens zur Herstellung von Solarzellen in den Chemieunterricht eingebunden werden (siehe Abschnitt 3.1.3). Diese Durchführung unter alkalischen Bedingungen unter Verwendung von gesättigter Kaliumhydroxid-Lösung eignet

sich als Schülerversuch.

Alternativ können die SchülerInnen in einer offenen Aufgabenstellung verschiedene Säuren und Laugen testen und prüfen, ob eine Reaktion statt findet. Dies ist bereits optisch, aber auch mit Hilfe eines Mikroskops möglich. Anhand dieser Ätzversuche können die Begriffe *starke Säure/Base* und *schwache Säure/Base* genauer beschrieben und durch eigenständige experimentelle Arbeit leichter erfasst werden. Das Experiment lässt sich daher gegen Ende einer Unterrichtseinheit zu Säuren und Basen in der Jahrgangsstufe 10 in den Unterricht einbinden, wenn die Grundlagen zu dem Themengebiet bereits im Unterricht behandelt worden sind [65, S.24].

Die zweite vorgeschlagene Variante verwendet eine micro-scale-Apparatur nach Obendrauf zur in-situ Erzeugung von geringsten Mengen an Fluorwasserstoff [77]. Diese Versuchsdurchführung ist daher ausschließlich für einen Demonstrationsversuch für Lehrkräfte geeignet. Sie ermöglicht die Verminderung des Gefährdungspotentials für das Arbeiten mit Fluorwasserstoff. Es entsteht ähnlich wenig Fluorwasserstoff wie bei der Bleitiegelprobe.

Diese experimentelle Variante ist im schulischen Rahmen besser für die Bearbeitung von Glas geeignet. Das Ätzen von Glas als Möglichkeit der Glasbearbeitung ist gut bekannt. Es kann aber die Einbettung in einen Kontext gewählt werden, der unter Jugendlichen aus der Tagespresse gut bekannt ist. Das sogenannte *Scratching* oder *Etching* ist eine Unterart von Graffiti, bei der mit Flusssäure auf Glas geschrieben wird. Die verdünnte Flusssäure wird dabei gerne in handelsübliche Filzstifte gefüllt. Dies birgt die Gefahr einer potentiellen Verätzung für die Anwender, aber auch für Unbeteiligte, wenn sie einen noch nicht getrockneten Schriftzug berühren (bsp. an einer Glasscheibe an einer Bushaltestelle)[183], [184].

4.4.2 Leitfähigkeitsuntersuchungen von poly- und monokristallinem Silicium

Es gibt bereits einige experimentelle Ansätze zur Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit von Silicium. Dabei wird das Element meist als klassisches Beispiel für einen Halbleiter eingeführt, welcher erst bei erhöhten Temperaturen den elektrischen Strom leitet [98], [126], [127]. Es wird allerdings nicht zwischen poly- und einkristallinem Silicium unterschieden. Beides wird zwar für Solarzellen verwendet, hat aber einen unterschiedlichen Wirkungsgrad. Für elektronische Bauteile ist dagegen ausschließlich einkristallines Silicium geeignet.

Mit Hilfe des in Abschnitt 5.4.3 vorgestellten Versuchs können die Unterschiede experimentell erarbeitet werden. Es ist eine Einbettung in die Nutzung des Elements in elektronischen und photovoltaischen Bauteilen möglich.

Die erarbeitete Versuchavariante in Abschnitt 5.4.3 dient der Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von Silicium. Ausgehend von Häusler [98] und Veith [127]

wurde der Versuch erweitert, um zwischen poly- und einkristallinem Silicium unterscheiden zu können.

5 Experimentiervorschriften

5.1 Silicone

5.1.1 Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - Temperaturbeständigkeit

Geräte: Tiegelzange, Ceranplatte oder eine andere feuerfeste Unterlage, Teclubrenner, Feuerzeug, Handschuhe zum Kälteschutz, Schere, Kühlschrank mit Gefrierfach (oder kleines Dewargefäß), Stoppuhr

Chemikalien: Babysauger aus Siliconelastomer und aus Latex (*Babylove-Trinksauger*, Größe M, aus Latex und Silicon, im Drogeriemarkt erhältlich), flüssiger Stickstoff (falls gewünscht)

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 10 min Durchführung + Lagerung im Gefrierfach über Nacht zur Vorbereitung (Schülerversuch möglich, wenn mit dem Gefrierfach zum Kühlen gearbeitet wird)

Durchführung:

Verbrennung

- Es werden zwei vergleichbar große Stücke aus dem unteren Randbereich der Sauger geschnitten.
- Es wird versucht eine Probe mit dem Feuerzeug über der feuerfesten Unterlage zu entzünden. Sollte das nicht genügen, kann auch mit dem Teclubrenner gearbeitet werden.
- Dies wird für den Sauger aus dem anderen Material wiederholt.

Verhalten bei tiefen Temperaturen - Schülerversuch

- Es werden jeweils ein Sauger aus Silicon und aus Latex über Nacht in das Gefrierfach eines Kühlschranks gelegt.
- Anschließend wird mit einer Tiegelzange die Elastizität des Saugers geprüft. Es wird die Zeit gestoppt, bis man den Sauger wieder verbiegen kann.
- Dies wird für den Sauger aus dem anderen Material wiederholt.

Verhalten bei tiefen Temperaturen - Lehrerversuch

- Es wird ein Sauger für 3 Sekunden in ein Dewargefäß gehalten, das mit flüssigem Stickstoff gefüllt ist.
- Anschließend wird mit einer Tiegelzange die Elastizität des Saugers geprüft. Es wird die Zeit gestoppt, bis man den Sauger wieder verbiegen kann.
- Dies wird für den anderen Sauger wiederholt.

Entsorgung: Die abgekühlten Verbrennungsrückstände können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen:

Verbrennung

Die Latexpolprobe lässt sich bereits mit dem Feuerzeug entzünden. Sie brennt mit einer gelben, rußenden Flamme, während ein stechender Geruch wahrnehmbar ist. Es bleibt ein schwarzes Verbrennungsprodukt zurück, das nicht mehr die ursprüngliche Form hat.

Das Siliconelastomer muss zunächst über der Teclubrennerflamme erwärmt werden, bis es sich entzünden lässt und verbrennt auch nur in dieser Flamme rasch vollständig. Es verbrennt in einer hellen, weißen Flamme und hinterlässt ein weißes Verbrennungsprodukt. Hier hat sich die Form nicht verändert. Bei Berührung mit der Pinzette zerfällt der Verbrennungsrückstand zu einem Pulver.

Verhalten bei tiefen Temperaturen

Beide Sauger sind nach der Behandlung mit flüssigem Stickstoff erhärtet und lassen sich nicht mit der Tiegelzange verbiegen. Der Siliconsauger zeigt schneller, und daher noch bei tieferen Temperaturen als der Latexsauger, elastische Eigenschaften. Für ein Kühlen im Gefrierfach fällt der Unterschied nicht so groß aus, ist aber immer noch deutlich zu erkennen.

Auswertung: Sowohl bei hohen als auch bei tiefen Temperaturen ist die Beständigkeit des Siliconelastomers größer als die von Latex. Die hohe Stabilität der Silicium-Sauerstoff-Bindung hat eine große thermische Stabilität, eine hohe thermooxidative Beständigkeit und eine hohe Flammtemperatur zur Folge. Die große Flexibilität der Bindung sorgt für ein elastisches Verhalten bei niedrigeren Temperaturen als bei Naturlatex.

Hinweise: Bei einem Demonstrationsversuch sollte der jeweils der ganze Sauger verwendet werden, weil die SchülerInnen dies besser erkennen können.

5.1.2 Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - Chemikalienbeständigkeit

Geräte: sechs Reagenzgläser, Reagenzglasständer, zwei Pasteurpipetten, Kunststoffpipette, Pinzette, zwei Gummistopfen, Schere

Chemikalien: Babysauger aus Siliconelastomer und aus Latex (*Babylove-Trinksauger*, Größe M, aus Latex und Silicon, im Drogeriemarkt erhältlich), Leichtbenzin, Paraffinöl, Siliconöl

Sicherheit: Es wird im Abzug gearbeitet! Leichtbenzin (Gefahr, GHS02, GHS07, GHS08, GHS09)

Versuchsdauer: 10 min Durchführung + 2 Stunden bis 24 Stunden Wartezeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden zwei Reagenzgläser zu einem Drittel mit Siliconöl gefüllt. Dies wird jeweils mit zwei Reagenzgläsern für Paraffinöl und Leichtbenzin wiederholt.
- Anschließend werden drei vergleichbar große Stücke aus einem Babysauger geschnitten und mit einer Pinzette auf drei Reagenzgläser verteilt, so dass beide Öle und das Leichtbenzin verwendet werden.
- Diesen Schritt wiederholt man für den anderen Babysauger.
- Die Reagenzgläser mit Leichtbenzin werden mit einem Gummistopfen verschlossen und anschließend für mindestens zwei Stunden, besser über Nacht, beseite gestellt (am besten unter einen Abzug).
- Nun können die Eigenschaften zunächst optisch und anschließend mechanisch durch Ziehen mit der Pinzette verglichen werden.

Entsorgung: Die trockenen Polymerproben können in den Hausmüll entsorgt werden. Eventuelle Reste von Leichtbenzin können in den Abfallbehälter für organische Lösemittel entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Siliconprobe quillt in allen drei Flüssigkeiten auf. Dies ist reversibel und bildet sich ohne bleibende Veränderungen wieder zurück, wenn die Probe aus der Flüssigkeit entnommen und zum Trocknen auf ein Papiertuch gelegt wird.

Die Latexprobe quillt ebenfalls reversibel auf. Zusätzlich ist eine Trübung erkennbar. Die Latexproben aus dem Leichtbenzin und dem Paraffinöl weisen nach der Entnahme aus den Flüssigkeiten

eine deutlich rauere Oberfläche auf. Eine Lagerung in Siliconöl hat keinen Einfluss auf die Latexpolymere.

Auswertung: Die Beständigkeit des Silicons ist auf die hohe Stabilität der Silicium-Sauerstoff-Bindung zurückzuführen. Siliconelastomere können daher mit den im Versuch verwendeten Chemikalien gereinigt werden, ohne dass sie selbst chemisch angegriffen werden.

Mineralöle und Siliconöle werden gleichermaßen als Schmier- und Gleitmittel zur Verringerung von Reibung auf verschiedensten Oberflächen eingesetzt. Die Anwendung von Mineralölen auf Naturlatex scheint nicht geeignet, da die Latexpolymere chemisch angegriffen werden. Eine geringere mechanische Belastbarkeit sowie eine erhöhte Durchlässigkeit resultieren.

Hinweise: Für schnelle und eindeutige Ergebnisse eignen sich dünne, transparente Materialien am besten. Wenn der Schwerpunkt bei der Untersuchung der Oberfläche liegen soll, wird die Verwendung von Einmalhandschuhen aus Latex und Siliconfolien aus dem Medizinbedarf empfohlen.

5.1.3 Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Temperatur und Geruch

Geräte: Spatel, Kartuschenpresse, Stoppuhr, Temperaturmessfühler und Multimeter mit Display, Aluminiumfolie, Stativmaterial

Chemikalien: Silicondichtstoff, sauer vernetzend (beispielsweise Kartusche *Silikon transparent* Art. 8601371, *Hornbach*), Acrylatdichtstoff (beispielsweise Kartusche *Acryl weiss* Art. 8601372, *Hornbach*; beides günstig von der Eigenmarke in jedem Baumarkt erhältlich), dest. Wasser

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 30 bis 35 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Mit Hilfe des Stativmaterials wird eine Halterung für den Temperaturfühler aufgebaut, so dass dieser von oben in den Dichtstoff eingebracht werden kann.
- Es wird von einem Dichtstoff eine walnussgroße Menge kugelförmig auf ein Stück Aluminiumfolie gedrückt.

- Nun wird der Messfühler möglichst schnell mittig in der Masse platziert ohne die Aluminiumfolie darunter zu berühren und die Messung gestartet. Der aktuelle Messwert kann direkt am Multimeter abgelesen werden. Es wird jeweils ein Messwert nach Ablauf einer Minute notiert. Es sollte auch auf den Geruch in der Umgebung um den Dichtstoff geachtet werden.
- Nach 10 Minuten wird die Messung gestoppt.
- Der Versuch wird mit dem anderen Dichtstoff wiederholt.

Entsorgung: Die ausgehärteten Dichtstoffe können für die nachfolgenden Versuche aufgehoben oder in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Für den Silcondichtstoff ist zunächst eine leichte Temperaturerhöhung (ca. 3 °C), für den Acrylatdichtstoff ist eine leichte Temperaturerniedrigung (ca. 3 °C) feststellbar. Während des Aushärtens entwickelt der sauer vernetzende Silcondichtstoff einen Geruch nach Essig. Für den Acrylatdichtstoff ist keine Geruchsveränderung wahrnehmbar.

Auswertung: Die Präpolymere aus dem Silcondichtstoff reagieren mit der Luftfeuchtigkeit unter Abspaltung von Essigsäure zu einem stärker vernetzten Siliconelastomer. Die Reaktionsgleichung ist in Abbildung 5 in Abschnitt 2.2.4 dargestellt. Es handelt sich um eine exotherme Reaktion, so dass eine Temperaturerhöhung messbar ist. Die Essigsäure kann an ihrem charakteristischen Geruch erkannt werden. Sauer vernetzender Siliconfugendichtstoff sollte daher nicht an säureempfindlichen Substanzen wie Marmor verwendet werden.

Der Acrylatdichtstoff besteht aus einer wässrigen Suspension von Acrylatpolymeren und ist ein typischer Vertreter für einen physikalisch härtenden Dichtstoff. Während des Aushärtens verdunstet das in der Suspension enthaltene Wasser, was zu kurzfristig zu einer leichten Temperaturabnahme führt. Es findet keine chemische Reaktion statt.

Hinweise: Der Versuch lässt sich vereinfachen, indem auf eine exakte Temperaturmessung verzichtet wird. Stattdessen kann die Aluminiumfolie mit der großzügigen Menge an Dichtstoff auf die Handfläche gelegt werden. Die Temperaturänderung ist so ebenfalls wahrnehmbar.

Der Acrylatdichtstoff sollte beim Einkauf nicht mit einem zweikomponentigen Acrylkleber verwechselt werden, der UV-induziert durch radikalische Polymerisation aushärtet.

5.1.4 Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Überstreichbarkeit

Geräte: Alufolie, wasserfeste und wasserlösliche Farben oder Stifte (Öl- und Wasserfarbe), Messer, Pinzette, Kartuschenpresse, Pinsel

Chemikalien: ausgehärtete Proben der Dichtstoffe aus dem vorangegangenen Versuch

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 5 min Vorbereitung + 24 h Wartezeit + 5 bis 10 min Durchführung (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es wird ein etwa 3 cm langes Stück eines ausgehärteten Dichtstoffs abgeschnitten und auf ein Stück Alufolie gelegt.
- Die Masse wird an verschiedenen Stellen mit Wasser- und Ölfarbe bemalt. Es wird die Haltbarkeit der Farbe überprüft.
- Dies wird für den anderen Dichtstoff wiederholt.

Entsorgung: Die ausgehärteten Fugendichtstoffe können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Siliconmasse ist weder mit Wasserfarbe noch mit Ölfarbe überstreichbar. Auf dem ausgehärteten Acrylatdichtstoff haften beide Farben.

Auswertung: Aufgrund der stabilen Silicium-Sauerstoff-Bindung ist die Oberflächenenergie von Siliconen mit 24 mJ/m^2 sehr gering (vergleichbar mit Teflon mit einer Oberflächenenergie von 19 mJ/m^2), so dass Öl- und Wasserfarbe nicht optimal aufgetragen werden können. Die Adhäsivität ist zu groß.

Hinweise: Es sollten nur komplett ausgehärtete Dichtstoffe eingesetzt werden. Eine Hautbildung alleine genügt nicht. Am besten eignen sich Dichtstoffmassen, die am Vortag auf Alufolie präpariert worden sind.

5.1.5 Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Verhalten gegenüber Wasser

Geräte: zwei Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Pinzette

Chemikalien: Proben der ausgehärteten Dichtstoffe: Silicon-Dichtstoff, sauer vernetzend (beispielsweise Kartusche *Silikon transparent* Art. 8601371, *Hornbach*), Acrylatdichtstoff (beispielsweise Kartusche *Acryl weiss* Art. 8601372, *Hornbach*), dest. Wasser

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 5 min (mehrere Tage für ein intensiveres Ergebnis; Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Zwei Reagenzgläser werden zur Hälfte mit dest. Wasser gefüllt. Es wird ein 1 cm langer Streifen eines ausgehärteten Dichtstoffs in ein Reagenzglas gegeben und beobachtet.
- Dies wird für ein vergleichbar großes Stück des anderen Dichtstoffs wiederholt.

Entsorgung: Die ausgehärteten Fugendichtstoffe können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Bei dem Silicondichtstoff ist keine Veränderung festzustellen.

Bereits nach wenigen Minuten im Wasser verändert sich die Konsistenz des Acrylatdichtstoffs, was man leicht durch Verformen mit der Pinzette nachverfolgen kann. Bei einer Lagerung über Nacht fällt der Effekt deutlicher aus. Lagert man den Dichtstoff für mehrere Tage unter Wasser, dann beginnt sich das Wasser zu trüben, während die Masse an Form verliert und sich auflöst.

Auswertung: Der Silicondichtstoff ist in Wasser stabil, da die Bindungsenergie zwischen Silicium und Sauerstoff zu hoch für einen Angriff eines Wassermoleküls ist. Generell zeigen Silicone mit überwiegend unpolaren Seitenketten, wie im verwendeten Polydimethylsiloxan mit speziellen Endgruppen, ein hydrophobes Verhalten in Wasser.

Der Acrylatdichtstoff ist selbst eine wässrige Suspension, die beim Aushärten das enthaltene Wasser mittels Verdunstung abgibt. Dieser Prozess ist reversibel, so dass die Masse vom Wasser aufgeweicht wird. Um das zu verhindern, wird ein Filmbildner zur Stabilisierung der Oberfläche zugegeben. Bei einer dauerhaften Lagerung in Wasser kann der Acrylatdichtstoff erweichen, was sich bis zur vollständigen Suspendierung in Wasser fortsetzen kann. Im Sanitärbereich oder auch im Außenbereich sollte daher stattdessen Siliconmasse verwendet werden.

Hinweise: Je nach Hersteller werden unterschiedliche Filmbildner in verschiedenen Konzentration eingesetzt, daher kann es einige Tage bis Wochen bis zur Suspendierung des Acrylatdichtstoffs in Wasser dauern. Es wird daher bei der Verwendung eines neuen Dichtstoffs ein Testdurchlauf empfohlen.

5.1.6 Silicondichtstoffe - Unterscheidung verschiedener Eliminierungsprodukte

Geräte: Variante in der Petrischale: vier Petrischalen, ein Becherglas (250 ml), Glasstab, drei Pasteurpipetten, Heizplatte, Laborwaage, Wägeschälchen, Tiegelzange, Spatel, Kartuschenpresse, Laborwaage;

Variante im Reagenzglas: sechs Demonstrationsreagenzgläser mit passendem Reagenzglasständer, drei Glasstäbe, drei Pasteurpipetten, Kartuschenpresse

Chemikalien: Acetoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Silikon transparent* Art. 8601371, *Hornbach*), Alkoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Akkit 603 Bau Silikon weiss*, *Hornbach*), Amin-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche 460 Dach + Solar Silikon dichtstoff, farbig, *Ramsauer*), Universalindikator, Essigsäure ($c = 2 \text{ mol/l}$), Natriumhydroxid-Lösung ($w = 10 \%$), Ethanol, Agar-Agar (nur für die Variante in der Petrischale)

Sicherheit: Essigsäure (Achtung, GHS07), Natriumhydroxid-Lösung (Gefahr, GHS05), Ethanol (Gefahr, GHS02, GHS07)

Versuchsdauer: 20 min (Variante in der Petrischale) oder 10 min (Variante im Reagenzglas)

Durchführung:

Variante in der Petrischale:

- In einem Becherglas werden 150 ml Wasser mit Hilfe der Heizplatte unter Rühren mit einem Glasstab zum Sieden erhitzt.
- In ein Wägeschälchen werden 3 g Agar-Agar abgewogen und in das heiße Wasser eingerührt.
- Das Becherglas wird von der Heizplatte genommen und es wird tropfenweise Universalindikator-Lösung zu der Lösung gegeben, bis diese deutlich grün gefärbt ist. Diese Lösung wird gleichmäßig auf vier Petrischalen verteilt.

- Der Ansatz in der ersten Petrischale ist für drei Vergleichsproben vorgesehen: Es werden möglichst weit voneinander entfernt jeweils drei Tropfen Essigsäure, drei Tropfen Natriumhydroxid-Lösung und drei Tropfen Ethanol auf verschiedene Stellen in diese Petrischale gegeben.
- In die Agar-Agar-Lösung in der zweiten Schale drückt man einen mindestens 5 cm langen Streifen des Acetoxy-Silicondichtstoffs.
- Dies wiederholt man mit den übrigen Petrischalen für den Alkoxy- und den Amin-Silicondichtstoff.

Variante im Reagenzglas

- Es wird ein Reagenzglasständer mit sechs Demonstrationsreagenzgläsern bereitgestellt. Alle Reagenzgläser werden zu einem Drittel mit dest. Wasser gefüllt und es wird tropfenweise Universalindikator-Lösung zugegeben, bis das Wasser deutlich grün gefärbt ist.
- Für die Vergleichsproben gibt man drei Tropfen Essigsäure in das erste Reagenzglas, bzw. drei Tropfen Natriumhydroxid-Lösung in das zweite Reagenzglas und drei Tropfen Ethanol in das dritte Reagenzglas.
- Nun wird ein mindestens 5 cm langer Streifen des Acetoxy-Silicondichtstoffs spiralförmig um das eine Ende eines Glasstabs herum aufgetragen und vorsichtig (ohne das Glas zu berühren) in das vierte Reagenzglas gestellt.
- Diesen Schritt wiederholt man für die anderen Silicondichtstoffe mit den letzten beiden Reagenzgläsern.

Entsorgung: Der gelierte Agar-Agar mit dem ausgehärteten Dichtstoff kann in den Hausmüll entsorgt werden. Bei der Variante im Reagenzglas können die Lösungen neutralisiert und in den Abguss entsorgt werden, bzw. der ausgehärtete Dichtstoff kann ebenfalls in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Es sind keine Veränderungen bei der Vergleichsprobe mit Ethanol und in der Petrischale mit dem Alkoxy-Silicondichtstoff feststellbar. In der Petrischale mit dem Acetoxy-Dichtstoff hingegen sind nach ca. 1 min rote Schlieren um den Dichtstoff-Streifen herum zu erkennen. Die Intensität und die Ausbreitung nimmt weiter zu, bis die Agar-Agar-Masse erstarrt ist. Dies ist konsistent mit der Beobachtung für die Vergleichsprobe mit Essigsäure. In der Petrischale mit dem

Amin-Dichtstoff ist die Bildung blau-violetter Schlieren zu beobachten, was analog für die Vergleichsprobe mit Natriumhydroxid-Lösung zu beobachten ist.

Analog dazu sind die gleichen Farbveränderungen in der Durchführung im Reagenzglas oder im Standzylinder zu erkennen. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse beider Versuchsdurchführungen gezeigt.



Abbildung 13: im Standzylinder: Acetoxy-Dichtstoff (sauer), Alkoxy-Dichtstoff (neutral), Amin-Dichtstoff (basisch) (von links nach rechts); im Agar-agar: Alkoxy-Dichtstoff (neutral), Acetoxy-Dichtstoff (sauer), Amin-Dichtstoff (basisch)(von links nach rechts)

Auswertung: In der Petrischale mit dem Alkoxy-Dichtstoff verändert sich der pH-Wert nicht, so dass auch keine Veränderung in der Farbe der Agar-Agar-Lösung beobachtet werden kann. Bei der Vernetzung dieses Dichtstoffs entsteht also ein Eliminierungsprodukt, das in der wässrigen Lösung neutral reagiert.

In der Petrischale mit dem Acetoxy-Dichtstoff ist ein sauer reagierendes Eliminierungsprodukt nachweisbar, da der Universalindikator die Lösung rot verfärbt. Der gleichzeitig wahrnehmbare Geruch deutet auf Essigsäure hin. Die blauen Schlieren um den Amin-Dichtstoff deuten auf ein basisch reagierendes Eliminierungsprodukt hin. Es ist ein fischartiger Geruch wahrnehmbar, der auf Amine hinweist.

Hinweise: Für einen Demonstrationsversuch wird die Verwendung von Standzylindern vor einem weißen Hintergrund oder einem Leuchtschirm empfohlen.

Sollte doch etwas von den Dichtstoffen an die Glasgeräte gelangt sein, kann man den anhaftenden Siliconfilm durch Einweichen in einem Laugenbad (Natronlauge (w=32 %)/ iso-Propanol) entfernen.

Die Agar-Agar-Platten können alternativ auch von der Lehrkraft vor dem Unterricht vorbereitet werden. Kurz bevor die Dichtstoff aufgetragen werden, werden die Platten in der Kristallisierscha-

le kurz auf einer Heizplatte erwärmt.

5.1.7 Silicondichtstoffe - Nachweis eines alkoholischen Eliminierungsprodukts

Geräte: vier Demonstrationsreagenzgläser mit passendem Reagenzglasständer, zwei Pasteurpipetten, zwei Glasstäbe

Chemikalien: Acetoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Soudal Aquarien Silikon transparent* Art.8271055, *Hornbach*), Alkoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Akkit 603 Bau Silikon weiss*, *Hornbach*), Natronlauge ($w = 10\%$), Kaliumpermanganat-Lösung ($w = 0,01\%$), gesättigte Natriumthiosulfat-Lösung, Ethanol

Sicherheit: Natronlauge (Gefahr, GHS05), Ethanol (Gefahr, GHS02, GHS07), Kaliumpermanganat ($w = 0,01\%$): Xn, $w \leq 25\%$ (BG/GUV-SR 2004)

Versuchsdauer: 10 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Vier Demonstrationsreagenzgläser werden zu einem Viertel mit verdünnter Kaliumpermanganat-Lösung, dann bis zur Hälfte mit Natronlauge gefüllt und zum Homogenisieren umgeschwenkt.
- Es wird ein mindestens 5 cm langer Streifen des Acetoxy-Silicondichtstoffs um das eine Ende eines Glasstabs herum aufgetragen und vorsichtig (ohne das Glas zu berühren) in das erste Reagenzglas gestellt.
- Diesen Schritt wiederholt man für den Alkoxy-Silicondichtstoff.
- In das dritte Reagenzglas gibt man vier bis fünf Tropfen Ethanol und schwenkt zum Homogenisieren um. Das letzte Reagenzglas dient als Blindprobe.

Entsorgung: Die ausgehärteten Dichtstoffe können in den Hausmüll entsorgt werden. Die Kaliumpermanganat-Lösungen werden gesammelt, gegebenenfalls mit Natriumthiosulfat-Lösung reduziert und können in einen Abfallbehälter für anorganische Schwermetalllösungen entsorgt werden.

Beobachtungen: Für die Acetoxy-Masse und die Blindprobe ist keine Veränderung feststellbar. Die Lösungen mit der Alkoxy-Masse und die Vergleichsprobe mit Ethanol verfärben sich zunächst

blau und weiter grün (siehe Abbildung 14).

Auswertung: Es findet eine Redoxreaktion zwischen Kaliumpermanganat und dem während der Polykondensation eliminierten Alkohol statt. Dabei wird der Alkohol zum Aldehyd oxidiert, während Permanganat-Ionen MnO_4^- (+VII) zu Manganat-Ionen MnO_4^{2-} (+VI) reduziert werden. Die Lösung erscheint daher bei einem positiven Nachweis grün.

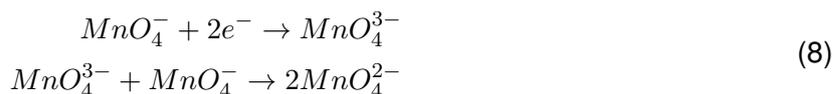


Abbildung 14: negativer Nachweis, positiver Nachweis, Alkoxy-Dichtstoff (von links nach rechts)

Hinweise: Die Lösungen färben sich bei längerem Stehenlassen an der Luft in Folge von Braunsteinbildung bräunlich.

Es gilt Ähnliches für eventuelle Siliconrückstände wie für den Versuch in Abschnitt 5.1.6.

Es sollte unbedingt ein Dichtstoff ohne Fungizide verwendet werden, da das Fungizid einen falschen positiven Nachweis erzeugen kann. Es sind alle Dichtstoffe geeignet, die für die Berührung mit Trinkwasser vorgesehen sind.

5.1.8 Silicondichtstoffe - Identifizierung des alkoholischen Eliminierungsprodukts als Methanol

Geräte: Schnappdeckelgläser mit Deckel (zweimal 40 ml, zweimal 20 ml), vier Pasteurpipetten, zwei Kunststoffmesspipetten (2 ml), zwei Reagenzgläser, Reagenzglasgestell, Spatel, Kartuschenpresse, Laborwaage

Chemikalien: Chromotropsäuredinatriumsalz Dihydrat, Schwefelsäure konz., Phosphorsäure (w = 5 %), Kaliumpermanganat-Lösung (w = 5 %), Natriumhydrogensulfit-Lösung (gesättigt), Alkoxy-Silicondichtstoff mit dem Eliminierungsprodukt Methanol (beispielsweise Kartusche *Akkit 603 Bau Silikon weiss, Hornbach*), zum Vergleich ein anderer neutral vernetzender Silicondichtstoff (bsp. einem Oxim als Eliminierungsprodukt), dest. Wasser

Sicherheit: konz. Schwefelsäure (Gefahr, GHS05), Kaliumpermanganat (w = 5 %): Xn, w ≤ 25 % (BG/GUV-SR 2004), Natriumhydrogensulfit-Lösung (Achtung, GHS07), Methanol (Gefahr, GHS02, GHS06, GHS08)

Versuchsdauer: 20 - 25 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Von der Lehrkraft wird eine Chromotropsäure-Lösung aus 0,1 g Chromotropsäuredinatriumsalz Dihydrat in 20 ml konz. Schwefelsäure hergestellt.
- Es werden 10 bis 15 g des Alkoxy-Silicondichtstoffs mit Hilfe einer Kartuschenpresse in ein großes Schnappdeckelglas gedrückt. Mit einem Spatel wird der Dichtstoff so verteilt, dass die gesamte Innenwand mit dem Dichtstoff bedeckt ist.
- Es wird 1 ml Wasser dest. zugegeben und das Schnappdeckelglas zügig verschlossen.
- Das Schnappdeckelglas wird kräftig geschüttelt und bleibt dann 10 min verschlossen, wobei immer wieder geschüttelt wird.
- Anschließend wird die Reaktionslösung in ein kleines Schnappdeckelglas überführt. Der Silicondichtstoff bleibt zurück.
- Es wird **ein** Tropfen der Lösung in ein Reagenzglas pipettiert und nacheinander mit einem Tropfen Phosphorsäure und einem Tropfen Kaliumpermanganat-Lösung versetzt.

- Nach 1 min Wartezeit wird tropfenweise gesättigte Natriumhydrogensulfit-Lösung zugegeben, bis die violette Färbung verschwunden ist.
- Dann wird die Probe im Reagenzglas mit 1 ml Chromotropsäure-Lösung versetzt und geschüttelt.
- Zum Vergleich kann der Versuch mit einem anderen Dichtstoff wiederholt werden, der einen negativen Nachweis zeigt (bsp. ein Oxim-Silicondichtstoff).

Entsorgung: Der ausgehärtete Dichtstoff kann zusammen mit dem Schnappdeckelgläschen in den Hausmüll entsorgt werden. Die Reaktionslösung wird neutralisiert und kann in den Behälter für organische Lösemittelabfälle entsorgt werden.

Beobachtungen: Nach Zugabe der Kaliumpermanganat-Lösung zu dem Dichtstoff mit dem Eliminierungsprodukt Methanol verfärbt sich die Reaktionslösung violett. Nach Zugabe der Natriumhydrogensulfit-Lösung erscheint die Lösung wieder farblos, es bleibt aber eine bräunliche Trübung zurück. Die Zugabe der Chromotropsäure-Lösung bewirkt eine typische blau-lila Färbung der Reaktionslösung (siehe Abbildung 15).

Bei dem Dichtstoff, der ein Oxim eliminiert, zeigt sich schon eine deutliche bräunliche Trübung nach Zugabe der Kaliumpermanganat-Lösung. Die Zugabe der Natriumhydrogensulfit-Lösung bewirkt die Ausflockung eines braun gefärbten Feststoffs. Nach Zugabe der Chromotropsäure-Lösung erhält man eine dunkelgelb gefärbte Lösung.



Abbildung 15: *positiver Nachweis mit Alkoxy-Dichtstoff (links), negativer Nachweis mit Amin-Dichtstoff (rechts)*

Auswertung: Methanol reagiert mit Kaliumpermanganat in einer Redoxreaktion zu Formaldehyd. Dieser kann in Anwesenheit von konzentrierter Schwefelsäure mit dem Chromotropsäuresalz zu einem Xanthylium-Farbstoff reagieren, der eine charakteristische violette Verfärbung der Reaktionslösung bewirkt. Es wird zunächst über eine Hydrierung ein Formaldehyd-Chromotropsäure-Addukt gebildet, das in einem weiteren Reaktionsschritt zu einem mesomerstabilisierten Xanthylium-Kation oxidiert wird. Der Mechanismus ist in Abb. 16 skizziert.

Auch das aus dem anderen Dichtstoff entstandene Reaktionsprodukt reagiert mit Kaliumpermanganat. Es entsteht jedoch kein Methanol und nachfolgend somit auch kein Formaldehyd, da die

Farbreaktion mit Chromotropsäure ausbleibt. Auf diese Art kann man einen neutral vernetzenden Silicondichtstoff, der Methanol eliminiert, eindeutig identifizieren und von anderen neutral vernetzenden Dichtstoffen unterscheiden.

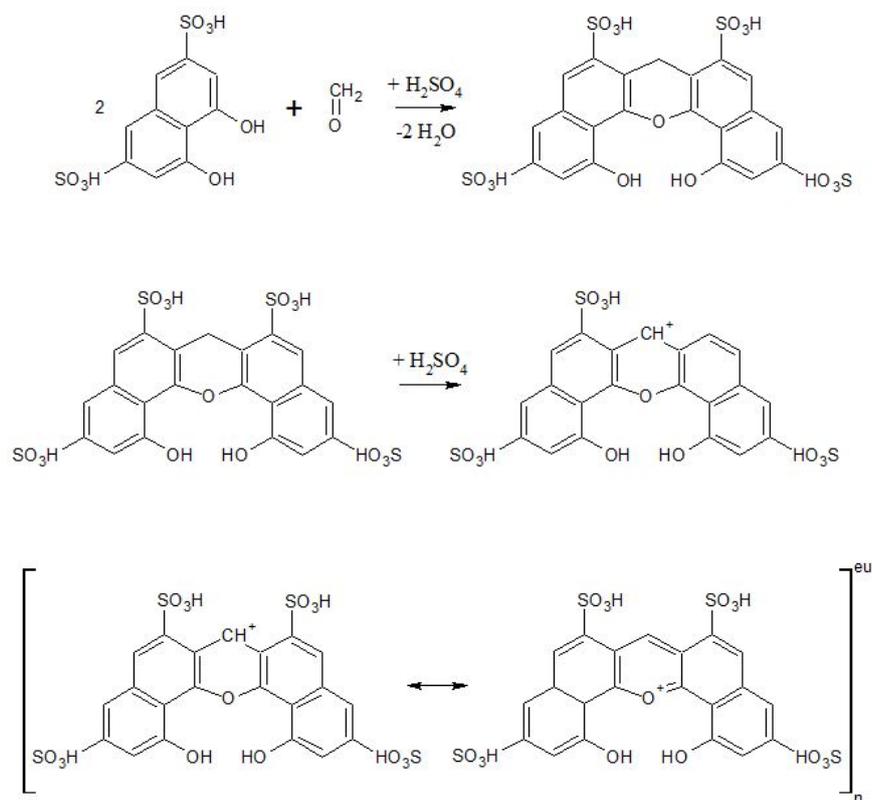


Abbildung 16: Mechanismus der Chromotropsäure-Reaktion zum Nachweis von Formaldehyd

Hinweise: -

5.1.9 Silicondichtstoffe - Nachweis von Essigsäure als Eliminierungsprodukt

Geräte: vier Schnappdeckelgläschen (20 ml), Pasteurpipette, Pinzette, Kartuschenpresse, Schere

Chemikalien: Acetoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Soudal Qualitätssilikon weiss, Hornbach*), Alkoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Akkit 603 Bau Silikon weiss, Hornbach*), dest. Wasser, Kupferblech (oder Kupfermünze), Essigsäure ($c = 2 \text{ mol/l}$)

Sicherheit: Essigsäure (Achtung, GHS07), Kupfer(II)acetat (Gefahr, GHS05, GHS07, GHS09)

Versuchsdauer: 10 min (Vorbereitung), 4 bis 24 h Wartezeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es wird ein Stück Kupferblech in vier gleich große Streifen (0,5 cm breit und 2 cm lang) geschnitten.
- Drei Schnappdeckelgläschen werden mit dest. Wasser aus einer Spritzflasche so befüllt, dass der Boden ca. 0,5 cm hoch mit Wasser bedeckt ist.
- Man trägt großzügig Acetoxy-Fugendichtstoff auf einen Streifen Kupferblech auf, stellt diesen mit einer Pinzette in eines der Gläschen und verschließt es. Dies wiederholt man für den Alkoxy-Silicondichtstoff in dem zweiten Gläschen.
- In das dritte Schnappdeckelglas gibt man ein Stück unbehandeltes Kupferblech und verschließt, denn es dient als Blindprobe.
- Für eine Vergleichsprobe gibt man gerade so viel Essigsäure in das vierte Glas, dass der Boden bedeckt ist (ca. 3 ml). Man stellt mit der Pinzette das Kupferblech hinein und verschließt das Glas.
- Man lässt die Schnappdeckelgläschen für mindestens 4h, besser für 24 h, ruhen.

Entsorgung: Das Kupferacetat auf den Kupferblechstreifen wird mit Essigsäure behandelt. Diese Lösung wird in einen Sammelbehälter für anorganische Schwermetalllösungen entsorgt.

Beobachtungen: Für die Alkoxy-Siliconmasse und die Blindprobe ist keine Veränderung auf dem Kupferblech feststellbar. Die Kupferblechstreifen mit der Acetoxy-Siliconmasse und der Vergleichsprobe zeigen bereits nach vier Stunden eine deutliche blaue Verfärbung oberhalb der Flüssigkeit. Nach 24 Stunden beginnt sich auch die Flüssigkeit blau zu färben.

Auswertung: Infolge der Einwirkung der Essigsäure-Dämpfe auf das Kupferblech entsteht oberhalb des Flüssigkeitsspiegels ein Gemisch verschiedener Kupferacetate. Beim Lösen in Essigsäure bildet sich Kupfer(II)-acetat, was die Lösung blau färbt. Der Versuch dient nicht nur als Nachweis für Essigsäure, sondern zeigt auch Grenzen der Anwendung von Acetoxy-Silicondichtstoffen auf. Eine Anwendung auf korrosionsempfindlichen Metallen ist daher nicht zu empfehlen.



Abbildung 17: Vergleichsprobe mit Essigsäure, sauer vernetzender Silicondichtstoff in dest. Wasser und Blindprobe mit dest. Wasser (von links nach rechts)



5.1.10 Modellversuche zu Funktionskleidung - Herstellung

Geräte: zwei Messzylinder (25 ml), Becherglas (50 ml), Glasstab, Pinzette, Spachtel, Schere, Papiertücher, Metallstab (oder Nudelholz), Papiertücher, Baumwollstücke, Petrischale, Tiegelzange, Kartuschenpresse, Lineal, Trockenschrank (alternativ: Backofen), wasserfester Folienstift

Chemikalien: aminofunktionalisiertes Siliconöl (beispielsweise Wetsoft CTA von Wacker Chemie), Acetoxy-Silicondichtstoff (beispielsweise Kartusche *Silikon transparent* Art. 8601371, Hornbach), dest. Wasser

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 50 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es wird ein Trockenschrank auf 120 °C vorgeheizt.
- Anschließend werden sechs Stücke aus einem Baumwollstoff zugeschnitten (ca. 4×4 cm; für die nachfolgenden drei Versuche werden jeweils zwei unterschiedlich beschichtete Stoff-

proben benötigt).

Beschichten mit einem aminofunktionalisierten Siliconöl (Wetsoft CTA):

- Es werden 12 ml Wetsoft CTA und 12 ml dest. Wasser in ein Becherglas gefüllt und verrührt. Dieser Ansatz ist ausreichend für mindestens zehn Stoffproben.
- Mit der Pinzette wird eine Stoffprobe etwa 1 min lang in die Lösung getunkt.
- Zum Auspressen der überschüssigen Lösung wird die Stoffprobe zwischen zwei Papiertücher gelegt, der Metallstab darauf gepresst und mehrfach darüber gerollt. Sollte immer noch überflüssige Flüssigkeit auf dem Stoff zurückbleiben, kann der vorangegangene Schritt wiederholt werden. Mit zwei weiteren Stoffproben wird analog verfahren.
- Die Stoffproben werden gekennzeichnet und in einer Petrischale 15 min zum Trocknen in den Trockenschrank gestellt.

Beschichten mit einem Silicondichtstoff:

- Auf eine weitere Stoffprobe wird mittig ein Strang von dem Silicondichtstoff (ca. 4 cm lang) gegeben und mit dem Spachtel zu einer gleichmäßigen Schicht verteilt. Dies wird für zwei Stoffproben wiederholt.
- Die Stoffproben werden für 15 min zum Trocknen in den Trockenschrank gelegt und anschließend auch auf der Rückseite beschichtet.

Entsorgung: Die beschichteten Stoffproben werden für weitere Versuche aufbewahrt. Die Reste der Lösung werden in den Abfallbehälter für organische Lösemittelabfälle entsorgt oder für weitere Versuche zu einem späteren Zeitpunkt aufbewahrt.

Beobachtungen: Die mit dem aminofunktionalisierten Siliconöl beschichteten Stoffproben sind genauso biegsam und flexibel wie die unbeschichteten Vergleichsproben, fühlen sich aber weicher an. Die mit dem Dichtstoff beschichteten Proben fühlen sich ebenfalls weich an, lassen sich aber nicht mehr gut falten.

Auswertung: Die Beschichtung mit dem aminofunktionalisierten Siliconöl ist bedingt durch die Art der Auftragung und die Konsistenz des Öls von einer geringen Schichtdicke. Es können sich Wechselwirkungen zwischen den Hydroxylgruppen der Cellulosefasern der Baumwolle und der

Aminogruppe des Silicons ausbilden (siehe Abbildung 18). Die Beschichtung mit dem Dichtstoff hat aufgrund der festeren Konsistenz der Masse und der Vernetzung, die nach dem Auftragen abläuft, eine größere Schichtdicke zur Folge.

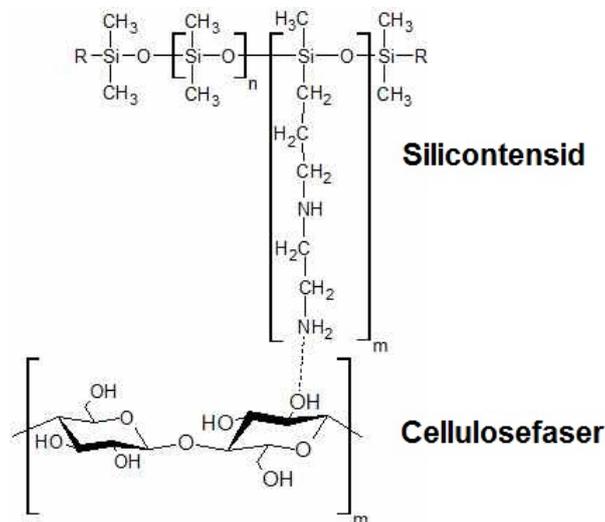


Abbildung 18: Skizze der Wechselwirkungen zwischen einem aminofunktionellen Silicon und einer Baumwollfaser (verändert nach [185, S. 15])

5.1.11 Modellversuche zu Funktionskleidung - Überprüfung der wasserabweisenden Eigenschaften

Geräte: Becherglas (50 ml), Glasstab, kleine Sprühflasche, Pasteurpipette

Chemikalien: beschichtete und unbeschichtete Stoffproben aus dem Versuch in Abschnitt 5.1.10, mit Lebensmittelfarbe oder Tinte eingefärbtes Wasser

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 5 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Die hydrophoben Eigenschaften werden durch Benetzen mit einem Tropfen gefärbten Wassers oder durch Aufsprühen von Wasser (Sprühtest) überprüft.

- Es wird beobachtet, wie sich die aufgetragenen Tropfen verhalten.

Entsorgung: Die beschichteten Stoffproben können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtung: Die Wassertropfen werden von der unbehandelten Stoffprobe sofort aufgesaugt. Für die mit dem Silicondioxid beschichtete Stoffprobe läuft dies langsamer ab, aber die Wassertropfen dringen schließlich doch in die Textilprobe ein.

Bei der mit Silcondichtstoff beschichteten Probe ist zu beobachten, dass die Tropfen nicht einsinken, sondern auf der Oberfläche liegen bleiben.



Abbildung 19: Wassertropfen auf mit Silcondichtstoff beschichteter Baumwolle

Auswertung: Die Stoffprobe mit einer Beschichtung aus Silcondichtstoff zeigt ein hydrophobes Verhalten. Die Siliconketten haben sich so auf der polaren Faseroberfläche ausgerichtet, dass die Sauerstoffatome zur Faser hin zeigen und die unpolaren Methylgruppen nach außen. Somit zeigt die Oberfläche der ausgerüsteten Baumwolle ein hydrophobes Verhalten und die polaren Wassertropfen werden abgewiesen.

Die Beschichtung mit dem Silicondioxid lässt eine Wechselwirkung mit hydrophilen Flüssigkeiten zu, allerdings findet das Einsinken der Tropfen deutlich langsamer im Vergleich zu unbehandelter Baumwolle statt.

Hinweise: Ergänzend kann der Kontaktwinkel relativ zur Oberfläche bestimmt werden, was sich aber bei Textilien als sehr fehleranfällig erweisen kann.

5.1.12 Modellversuche zu Funktionskleidung - Überprüfung der schmutzabweisenden Eigenschaften

Geräte: Papiertücher, unbehandelte und beschichtete Stoffproben aus dem Versuch in Abschnitt 5.1.10, Pasteurpipette, Spatel

Chemikalien: Tomatenmark, Schokolade, Rote-Beete-Saft

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 10 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden jeweils eine unbeschichtete Stoffprobe und eine mit dem Silicondichtstoff beschichtete Stoffprobe nebeneinander gelegt.
- Auf alle zwei Stoffproben wird jeweils in einer Ecke eine Spatelspitze Schokolade verteilt und verrieben. Es wird verglichen, wie gut dies gelingt.
- Die Schokolade wird mit einem Tuch abgewischt und es wird nochmals der Verschmutzungsgrad verglichen.
- Der Versuch wird auf noch sauberen Ecken der Stoffproben mit Tomatenmark und mit Rote-Beete-Saft wiederholt.

Entsorgung: Die Stoffproben können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Bei Verschmutzungen zeigt analog zu dem Versuch aus Abschnitt 5.1.11 nur die mit Silicondichtstoff behandelte Stoffprobe ein schmutzabweisendes Verhalten (siehe Abbildung 20). Nur von dieser Stoffprobe ist ein rückstandsloses Entfernen durch Abwischen möglich.



Abbildung 20: Baumwolle, beschichtet mit Silicondichtstoff, beschichtet mit Wetsaft CTA und unbeschichtet nach dem Abwischen des Rote-Beete-Safts (von links nach rechts)

Auswertung: Die schmutzabweisenden Eigenschaften einer textilen Oberfläche gehen mit ihren hydrophoben Eigenschaften einher. Verunreinigende Substanzen können bei einer hydrophoben Beschichtung nicht mit der Baumwolle der Stoffproben in Wechselwirkung treten.

Dieser Versuch zeigt, dass nur hydrophobe Silicone für wirkungsvolle, schmutzabweisende Funktionskleidung geeignet sind. Es handelt sich allerdings um einen Modellversuch, daher wurde der leicht verfügbare und gut zu verarbeitende Silicondichtstoff gewählt. Tatsächlich rüstet man textile

Oberflächen mit bedeutend dünneren Siliconschichten aus, damit eine Durchlässigkeit für Wasserdampf gewährleistet werden kann.

Hinweise: Der Versuch kann optional auch zum Vergleich zwei verschiedener Silicone dienen, die für unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten als Textilienbeschichtung genutzt werden. Es kann zusätzlich eine Stoffprobe mit einer Beschichtung des Silicontensids untersucht werden. Diese zeigt Spuren einer Verschmutzung, die sind allerdings nur schwach ausgeprägt verglichen mit der Blindprobe.

Die aminofunktionalisierten Silicontenside zeigen ein hydrophiles Verhalten und eignen sich nicht zur schmutzabweisenden Ausrüstung. Sie zeigen zwar eine schwache schmutzabweisende Wirkung, lassen aber immer noch Verschmutzungen zu. Ihr Einsatzgebiet ist die Optimierung des Weichgriffs eines Kleidungsstücks. Dies geschieht in abgeschwächter Form auch bei der Verwendung eines Weichspülers, der Silicontenside enthält.

5.1.13 Modellversuche zu Funktionskleidung - Überprüfung der Wasserdampfdurchlässigkeit

Geräte: Heizplatte mit Magnetrührkern, Erlenmeyerkolben (50 ml), Messzylinder (25 ml), Gummibänder, Uhrglas, Stativmaterial mit Stativring, Hebebühne, unbehandelte und beschichtete Stoffproben aus dem Versuch in Abschnitt 5.1.10

Chemikalien: Wasser

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 45 bis 60 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 25 ml Wasser abgemessen und in einen Erlenmeyerkolben mit Magnetrührkern überführt.
- Eine Stoffprobe mit einer Schicht Silicontensid wird mit einem Gummiband auf der Öffnung des Erlenmeyerkolbens gefestigt. Dazu wird die Stoffprobe über die Öffnung gespannt und ein Gummiband darüber gestülpt, so dass sich

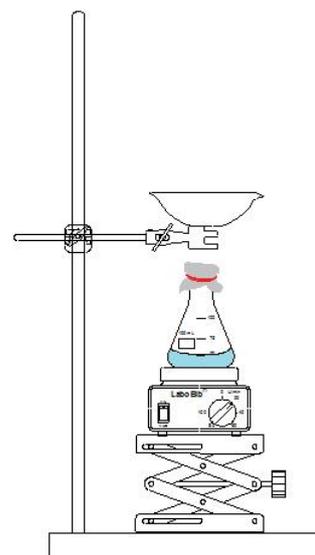


Abbildung 21: Skizze des Versuchsaufbaus zur qualitativen Überprüfung der Durchlässigkeit für Wasserdampf

keine Falten in dem Stoff bilden können. Das Uhrglas wird mit der Ausbuchtung nach oben über der Öffnung des Kolbens mit Hilfe des Stativmaterials fixiert.

- Das Wasser im Erlenmeyerkolben wird unter Rühren erhitzt, bis es siedet. Nun wird das Uhrglas beobachtet.
- Der Versuch wird mit einer unbehandelten Stoffprobe wiederholt.

Entsorgung: Die beschichteten Stoffproben können nach dem Trocknen in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Bei der Untersuchung beider Stoffproben ist erkennbar, dass das Uhrglas beschlägt.

Auswertung: Beide Stoffproben sind durchlässig für Wasserdampf. Die Beschichtung mit dem Silicontensid hat nur eine dünne Schichtdicke. Einzelne Moleküle des Wasserdampfs können die beweglichen Polymerketten des Tensids gegeneinander verschieben und durch diese Schicht diffundieren.

Hinweise: Der Versuch kann abgewandelt werden, indem statt eines Uhrglases ein Stück trockenes, frisch hergestelltes Kupfer(II)sulfat-Papier ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) mit 1 bis 2 cm Abstand zu der Stoffprobe mit Stativmaterial fixiert wird. Bei einem positiven Nachweis färbt sich das Papier in Folge der Bildung des quadratisch-planar koordinierten Kupfer(II)-sulfat ($[Cu(H_2O)_4]SO_4 \cdot H_2O$) blau.

5.1.14 Äquilibrierung von Silicondichtstoff

Geräte: Hebebühne, beheizbarer Magnetrührer mit einem Anschluss für ein Kontaktthermometer, Kontaktthermometer, Ölbad, Einhalsrundkolben (250 ml, 2×100 ml), Rührfisch, Rückflusskühler, Stativmaterial, Spatel, Scheidetrichter (250 ml), Glasstopfen, Destillationsbrücke, Bechergläser (2×100 ml), Messzylinder (50 ml), Wasserschläuche mit Schlauchklemmen, Schlifftthermometer, Laborwaage, Wägeschälchen, Mörser mit Pistill, Trichter, Filterpapier, pH-Papier, Schere, Wasserbad, Abdampfschale

Chemikalien: ausgehärteter Silicondichtstoff, Toluol, Kaliumhydroxid, dest. Wasser, Ethylacetat,

Natriumchlorid-Lösung (gesättigt), Magnesiumsulfat, Salzsäure (konz.)

Sicherheit: Es wird im Abzug gearbeitet!

Ethylacetat (Gefahr, GHS02, GHS07), Kaliumhydroxid (Gefahr, GHS05, GHS07), Salzsäure (Gefahr, GHS05, GHS07), Toluol (Gefahr, GHS02, GHS08, GHS07)

Versuchsdauer: 4 h für die eigentliche Reaktion und 2 h für die Aufarbeitung des Reaktionsprodukts (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Aus der Hebebühne, dem Magnetrührer, dem Stativmaterial und dem Kühler wird eine Apparatur zum Erhitzen unter Rückfluss aufgebaut.
- Es werden 5 g des ausgehärteten Silicondichtstoffs mit einer Schere in kleine Stücke geschnitten und in einen Rundkolben (250 ml) mit Rührfisch gegeben. Der Kolben kann jetzt in die Apparatur eingebaut werden.
- Es werden 50 ml Toluol abgemessen, dazugegeben und kräftig gerührt. Weiter werden 2,5 g Kaliumhydroxid abgewogen, fein gemörsert und ebenfalls in den Rundkolben gegeben.
- Das Ölbad wird jetzt auf 130 °C geheizt und es wird für 1 h unter Rückfluss erhitzt.
- Nun wird das Ölbad entfernt und der Kolben mit einem Wasserbad gekühlt. Weiter werden 50 ml dest. Wasser zum Beenden der Reaktion zugegeben und es wird 10 min während des Abkühlens weiter gerührt.
- Der farblose Feststoff (Füllstoff aus dem Dichtstoff) kann durch Filtrieren abgetrennt werden. Nach Zugabe von 30 ml Ethylacetat werden die Phasen im Scheidetrichter (250 ml) getrennt und die organische Phase so lange wiederholt mit 50 ml dest. Wasser gewaschen, bis der pH-Wert des ablaufenden Wassers zwischen 6 und 8 liegt. Die organische Phase wird mit 50 ml Natriumchlorid-Lösung gewaschen, über Magnesiumsulfat getrocknet und filtriert.
- Das Lösungsmittel Toluol (Sdp.: 110 °C) wird mittels Destillation über eine Destillationsbrücke entfernt. Das erhaltene Öl kann nun in einer Abdampfschale für 30 Minuten bei 100 °C im Trockenschrank getrocknet werden.
- Gegebenenfalls kann ein IR-Spektrum von dem erhaltenen Öl und dem Füllstoff aufgenommen und mit Referenzspektren verglichen werden.

Entsorgung: Die lösungsmittelhaltigen Flüssigkeiten werden neutralisiert und können in den Behälter für organische Lösemittelabfälle entsorgt werden. Das Filterpapier mit Siliciumdioxid kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Während der Reaktion und besonders nach Zugabe von Salzsäure fällt ein farbloser Feststoff aus. Nach der Entfernung des Lösemittels erhält man ein gelbliches Siliconöl. Wenn beschichteten Baumwollproben aus Versuch 5.1.10 eingesetzt werden, weisen die Stoffproben nach der Reaktion keinen ausgeprägten Weichgriff mehr auf. Dies kann als Hinweise zur Entfernung der Siliconbeschichtung dienen.

Auswertung: Während der Äquilibrierungsreaktion werden Silicium-Sauerstoff-Bindungen gelöst und neu verknüpft. Dadurch kommt es zur Einstellung eines Gleichgewichtszustand aus unterschiedlich langen linearen und cyclischen Siliconen. Die kurzkettigen Silicone lösen sich in Toluol und werden während der Destillation gemeinsam mit dem Lösemittel entfernt. Die langkettigen Silicone werden in Form eines flüssigen Siliconöls als Reaktionsprodukt erhalten. Bei dem farblosen Feststoff handelt es sich um Füllstoffe aus dem Dichtstoff, die verworfen werden können. Der Hauptbestandteil ist fein verteiltes Siliciumdioxid.

Hinweise: Das Elastomer muss sehr fein zerkleinert werden, um eine akzeptable Ausbeute zu erhalten. Bei der angegebenen Reaktionszeit ist eine Ausbeute von 55 bis 60 % möglich. Eine Verlängerung der Reaktionszeit würde dies steigern, was aber aus zeitlichen Gründen für den Chemieunterricht nicht sinnvoll ist.

Das Experiment ist auch mit anderen Gegenständen, die hauptsächlich ein Siliconelastomer enthalten, durchführbar. Die Reaktionszeit und die Ausbeute können abhängig vom Vernetzungsgrad aber stark schwanken, so dass ein Probedurchlauf vor dem Einsatz im Unterricht empfohlen wird.

5.1.15 Herstellung von *Intelligenter Knetmasse*

Geräte: beheizbarer Magnetrührkern, Rührfisch, Erlenmeyerkolben (50 ml), Glasstab, Sandbad (feuerfestes Gefäß mit Sand), Einmalhandschuhe, Laborwaage, Thermometer, Messpipette (5 ml), Peleusball

Chemikalien: Borsäure-Lösung ($w = 4,5 \%$), dest. Wasser, äquilibriertes Siliconöl aus dem vorangegangenen Versuch (Abschnitt 5.1.14)

Sicherheit: Borsäure ($w = 4,5 \%$): R 60/61 $w = \leq 5,5 \%$ (BG/GUV-SR 2004)

Versuchsdauer: 45 min Durchführung + 40 min Trockenzeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 2,5 g des äquilibrierten Siliconöls in einen Erlenmeyerkolben eingewogen und mit 3,2 ml Borsäure-Lösung ($w = 4,5 \%$) versetzt.
- Nach der Zugabe eines Rührfischs wird die Reaktionslösung unter ständigem Rühren für 20 min bei $150 \text{ }^\circ\text{C}$ erhitzt. Wenn die Viskosität zu stark zunimmt, wird mit einem Glasstab weitergerührt.
- Für eine optimale Ausprägung der viskoelastischen Eigenschaften wird die erhaltene zähflüssige Masse nach dem Abkühlen geknetet (Schutzhandschuhe verwenden).
- Sollten sich die gewünschten viskoelastischen Eigenschaften noch nicht deutlich genug erkennen lassen, kann die Masse für 40 min bei $120 \text{ }^\circ\text{C}$ im Trockenschrank getrocknet werden.

Entsorgung: Die „intelligente Knetmasse“ kann in den Abfallbehälter für Feststoffabfall entsorgt werden.

Beobachtungen: Aus dem Siliconöl entsteht eine zähflüssige, knetbare Masse, welche die oben genannten Eigenschaften von „intelligenter Knetmasse“ zeigt.

Auswertung: Die Vernetzung des Siliconöls erfolgt durch den Einbau von Boratomen in das Netzwerk. Die Bor- und Sauerstoffatome dieser Boraxgruppen tragen jeweils aufgrund ihrer unterschiedlichen Elektronegativitäten eine positive Partialladung an Boratomen und eine negative Partialladung an Sauerstoffatomen.

Lässt man die Masse zu Boden fallen, erfolgt eine Kräfteinwirkung auf die Polymerketten, sodass diese zu einer Annäherung gezwungen werden. Aufgrund der entgegengesetzten Partialladungen können sich nun durch Annäherung der Ketten neue Verknüpfungspunkte ausbilden. Allerdings sind die Bindungskräfte dieser Vernetzungsstellen so schwach, dass bei drucklosem Zustand die thermische Bewegung bereits ausreicht, um die Vernetzungsstellen zu lösen.

Hinweise: Die Herstellung der Borsäure-Lösung darf nicht von den SchülerInnen durchgeführt werden und muss im Vorfeld vom Lehrer übernommen werden. Es wird eine Konzentration von 4,5 Gew.-% vorgeschlagen (1,37 g krist. Borsäure in 30,18 g dest. Wasser), die noch für das Experimentieren im Schülerversuch geeignet ist.

Das Sandbad sollte vor der Versuchsdurchführung temperiert werden, da es ca. 1,5 h dauert, bis die Zieltemperatur erreicht ist. Alternativ kann ein Ölbad in Kombination mit einem Kontaktthermometer und beheizbarem Magnetrührer verwendet werden. Es muss dennoch mit einem Glasstab gearbeitet werden, da die Viskosität rasch so groß wird, dass ein Rührversuch mit einem Magnetrührkern nicht effektiv ist.

5.1.16 Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Präzision

Die Siliconabformung kann analog zu Versuch 3 des aktuellen Wacker-Koffers mit einer Münze durchgeführt werden [75, S.35]. Alternativ ist der Versuch aus Abschnitt 5.2.1 dieser Arbeit zu empfehlen.

Geräte: Laborwaage, Spatel oder Chemikalienlöffel, Wägeschälchen, Pinzette, Glasstab, Becherglas (100 ml), Messzylinder (25 ml), Münze

Chemikalien: Alginatpulver (beispielsweise *Omni dent Praxis*, schnell abbindend), dest. Wasser

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 10 min Durchführung + 10 min Wartezeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Für die Alginatabformung werden 12 g Alginatpulver in ein Becherglas eingewogen und 20 ml Wasser mit dem Glasstab eingerührt.
- Wenn die Masse nicht mehr krümelig ist, wird die Münze hineingedrückt.
- Man lässt die Masse für 10 min aushärten und entnimmt anschließend mit der Pinzette vorsichtig die Münze.

Entsorgung: Die ausgehärteten Abformmassen können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Abformung aus dem Siliconelastomer hat eine deutlich größere Detailtreue. Das ist besonders gut beim Abformen einer Münze oder eines anderen Gegenstandes mit einem Schriftzug erkennbar.

Auswertung: Beim Abformen mit Alginat findet keine Polymerisationsreaktion sondern eine Gelierung statt. Das Abformpulver enthält hauptsächlich Natriumalginat, das aus den Monomeren β -D-Mannuronsäure und der α -D-Guluronsäure über 1,4-glykosidische Bindungen als Block-Co-Polymer aufgebaut ist [186] (siehe Abbildung 22).

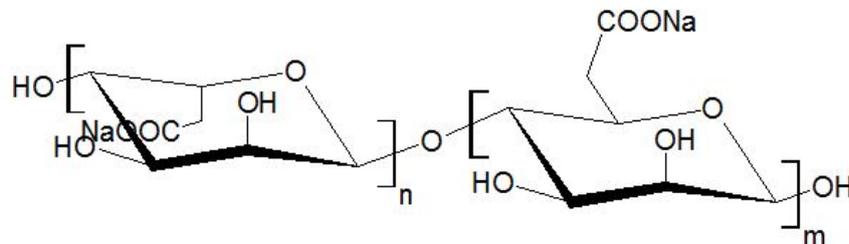


Abbildung 22: Strukturformel der Alginsäure

Bei Zugabe von Wasser hydratisiert das Natriumalginat und die Viskosität der Lösung nimmt mit dem Dissoziationsgrad der Carboxylatgruppen, verursacht durch die elektrostatische Abstoßung entlang der Polymerketten, zu. In Anwesenheit zweiwertiger Kationen, wie Calciumionen, können sich bereits bei Raumtemperatur feste Gele bilden. Ein Calciumion verknüpft zwei Glucuronsäurekettensegmente zweier Polymerketten über intermolekulare Assoziation miteinander zu einem Chelat. Diese Strukturabschnitte werden als sogenannte *egg-box*-Einheiten bezeichnet. Die übrigen Kettenabschnitte tragen nicht zu den Verknüpfungszonen bei und behalten ein elastisches Verhalten.

Näherungsweise kann die Gelbildung als Ionenaustausch-Reaktion betrachtet werden, bei der Natriumionen aufgrund einer geringeren Affinität zu den Glucuronationen gegen Calciumionen ausgetauscht werden [187]. Die Calciumionen werden dabei in die Lücken einer Zickzack-Struktur der Polymerketten eingelagert (siehe Abbildung 23).

Die mögliche Wechselwirkung mit umgebendem Wasser führt nur zu einer ungenauen Abformung. Für grobe Strukturen genügt diese, nicht aber für feine Zahnersatzabformungen.

5.1.17 Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Dimensionsstabilität

Geräte: Laborwaage, Spatel, Glasstab, Becherglas (100 ml), Messzylinder (50ml), zwei Kristallschalen, zwei Münzen, Pinzette

Chemikalien: Alginatpulver (beispielsweise *Omni dent Praxis* schnell abbindend), dest. Wasser

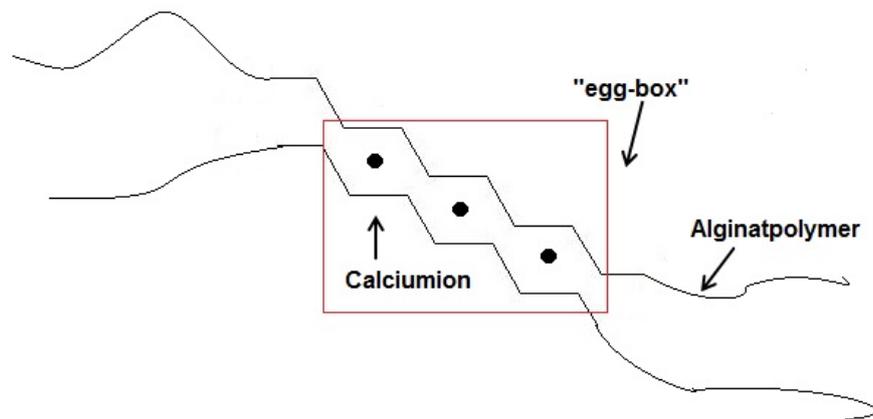


Abbildung 23: Schematische Darstellung der Einlagerungsverbindung von Calciumionen in Alginat

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 10 min Durchführung + 10 min Wartezeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 12 g Alginatpulver in ein Becherglas eingewogen und 20 ml Wasser mit dem Glasstab eingerührt.
- Wenn die Masse nicht mehr krümelig ist, wird sie auf zwei Kristallisierschalen aufgeteilt. Nun wird jeweils eine Münze auf die Masse gelegt, leicht angedrückt und nach 10 min entfernt, um einen Abdruck zu erhalten.
- Die Masse in einer Kristallisierschale wird 1 cm hoch mit Wasser überschichtet.
- Man wiegt die Kristallisierschale **ohne** Wasser nach 5 min, nach 15 min und am nächsten Tag (Masse der Kristallisierschale beachten).
- Die Masse des Alginats aus der Schale **mit** Wasser wird am nächsten Tag bestimmt, nachdem man das Wasser dekantiert und die Masse trocken getupft hat.
- Es wird auch das Aussehen der Massen verglichen.

Entsorgung: Die ausgehärtete Alginatform kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Alginatmasse ohne Wasserüberschichtung verliert deutlich an Masse. Bei

dem Vergleich mit dem abgeformten Gegenstand ist eine deutliche Schrumpfung erkennbar. Die Alginatmasse im Wasser ist über Nacht deutlich gequollen.

Auswertung: Das entstandene Gel kann reversibel Wasser aufnehmen und abgeben. Bei einer unsachgemäßen Lagerung schrumpft es, wenn zu viel Wasser verdunsten kann. Wird die Form zu feucht gelagert, kann noch mehr Wasser aufgenommen werden. In beiden Fällen geht die detailgetreue Abformung verloren.

Dieser Versuch zeigt die Anwendungsgrenzen von Alginatabformmassen auf.

5.1.18 Siliconöl - Schauminhibitor und Schaumstabilisator

Geräte: vier Pappbecher, vier Holzstäbchen, Laborwaage, Papier und Klebeband zum Abkleben der Laborbank, Pasteurpipette

Chemikalien: Polyol-Komponente mit Stabilisator (bsp. DESMOPHEN[®]), Polyisocyanat-Komponente (bsp. DESMODUR[®]), Polyol-Komponente ohne Stabilisator (bsp. Desmophen von Baytherm PU29HB65), hydrophobes Siliconöl (beispielsweise Siliconöl AK 1000 von *Wacker Chemie*), Polyethersiloxan (beispielsweise Tegostab B 8460 von *Evonik*)

Sicherheit: PU-Schaumkomponente B (Desmodur) (Gefahr, GHS06, GHS08)

Versuchsdauer: 10 bis 15 min (nur Lehrerversuch)

Durchführung:

- Im ersten Durchgang werden 5 g DESMOPHEN[®] und 8 g DESMODUR[®] zügig in einen Pappbecher eingewogen und bis zum Beginn der Schaumbildung gerührt.
- Im zweiten Durchgang wird der Versuch wiederholt und es werden zusätzlich einige Tropfen eines hydrophoben Siliconöls zugegeben.
- In einem dritten Ansatz werden 5 g des Polyols ohne Stabilisator (Baytherm PU29HB65) und 8 g DESMODUR[®] nacheinander in einen Pappbecher eingewogen. Die Mischung wird gerührt, bis eine einsetzende Schaumbildung den Reaktionsbeginn anzeigt.
- In einem vierten Ansatz wird wie bei dem dritten Durchgang gearbeitet und es wird zusätzlich 1 g Tegostab B 8460 eingerührt.

Entsorgung: Die ausgehärteten Polyurethanschäume können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Bei der zusatzfreien Durchführung beginnen die Schaumbildung und das Aufsteigen eines Schaumpilzes einige Sekunden nach der Zugabe der zweiten Komponente. Bei der zweiten Durchführung mit dem hydrophoben Öl ist dies anfänglich auch zu beobachten, aber die sich bildende Schaumkrone fällt immer wieder in sich zusammen.

Im dritten Durchgang bildet sich ein Schaum mit sehr großen Poren von einer uneinheitlichen Größenverteilung. Die Schaumkrone ist nur minimal ausgeprägt und nicht sehr hoch. Beim Zusatz des Polyethersiloxans Tegostab B 8460 bildet sich ein Schaumpilz mit einer einheitlicheren und feinporigeren Größenverteilung als in Durchgang 3. Das Ergebnis entspricht eher den kommerziell erhältlichen Mischungen.

Auswertung: Bei der Verwendung eines hydrophoben Polydimethylsiloxans überwiegt die niedrige Oberflächenspannung und die Schaumbildung bleibt aus. Polyurethankomponenten ohne Stabilisator können zwar wie gewohnt zur Reaktion gebracht werden, ergeben aber ein unbrauchbares Reaktionsprodukt mit schlechteren mechanischen Eigenschaften. Polyethersiloxane beein-

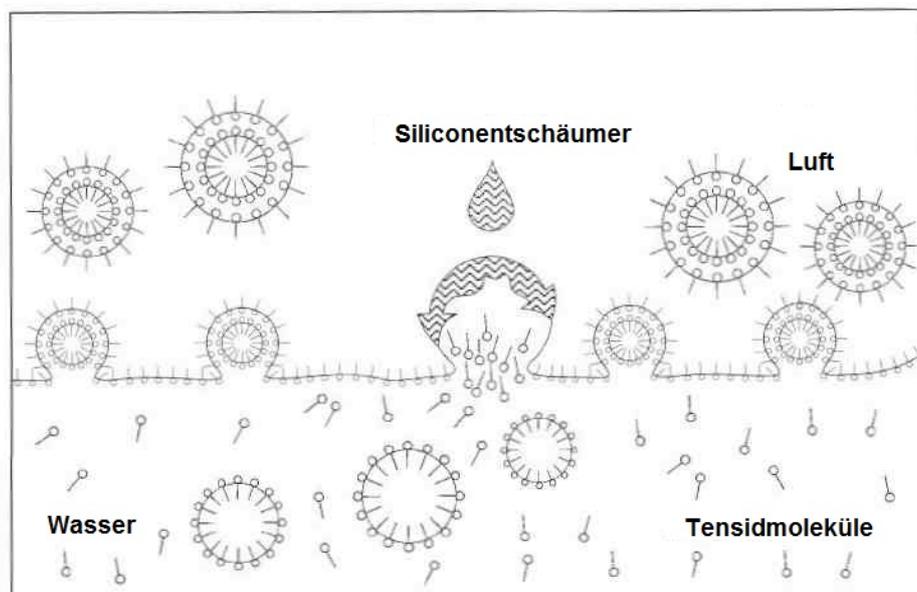


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Siliconentschäumer [14, S.39]

flussen während der Schaumbildung die Porengröße der Schaumlamellen und wirken dabei stabilisierend. Im Resultat erhält man einen feinporigeren, stabileren Schaum mit einer einheitlichen

Größenverteilung der Luftblasen. Kommerziell erhältliche Komponenten für die PU-Darstellung enthalten immer eine schaumstabilisierende Komponente, wie ein Polyethersiloxan.

5.1.19 Lernzirkel zur Unterscheidung von Ölen

Fettfleckprobe

Geräte: großes Filterpapier oder anderes Papier, vier Glasstäbe, vier Pasteurpipetten, Föhn, Stift

Chemikalien: Sonnenblumenöl, Paraffin-, Lavendel-, und Siliconöl (PDMS)

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 10 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Mit einem Glasstab wird ein Tropfen eines Öls auf ein großes Filterpapier getropft und die Probe beschriftet.
- Dies wird mit den anderen Ölen wiederholt.
- Nachdem die Öl-Proben getrocknet sind, hält man das Filterpapier gegen das Licht und vergleicht. Zum Verkürzen der Trockenzeit kann das Filterpapier trocken geföhnt werden.

Entsorgung: Die Filterpapiere können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Alle Öle bis auf das Lavendelöl hinterlassen einen fettigen Fleck nach dem Trocknen.

Auswertung: Das Lavendelöl wird den ätherischen Ölen zugeordnet mit den Hauptinhaltsstoffen Linalool, einem einwertigen, tertiären Alkohol aus der Untergruppe der acyclischen Monoterpene, und Linalylacetat, einem Monoterpenoid-Ester. Beide Monoterpene haben einen deutlich höheren Dampfdruck als die anderen Öle, die aufgrund der Kettenlänge der Moleküle ein höheres Molekulargewicht aufweisen.

Oxidationsbeständigkeit

Geräte: Heizplatte, vier Reagenzgläser, vier Stopfen, Reagenzglasständer, Pasteurpipette, Messpipetten (viermal 1 ml, einmal 2 ml, zweimal 5 ml), Becherglas (100 ml), Peleusball, (Scheidetrichter, Stativmaterial mit Stativring zur Entsorgung)

Chemikalien: Sonnenblumenöl, Paraffin-, Lavendel-, und Siliconöl (PDMS), Natriumcarbonat-Lösung ($w = 0,1 \%$) und Kaliumpermanganat-Lösung ($w = 0,001 \%$) für das Baeyer-Reagenz, Natriumthiosulfat-Lösung (gesättigt)

Sicherheit: Kaliumpermanganat ($w = 0,01 \%$): Xn, $w \leq 25 \%$ (BG/GUV-SR 2004)

Versuchsdauer: 15 bis 20 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Im ersten Schritt wird das Baeyer-Reagenz durch Mischen gleicher Anteile Kaliumpermanganat-Lösung und Natriumcarbonat-Lösung gebrauchsfertig hergestellt (jeweils 5 ml).
- Es werden 1 ml eines Öls und anschließend 2 ml Baeyer-Reagenz in ein Reagenzglas pipettiert.
- Man schüttelt leicht und wartet die Phasentrennung ab.
- Der Versuch wird für die übrigen Öle wiederholt. Für eine Blindprobe wird dest. Wasser anstelle eines Öls eingesetzt.

Entsorgung: Die Reaktionslösungen werden mit Natriumthiosulfat-Lösung reduziert und nach Phasen getrennt. Die wässrige Phase kann in den Abfallbehälter für anorganische Schwermetallsalze entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Probenlösungen mit Lavendelöl und Sonnenblumenöl verfärben sich sofort grünlich und es bildet sich ein brauner Niederschlag. Die Lösungen mit dem Paraffinöl und mit dem Siliconöl zeigen keine Veränderung.

Auswertung: Nur bei Vorhandensein von Doppelbindungen kann eine Reaktion mit Kaliumpermanganat stattfinden. Nur die Fettsäuren in den Triglyceriden der fetten Öle und Linalool, bzw. Linalylacetat im Lavendelöl weisen reaktionsfähige Doppelbindungen auf. Daher können nur diese beiden Öle einen positiven Nachweis zeigen.

Verseifung als Alternative zur Oxidationsbeständigkeit

Geräte: Laborwaage, Spatel, Messpipetten (zweimal 5 ml), Siedesteinchen, Messzylinder (10 ml), Becherglas (250 ml), vier Pasteurpipetten, Stift, vier Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Reagenzglaszange

Chemikalien: Sonnenblumenöl, Paraffin-, Lavendel-, und Siliconöl (PDMS), Ethanol, Natriumhydroxid-Lösung (w = 20 %)

Sicherheit: Ethanol (Gefahr, GHS02, GHS07), Kaliumhydroxid (Gefahr, GHS05, GHS07), Natronlauge (Gefahr, GHS05, GHS07)

Versuchsdauer: 20 bis 25 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es wird ein Becherglas etwa zur Hälfte mit Leitungswasser gefüllt und nach Zugabe von zwei Siedesteinchen zum Sieden erhitzt.
- Weiter werden jeweils 3 ml Ethanol und 3 ml Natriumhydroxid-Lösung in ein Reagenzglas pipettiert.
- Es werden 4 bis 5 Tropfen eines Öls hinzu gegeben und es wird geschüttelt.
- Dies wird für die übrigen Öle wiederholt.
- Die beschrifteten Reagenzgläser werden mit Siedesteinchen versehen und für 5 min im Wasserbad zum Sieden erhitzt.
- Anschließend lässt man die Reagenzgläser abkühlen und gibt jeweils 10 ml dest. Wasser zu und schüttelt.

Entsorgung: Die Lösungen werden neutralisiert und können in den Abfluss entsorgt werden.

Beobachtungen: Eine Schaumbildung ist für die Proben mit dem Olivenöl und mit dem Lavendelöl zu beobachten. Die Probe mit dem Siliconöl kann sich leicht trüben. Die Probe mit dem Paraffinöl zeigt keine Veränderung.

Auswertung: Bei einer Verseifung unter basischen Bedingungen findet eine Esterhydrolyse unter der Bildung der entsprechenden Alkohole und Carboxylate statt. Das Vorhandensein einer

Esterbindung ist also Voraussetzung für das Ablaufen der Reaktion. Die Triglyceride der fetten Öle werden zu Glycerin und Fettsäuresalzen hydrolysiert, die in Wasser schäumen. Für ätherische Öle wie Lavendelöl ist eine Esterhydrolyse ebenfalls möglich, so dass auch hier eine leichte Schaumbildung zu beobachten ist.

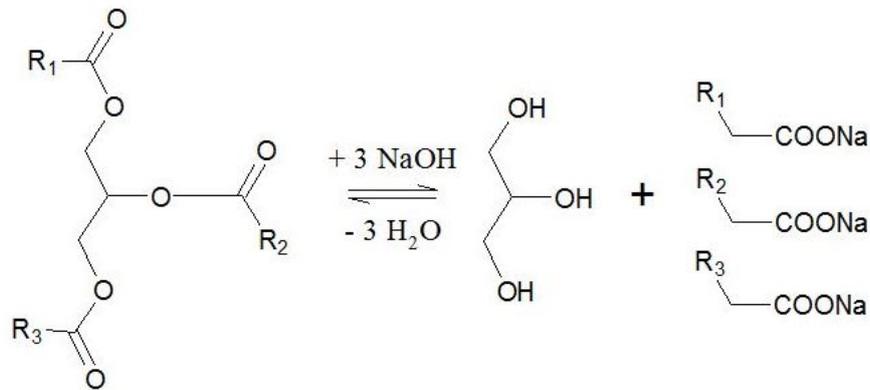


Abbildung 25: Verseifung eines Triglycerids

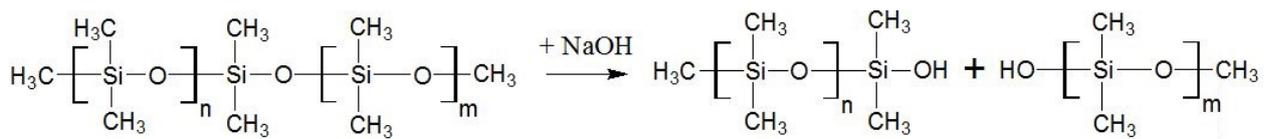


Abbildung 26: Depolymerisation eines Silicons unter basischen Bedingungen

Siliconöle sind aus Ketten mit alternierenden Silicium- und Sauerstoffatomen mit meist unpolaren Seitenketten aufgebaut. Nur unter stark basischen Bedingungen werden diese angegriffen. Es kann eine Depolymerisation stattfinden, an die sich weitere Polymerisationsschritte zu Polymeren mit höherem Molekulargewicht anschließen können. In diesem Fall kann eine Trübung der Lösung beobachtet werden.

Paraffinöle reagieren als langkettige Kohlenstoffpolymere ohne Estergruppe unter diesen Bedingungen nicht.

Vergleich der Brennbarkeit

Geräte: vier Porzellanschalen, Feuerzeug, Glimmspan, Dreifuß, Tondreieck, Teclubrenner, vier Pasteurpipetten, Tiegelszange

Chemikalien: Sonnenblumenöl, Paraffin-, Lavendel-, und Siliconöl (PDMS)

Sicherheit: Es wird im Abzug gearbeitet.

Versuchsdauer: 5 min pro Öl (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Mit einer Tropfpipette werden fünf Tropfen eines Öls in eine Porzellanschale gegeben.
- Es wird versucht das Öl vorsichtig mit einem brennenden Glimmspan zu entzünden. Sollte das nicht genügen, kann man zusätzlich die Porzellanschale mit dem Teclubrenner erwärmen.
- Dies wird mit den anderen Ölen wiederholt.

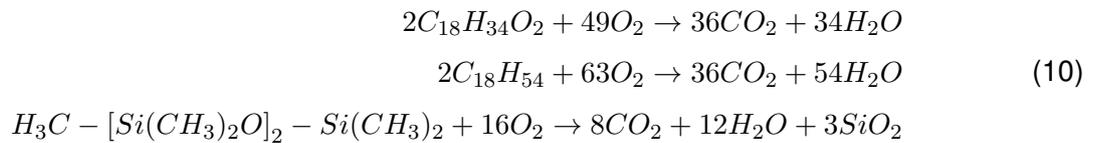
Entsorgung: Die Verbrennungsrückstände können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Das Lavendelöl lässt sich bereits mit dem Glimmspan entzünden und verbrennt mit einer orangen, rauchenden Flamme. Das Sonnenblumenöl ist bereits schwerer entzündbar und brennt ebenfalls mit einer orangen, rauchenden Flamme. Das Siliconöl kann erst nach Erwärmen über der Teclubrennerflamme mit dem Glimmspan entzündet werden. Es verbrennt mit einer hellen, weißen Flamme ohne Rußbildung.

Alle Öle bis auf das Siliconöl verbrennen zu einem schwarzen Rückstand. Nur das Siliconöl verbrennt zu einem weißen Rückstand.

Auswertung: Lavendel-, Oliven- und Paraffinöl sind Kohlenstoffpolymere, die unter Rußbildung zu Kohlenstoffdioxid und Wasser verbrennen. Dies ist in Gleichung 10 beispielhaft für Ölsäure als Hauptinhaltsstoff von Olivenöl, und für Octadecan gezeigt. Bei dem Verbrennungsprodukt handelt es sich um Rückstände aus Ruß.

Das Siliconöl enthält zwar auch organische Bestandteile aus den Seitenketten, hauptsächlich aber Silicium und Sauerstoff aus der Hauptkette. Das Silicium reagiert in der Reaktion mit Sauerstoff während der Verbrennung überwiegend zu Siliciumdioxid.



5.1.20 Siliconöl und Mineralöl - Vergleich der Viskosität

Geräte: drei Bechergläser (100 ml), Heizplatte, Stativmaterial, zwei Messzylinder (50 ml), Stoppuhr, Tropftrichter, Kristallisierschale, Spatel, Uhrglas, Laborwaage, Thermometer

Chemikalien: hydrophobes Siliconöl (bsp. Wacker-Siliconöl AK 100), Motoröl (bsp. SAE 10), Eis, Natriumchlorid

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 45 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es wird eine Kältemischung aus 100 g Eis und 23 g Natriumchlorid in der Kristallisierschale hergestellt. Weiter werden 20 ml eines Öls in ein Becherglas gefüllt und mit einem Uhrglas abgedeckt. Das Becherglas wird anschließend zum Abkühlen in die Kältemischung gestellt. Währenddessen kann der Versuch mit einer weiteren Ölprobe bei Raumtemperatur, bzw. bei 120 °C, durchgeführt werden.
- Es werden 20 ml eines Öls in einem Messzylinder abgemessen und vorsichtig in den Tropftrichter überführt. Es muss kurz gewartet werden, bis eventuelle Gasbläschen ausgeperlt sind.
- Anschließend wird bei Raumtemperatur drei Mal die Zeit gemessen, die das Öl zum Abfließen aus dem Tropftrichter benötigt. Die Zeitmessung beginnt, sobald der erste Tropfen aus dem Trichter läuft. Das Küken wird in allen Durchgängen gleich weit aufgedreht, um möglichst ähnliche Bedingungen zu schaffen.
- Für einen Durchgang bei hohen Temperaturen wird das Öl in einem Becherglas auf der Heizplatte auf 120 °C erwärmt und es wird der Versuch dreimal bei dieser Temperatur wiederholt.

- Es wird die Temperatur des Öls im Eisbad kontrolliert. Wenn sie konstant bleibt, kann der Versuch erneut durchgeführt werden.

Entsorgung: Die Öle können wieder verwendet werden. Sie werden in den beschrifteten Flaschen gesammelt.

Beobachtungen: Bei Raumtemperatur benötigen das Siliconöl und das Mineralöl eine vergleichbare Zeit zum Durchlaufen der Tropftrichter. Bei 100 °C ist das Mineralöl deutlich schneller als das Siliconöl und bei tiefer Temperatur ist es wesentlich langsamer. In Tabelle 20 sind beispielhaft die Werte einer Messung aufgeführt.

Tabelle 20: Ausflusszeit (Mittelwert aus drei Durchgängen) eines Mineral- und eines Siliconöls bei 0 °C, bei Raumtemperatur und bei 120 °C)

| Mineralöl | Temperatur (°C) | Zeit (sec) |
|-----------|-----------------|------------|
| | -10°C | 44 |
| | RT | 17 |
| | 120°C | 5 |
| Siliconöl | Temperatur (°C) | Zeit (sec) |
| | -10°C | 35 |
| | RT | 22 |
| | 120°C | 13 |

Auswertung: Die Zeit, die die Öle zum Durchlaufen der Tropftrichter benötigen, ist ein Maß für deren Viskosität. Bei Raumtemperatur sind die Öle diesbezüglich vergleichbar. Bei Messungen in hohem und tiefem Temperaturbereich wird jedoch deutlich, dass sich die Viskosität des Mineralöls stärker in Abhängigkeit von der Temperatur verändert als für das Siliconöl. Die Beobachtung lässt sich dadurch erklären, dass die Viskosität des Silikonöls weniger temperaturabhängig ist. Dies eröffnet für Siliconöle eine Vielzahl von Anwendungen, zum Beispiel als Schmiermittel.

5.1.21 Herstellung von *Magischem Sand*

Information: Magischer oder kinetischer Sand ist ein beliebtes Spielzeug für Kinder und wird vor allem unter den Namen *Magischer Sand*, *Moonsand* oder *Kinetic sand* verkauft. Der Sand ist formbar, obwohl er nicht feucht ist. Die wasserabweisenden Eigenschaften von diesem Sand

kann man durch Imprägnierung mit geeigneten Siliconen erzielen, was in diesem Versuch gezeigt werden soll. Das experimentelle Vorgehen wurde ausgehend von Katz weiterentwickelt [83].

Geräte: Aluminiumfolie, Trockenschrank, große Kristallisierschale, zwei Bechergläser (250 ml)

Chemikalien: feiner Sand, siliconhaltiges Imprägnierspray (bsp. ASTAT Silikonspray der Firma D.V.G. GmbH aus Wandlitz), dest. Wasser

Sicherheit: Es sollte unter einem Abzug oder mit Frischluftzufuhr gearbeitet werden.

Versuchsdauer: 90 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es wird ein Trockenschrank auf 100 °C vorgeheizt.
- Die große Kristallisierschale wird mit Aluminiumfolie ausgekleidet und es wird eine dünne Schicht Sand gut darauf verteilt. Der Sand wird nun direkt am offenen Fenster oder unter einem Abzug mit dem Siliconspray besprüht und zum Trocknen für 10 Minuten bei 100°C in den Trockenschrank gestellt.
- Ist der Sand trocken, wird gut durchmischt und danach wieder in einer dünnen Schicht verteilt. Der Sand wird ein weiteres Mal besprüht und erneut zum Trocknen in den Trockenschrank gestellt.
- Die Prozedur sollte mindestens noch dreimal wiederholt werden. Der Sand wird in ein Becherglas mit Wasser gegeben.
- Zum Vergleich wird unbehandelter Sand in ein weiteres Becherglas mit Wasser gegeben.

Entsorgung: Der Sand kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Optisch ist der behandelte Sand nicht von normalem Sand zu unterscheiden. Der mit dem Siliconspray behandelte Sand verteilt sich nicht im Wasser, während der unbehandelte Sand zum Boden absinkt. Der behandelte Sand erscheint sofort wieder trocken und ist rieselfähig, wenn er aus dem Wasser entnommen wird, während der unbehandelte Sand nass bleibt und verklumpt.

Auswertung: Bei unbehandeltem Sand ist eine Wechselwirkung zwischen Wassermolekülen und Silicium-Sauerstoff-

bindungen im Quarz über Wasserstoffbrückenbindungen möglich. Hier sind auch Wechselwirkungen mit dem aufgetragenen Silicon möglich. Die beschichtete Quarzoberfläche zeigt dann ein hydrophobes Verhalten. In industriell hergestelltem magischem Sand wird dieser Effekt durch die Einführung von kovalent gebundenen Trimethylsilyl-Gruppen erzielt und erscheint damit ausgeprägter.



Abbildung 27: Sand mit hydrophober Beschichtung in Wasser

Hinweise: Der Sand ist nur mit einer dünnen Siliconschicht überzogen, so dass die hydrophobe Wirkung schwächer ausfällt als bei dem im Einzelhandel erhältlichen Spielzeug.

5.1.22 Entschäumen mit Pflege lotion

Geräte: vier Reagenzgläser, Reagenzglasständer, vier Gummistopfen, Pasteurpipette, (ggf. Faserstift und Lineal), Glasstab

Chemikalien: siliconreiche Pflege lotion (bsp. *soft body milk*, *trockene Haut von Bebe young care*), siliconfreie Pflege lotion (bsp. *alverde Körper lotion - Olive, Aloe Vera*), Spülmittel, Wasser, Siliconentschäumer (bsp. SILFOAM[®] SRE Antischaum-Emulsion von Wacker Chemie AG)

Sicherheit: Beim Umgang mit SILFOAM[®] SRE wird das Tragen von Einmal-Handschuhen empfohlen.

Versuchsdauer: 10 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Vier Reagenzgläser werden zu einem Viertel mit Leitungswasser gefüllt.
- Es wird jeweils ein Tropfen Spülmittel zugeben, mit einem Gummistopfen verschlossen und geschüttelt.

- Ein Reagenzglas dient als Blindprobe und bleibt unverändert. In das zweite Reagenzglas wird ein Tropfen Siliconentschäumer gegeben und umgeschüttelt. In das dritte Reagenzglas werden mit einem Glasstab zwei bis drei Tropfen der Pflegelotion im oberen Drittel des Glases an die Wandung gegeben, so dass die Lotion nicht am Stopfen haften kann, aber auch nicht direkt in den Schaum tropft. Anschließend wird geschüttelt.
- Dies wiederholt man für die siliconfreie Pflegelotion in einem vierten Reagenzglas.

Entsorgung: Alle Lösungen können in den Ausguss entsorgt werden.

Beobachtungen: Nach der Zugabe des Spülmittels und erfolgtem Umschütteln kann eine deutliche Schaumbildung beobachtet werden. Die siliconreiche Pflegelotion zerstört die Schaumschicht aufgrund ihrer geringen Oberflächenspannung und destabilisierenden Wirkung auf die Schaumlamellen wieder. Bei der Vergleichsprobe mit dem Siliconentschäumer kann man dies ebenfalls beobachten. Die Blindprobe und der Ansatz mit einer siliconfreien Lotion zeigen keine Veränderung bzgl. des Schaums.

Auswertung: Geeignete Siliconöle mit unpolaren Seitenketten sind in wässriger Umgebung schlecht löslich und haben eine geringe Oberflächenspannung. Sie lagern sich in die Schaumlamellen ein und verdrängen dort die Tensidmoleküle (siehe Abb. 28). In der Folge werden die Lamellen zerstört und der Zerfall des Schaums beschleunigt. Silicontenside beeinflussen während der Schaumbildung die Porengröße der Schaumlamellen und wirken dabei stabilisierend. Im Resultat erhält man einen feinporigeren, stabileren Schaum mit einer einheitlichen Porengrößenverteilung.

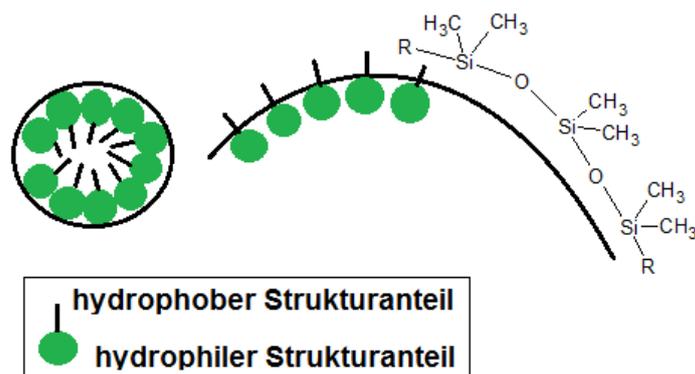


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Verdrängung von Tensidmolekülen im Schaum durch Siliconpolymere

Hinweise: Der Schaum zerfällt unter Einwirkung der siliconhaltigen Pflegelotion langsamer, da

diese im Gegensatz zu dem Siliconentschäumer nur geringe Mengen eines Silicons enthält.

5.1.23 Glanzoptimierung von Lipgloss

Geräte: Kristallisierschale (d = 5 cm), Becherglas (50 ml), Messzylinder (25 ml), Laborwaage, Glasstab (oder Holzspachtel), Heizplatte, Spatel, Chemikalienlöffel, Schnappdeckelgläschen, Objektträger, zwei Plastikpipetten, Siedesteinchen, Reagenzglasklammer

Chemikalien: Rizinusöl, Bienenwachs, Carnaubawachs, Dow Corning® 2502 Cosmetic Fluid

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 35 min + 5 min Wartezeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Die Kristallisierschale dient als Wasserbad, wird weniger als zur Hälfte mit Wasser gefüllt und zum Erwärmen auf die Heizplatte gestellt. Es werden zwei Siedesteinchen zugegeben.
- In ein Becherglas werden der Reihe nach 6 g Rizinusöl, 0,5 g Bienenwachs und 0,3 g Carnaubawachs eingewogen.
- Das Becherglas wird in das Wasserbad gestellt und unter Rühren auf höchstens 80 °C erwärmt, bis alle Bestandteile geschmolzen sind.
- Anschließend werden zwei Spatelspitzen eines Pigments zugegeben und gut eingerührt.
- Ein Tropfen des unbehandelten Gloss wird auf einen Objektträger getropft.
- In ein Schnappdeckelgläschen werden 0,2 g Dow Corning® 2502 Cosmetic Fluid eingewogen. Es werden 2 g des noch flüssigen Lipgloss in das Schnappdeckelgläschen gegossen und gut verrührt. Gegebenenfalls kann man das Gläschen mit Hilfe einer Reagenzglasklammer noch einmal ins Wasserbad halten, so dass die Masse schmilzt um den Mischungsvorgang zu erleichtern.
- Von diesem Lipgloss gibt man ebenfalls einen Tropfen auf den Objektträger. Nach 5 min Trockenzeit können die Glanzeigenschaften der beiden Proben miteinander verglichen werden.

Entsorgung: Die Reste des Lipgloss können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Das Lipgloss mit Siliconzusatz glänzt deutlich mehr als das unbehandelte Lipgloss (siehe Abb. 29).

Auswertung: Die linearen Polysiloxane können wegen der niedrigen Oberflächenspannung die Pigmentpartikel gut umhüllen und sorgen daher für eine gute Verteilung der Pigmente in dem flüssigen Lipgloss. Beim Auftragen kann sich eine Schicht mit einer gleichmäßig glatten Oberfläche bilden. Weitere Aspekte sind in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, da sich die Oberflächeneigenschaften auch mit einer anderen Siliciumverbindung variieren lassen.

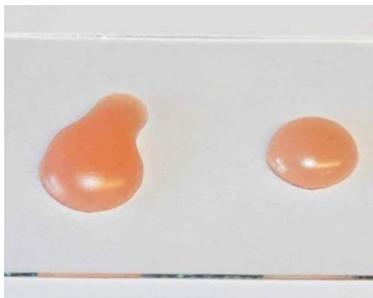


Abbildung 29: unbehandeltes Lipgloss (links), Lipgloss mit Siliconzusatz (rechts)

Hinweise: Es wurde eine Rezeptur für ein Lipgloss von Brückmann aufgegriffen und abgewandelt [19, S.104].

Das Fluid muss vor der Benutzung gut geschüttelt werden, da sich bei einer Lagerzeit ab ca. 1 Woche ein Bodensatz bildet. Es enthält lineare Polysiloxane mit verschiedenen Alkylseitengruppen (Dimethyl-, Methylcetyl-, Trimethylsiloxy-Polysiloxan) in einem Gemisch aus langkettigen Mineralölen. In Mineralölen mit kürzerer Kettenlänge würden sich die Silicone nicht lösen. In dieser Form können diese aber direkt in die Öl-Phase eines Kosmetikprodukts eingearbeitet werden.

5.1.24 Silicontenside in Haarpflegeprodukten

Geräte: zwei Bechergläser (50 ml), Glasstab, Messzylinder (zweimal 10 ml, einmal 50 ml), Echthaarsträhnen oder dickes zum Filzen geeignetes Schurwollgarn (z.B. Lauflänge 50 m/50 g), Kunststoffpipette, Spatel

Chemikalien: Glycintensid, Facetensid, Hydroxyethylcellulose (oder Hydroxypropylcellulose), dest. Wasser, Silicontensid (bsp. Dow Corning® 5-7113 Siliconmicroemulsion)

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 25 bis 30 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 5,5 ml Glycintensid, 5,5 ml Facetensid und 15 ml dest. Wasser abgemessen und unter Rühren in einem Becherglas vermischt.
- Zum Andicken des Shampoos wird eine Spatelspitze Hydroxyethylcellulose zugegeben. Das Gemisch wird gut verrührt.
- Der Ansatz wird halbiert und auf zwei Bechergläser aufgeteilt. Das Shampoo aus dem ersten Becherglas dient als Blindprobe. In die Probe am zweiten Becherglas werden zusätzlich zehn Tropfen des Silicontensids eingerührt.
- Die Eigenschaften der Proben 1 und 2 werden durch Shampooieren und Auswaschen an Haarsträhnen getestet. Dabei soll vor allem das Verhalten der Strähnen während des Waschens verglichen werden.

Entsorgung: Die Reste des Shampoos können in den Abfluss entsorgt werden.

Beobachtungen: Im Vergleich zu der Blindprobe benötigt man weniger Shampoo mit Silicontensid, um eine Haarsträhne gleichmäßig zu shampooieren. Die Haarsträhne erscheint im nassen Zustand glatter und lässt sich mit einem geringeren Kraftaufwand kämmen.

Auswertung: Aufgrund der geringen Oberflächenspannung des Silicontensids verteilt sich das Shampoo gleichmäßiger auf die Haaroberfläche. Die einzelnen Haare werden von einer Siliconschicht überzogen, so dass sie leichter voneinander zu trennen und daher leichter zu kämmen sind. Aus diesem Grund erscheinen sie auch glatter.

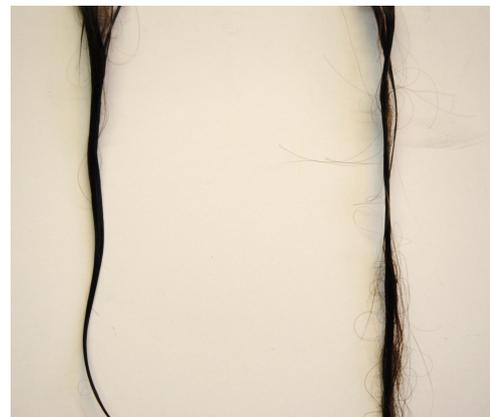


Abbildung 30: Haarsträhnen, gewaschen mit siliconhaltigem und mit siliconfreiem Shampoo (von links nach rechts)

Hinweise: Es wurde eine Rezeptur zur Herstellung einer Pflegespülung aufgegriffen und erweitert [188].

Die Unterschiede im nassen Zustand lassen sich immer gut erkennen, im getrockneten Zustand ist das Versuchsergebnis von der Beschaffenheit der verwendeten Haarsträhnen abhängig. Viele im Handel erhältliche Haarsträhnen sind bereits mit einer Siliconschicht überzogen, so dass das Ergebnis nicht eindeutig ausfallen kann. Alternativ können Wollstränge untersucht werden.

5.1.25 Wasserfeste Wimperntusche

Geräte: Heizplatte, drei Bechergläser (50 ml), Messzylinder (25 ml), vier Spatel, drei Glasstäbe/Holzstäbe, weißes laminiertes Blatt Papier, drei Kunststoffpipetten (3 ml), Kristallisierschale (d = 5 cm, Wasserbad), Thermometer, Laborwaage (für Indigo und Gummi Arabicum mind. drei Nachkommastellen), Wägeschälchen

Chemikalien: Lamécreme, Rizinusöl, dest. Wasser, Sorbit, Gummi arabicum, Pigmentpulver (Indigo), Dow Corning[®] 2502 Cosmetic Fluid

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 35 bis 40 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 1 g Lamécreme und 1 g Rizinusöl in ein Becherglas eingewogen und im Wasserbad auf einer Heizplatte unter Rühren auf ca. 65 °C erwärmt.
- In ein zweites Becherglas werden 5 g Sorbit eingewogen und mit 10 ml dest. Wasser versetzt. Diese Mischung wird ebenfalls unter Rühren auf ca. 65 °C erwärmt, bis das Sorbit gelöst ist.
- Wenn beide Lösungen diese Zieltemperatur erreicht haben, pipettiert man 6 ml Sorbitlösung in zwei Portionen zu der Fettschmelze.
- Dann werden 0,1 g Gummi arabicum und 0,1 g Indigo gründlich in die Emulsion eingerührt.
- Der Versuch wird wiederholt, aber es werden im ersten Schritt zusätzlich 2 g des Dow Corning[®] 2502 Cosmetic Fluids in das Becherglas mit Lamécreme und Rizinusöl einge-

wogen.

- Zum Vergleich der beiden Proben malt man mit einem Holzstab je einen nach oben offenen Bogen auf das weiße, laminierte Papier, hält das Papier schräg und tropft mehrere Tropfen dest. Wasser mittig über die Bögen auf das Papier, so dass das Wasser über die Bögen nach unten läuft.

Entsorgung: Die Lösungen können in den Abfluss entsorgt werden. Die Reste der Wimperntusche können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Wimperntusche mit dem Siliconzusatz verhält sich zähflüssiger als die Blindprobe. Eine Probe davon zeigt kein Auslaufen von Farbe, wenn Wassertropfen aufgegeben werden. Die Blindprobe hingegen verläuft.

Auswertung: Unpolare Silicone sind nicht wasserlöslich und haben eine geringe Oberflächenspannung, so dass sie schnell und umfassend Oberflächen benetzen. Die Beimischung zur Wimperntusche bewirkt ein hydrophobes Verhalten. Die enthaltenen Farbpigmente können so auch nicht in die wässrige Lösung gelangen. Die Wimperntusche ist daher beständig gegen Spritzwasser.

Hinweise: Es wurde eine Rezeptur zur Herstellung von Wimperntusche aufgegriffen und erweitert [189, S.88 f.].

Das Pigment verteilt sich auch nach längerem Rühren nicht so fein wie in der Vergleichsprobe, so dass koagulierte Pigmente erkennbar sind, da die Siliconkonzentration so hoch eingestellt ist. Dies ist bewusst so gewählt, um einen eindeutigen Unterschied im hydrophoben Verhalten zu erzielen und die Gelingsicherheit des Versuchs zu steigern.

Das Fluid muss vor der Benutzung gut geschüttelt werden, da sich bei einer Lagerzeit ab ca. 1 Woche ein Bodensatz bildet.

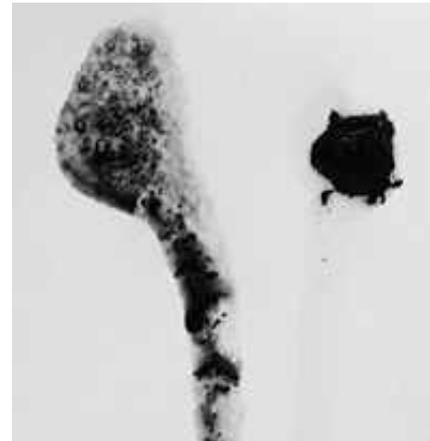


Abbildung 31: *siliconfreie Wimperntusche (links), siliconhaltige Wimperntusche (rechts)*

5.1.26 Deostift ohne Mikro-Schaum

Geräte: Heizplatte, drei Bechergläser (zweimal 50 ml, einmal 25 ml), fünf Spatel, Chemikalienlöffel (Abfüllen des Bienenwachses), Messer (Verarbeitung des Kokosfetts), vier Glasstäbe, zwei Kunststoff-Wägeschälchen, eine Kachel mit glatter Oberfläche oder eine dicke Glasscheibe, zwei Teelöffel, Papiertuch Einmalhandschuhe, Laborwaage, Thermometer, Kühlschrank

Chemikalien: Kokosfett, Bienenwachs, Natriumcarbonat, Zinkoxid, Dow Corning® 2503 Kosmetikwachs

Sicherheit: Natriumcarbonat (Achtung, GHS07)

Versuchsdauer: 30 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 1 g Natriumcarbonat und 2 g Zinkoxid in ein Becherglas (50 ml) eingewogen und mit einem Glasstab vermischt. Von dem Pulvergemisch werden 0,7 g in ein Wägeschälchen abgewogen.
- Weiter werden 1,8 g Bienenwachs und 1,3 g Kokosfett in ein zweites Becherglas (50 ml) eingewogen und langsam unter Rühren auf einer Heizplatte auf ca 65 °C erwärmt, bis eine flüssige Fettschmelze erhalten wird.
- Nun wird vorsichtig 1 g der noch warmen, flüssigen Fettschmelze in das Wägeschälchen mit der Pulvermischung gegossen. Das Schälchen wird sofort auf das Papiertuch gestellt und der Inhalt mit einem Glasstab verrührt. Dieser Ansatz dient als Blindprobe. Während des Rührvorgangs sollte auf die Konsistenz der Proben und auf das Verhalten beim Verrühren geachtet werden.
- Der Versuch wird analog für einen zweiten Ansatz wiederholt, bei dem zusätzlich 0,5 g Siliconwachs in die Fettschmelze eingerührt werden.
- Man lässt die Proben für 10 min im Kühlschrank aushärten und legt anschließend von jeder Mischung eine gleich große Probe auf eine Kachel oder eine Glasscheibe.
- Mit Hilfe eines Teelöffels werden nacheinander beide Proben folgendermaßen auf einer Oberfläche verstrichen: Es wird ein Teelöffel auf die Probe gedrückt und der Löffel einmal kräftig in eine Richtung darüber geschoben. In einem weiteren Durchgang kann der Einfluss

der Körperwärme auf das niedrigschmelzende Siliconwachs berücksichtigt werden. Es wird unter Verwendung eines Einmalhandschuhs mit einem Finger kurz von oben auf die Probe gedrückt und einmal mit gleichmäßigem Druck darüber gestrichen.

Entsorgung: Die Reste des Deostifts können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Blindprobe krümelt bereits beim Verühren, so dass im Vergleich zu der Probe mehr Zeit für eine vollständige Vermischung benötigt wird. Die Probe lässt sich dagegen sofort zu einem homogenen Brei verrühren.

Beim Aufstreichen krümelt die Blindprobe und bildet eine ungleichmäßig dicke Schicht (siehe Abb. 32). Es bilden sich weiße Streifen im Wechsel mit kaum benetzten Bereichen. Dagegen lässt sich die Probe nach dem Andrücken gleichmäßig verstreichen und zerfällt fast gar nicht dabei.



Abbildung 32: *verwischter siliconhaltiger Deostift (links), verwischter siliconfreier Deostift (rechts)*

Auswertung: Silicone begünstigen eine gleichmäßige Verteilung aller Substanzen bereits während des Vermischens. Aufgrund der geringen Oberflächenspannung werden die pulverigen Substanzen schneller und effektiver benetzt und können so leichter in die Fettschmelze eingerührt werden.

Hinweise: In diesem Versuch wird ein Siliconwachs verwendet, das aus Polystearylmethylsiloxan (ein modifiziertes Polydimethylsiloxan mit zusätzlichen Stearylgruppen) und einem Octadecen zusammengesetzt ist. Letzteres ermöglicht mit einem sehr niedrigen Schmelzpunkt ein optimiertes Auftragen auf die Haut, da bereits die Körperwärme die nötige Energie zum Schmelzen des Wachses liefert.

5.2 Silicone und Silica

5.2.1 Herstellung einer Abgussform mit dem Füllstoff Siliciumdioxid

Geräte: Pappbecher oder Aluminiumschälchen, Holzspachtel, Laborwaage, Trockenschrank (alternativ: Backofen), Tiegelzange, kleine Becher ($d = 5 \text{ cm}$), Einmalhandschuhe, Klebeband und Papier zum Abkleben der Laborbank

Chemikalien: Siliconabformmasse (beispielsweise *TFC Silikon Kautschuk Typ 6 Lebensmittel aprikot weich Shore 22 1:1* der Firma *Troll Factory*, pyrogenes, hydrophiles Siliciumdioxid

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 40 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden je 18 g von Komponente A und Komponente B der Abformmasse in einen Pappbecher abgewogen und mit einem Holzspachtel verrührt.
- Um eine streichfähige Masse zu erhalten, rührt man nach und nach portionsweise bis zu 1,5 g Siliciumdioxid unter.
- Sollte die Masse noch zu leicht fließen, gibt man weiter Siliciumdioxid hinzu.
- Den abzuformenden Becher bestreicht man über der abgeklebten Laborbank mit Hilfe des Holzspatels mit der streichfesten Masse (alternativ: Verwendung von Einmalhandschuhen) und stellt ihn auf ein Stück Alufolie bei 60 °C für 30 min in einen Trockenschrank.

Entsorgung: Der ausgehärtete Siliconkautschuk kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Nach der Zugabe von Siliciumdioxid wird die Siliconmasse zähflüssiger und kann nicht mehr gegossen werden. Die Masse kann aufgrund der hohen Viskosität mit einem Holzspachtel auf dem abzuformenden Gegenstand verteilt werden.

Nach der Aushärtungszeit ist die Form fest und kann von dem Becher abgenommen werden. Sie kann dazu umgestülpt und wieder zurück geklappt werden.

Auswertung: Die Siliconmasse ist aus zwei Komponenten über eine Polyaddition aus einem Präpolymer und eines Vernetzers unter Verwendung eines Platin-Katalysators entstanden (siehe Abschnitt 2.2.4).

Der Füllstoff Siliciumdioxid tritt mit dem Siliconpolymer der Abformmasse in Wechselwirkung, was eine Erhöhung der Viskosität zur Folge hat. Im Vergleich zu einer Siliconabformmasse ohne Siliciumdioxid ist diese Masse streichfähig. Eine Abformung kann daher mit einem geringeren Materialverbrauch durchgeführt werden.

Hinweise: Der Ansatz reicht zum Abformen von zwei kleinen Bechern aus.

5.2.2 Viskositätseinstellung von Nagellack

Geräte: Microspatellöffel, Objektträger, Holzstäbchen

Chemikalien: selbst hergestellter Nagellack oder im Einzelhandel erhältlicher Nagellack (z.B. *gel nailpolish* der Firma *essence* oder *Ultimate Naillacquer* der Firma *Catrice Cosmetics* (im Drogeriemarkt erhältlich), pyrogenes, hydrophiles Siliciumdioxid, Silicontensid (bsp. Dow Corning® 5-7113 Siliconmicroemulsion)

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 20 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden drei Proben des Nagellacks nebeneinander mit etwa 2 cm Abstand in Form eines großen Tropfen auf einen Objektträger aufgetragen.
- Ein Tropfen dient als Blindprobe und bleibt unverändert. Für die zweite Probe nimmt man die Löffelseite des Microspatels, misst einen Löffel voll Siliciumdioxid ab und rührt dieses mit einem Holzstäbchen in den Lack ein. In die dritte Probe rührt man vorsichtig zwei bis drei Tropfen des Silicontensids mit einem Holzstäbchen ein.
- Anschließend stellt man den Objektträger im 90°-Winkel auf und wartet 5 min.

Entsorgung: Die getrockneten Nagellackproben können mit Aceton von der Glasplatte entfernt und in den Abfallbehälter für organische Lösemittelabfälle entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Lackprobe mit Siliciumdioxid fließt langsamer als die Blindprobe, die Lackprobe mit dem Silicontensid schneller.

Auswertung: Die Viskosität des Nagellacks wird durch die Beimischung von Siliciumdioxid erhöht. Bedingt durch die große spezifische Oberfläche der Siliciumdioxid-Partikel werden intensive Wechselwirkungen zwischen den Partikeln und den übrigen Bestandteilen des Lacks ermöglicht. Bei der Verwendung von Siliciumdioxid werden Wasserstoffbrückenbindungen zwischen endständigen Hydroxylgruppen auf den Siliciumdioxid-Partikeln und einer polaren Umgebung ermöglicht.

Siliconadditive haben dagegen eine Verminderung der Viskosität des Lacks zu Folge. Bedingt durch die eigene niedrige Oberflächenspannung erniedrigen diese der Oberflächenspannung eines Lackes und erhöhen so seine Gleitfähigkeit.

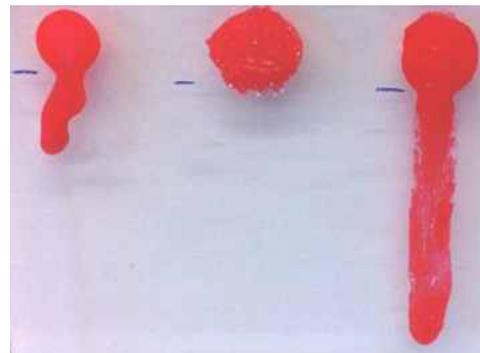


Abbildung 33: *unbehandelter, selbst hergestellter Lack, Lack mit Zusatz von Siliciumdioxid, Lack mit Zusatz von Siliconöl (1 Tropfen) (von links nach rechts)*

Hinweise: Die Trockenzeit kann für ein eindeutigeres Ergebnis gegebenenfalls verlängert werden, da sie auch von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird.

5.2.3 Herstellung und Modifizierung eines Nagellacks

Information: Es wird ein Modell-Nagellack zur Einstellung der Glanzeigenschaften, bzw. zur Einstellung eines Mattierungseffekts hergestellt. Im Handel erhältliche Lacke sind meistens schon in dieser Hinsicht optimiert, so dass die genannten Effekte nicht deutlich gezeigt werden können. Für die Herstellung der Nitrocellulose-Lösung werden 0,6 g stabilisierte Nitrocellulose in 10 ml iso-Propanol suspendiert. Dieser Schritt muss vor der Durchführung des Versuchs von der Lehrkraft übernommen werden, da SchülerInnen nicht mit Nitrocellulose arbeiten dürfen.

Geräte: Bechergläser (50, 100 ml), Messzylinder (50 ml, 100 ml), Schnappdeckelgläser (einmal 20 ml, dreimal 10 ml), fünf Holzstäbchen, Heizplatte, Objektträger, Spatel, Wägeschälchen, Analysenwaage, Kunststoffmesspipette (3 ml), kleiner Pulvertrichter

Chemikalien: Nitrocellulose-Lösung in iso-Propanol ($w = 5\%$), PMMA (Polymethylmethacrylat), Butylacetat, Ethylacetat, Ethylcellulose, Rizinus, Farbpigmente (z.B. Essence pigments No. 06), Siliconharz (bsp. BELSIL® von Wacker-Chemie), pyrogenes, hydrophiles Siliciumdioxid

Sicherheit: Es wird im Abzug gearbeitet.

Nitrocellulose mit 30 % iso-Propanol (Gefahr, GHS02, GHS07), Isopropanol (Gefahr, GHS02, GHS07), Butylacetat (Achtung, GHS02, GHS07), Ethylacetat (Gefahr, GHS02, GHS07)

Versuchsdauer: 30 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Herstellung der Ethylcellulose-Lösung: Es werden 60 ml Ethylacetat erwärmt und 5 g Ethylcellulose unter gleichmäßigem Rühren darin gelöst (entspricht 8,5 % Ethylcellulose in Ethylacetat).
- Herstellung der PMMA-Harzes: Es werden 1,5 g PMMA unter leichtem Erwärmen und ständigem Rühren in 30 ml Butylacetat gelöst (entspricht 5,3 % PMMA in Butylacetat). PMMA löst sich schlecht. Die Mischung wird in ein Vorratsgefäß umgefüllt und ca. 24 Stunden stehen gelassen und immer wieder umgerührt. So erhält man eine klare Lösung.
- Für den Basislack werden 6 g Ethylcellulose-Lösung, 0,5 g Nitrocellulose-Lösung, 0,3 g Rizinus und eine Spatelspitze eines Pigments in ein großes Schnappdeckelglaschen eingewogen. Es werden 2 ml PMMA-Harz zu getropft und es wird mit einem Holzstäbchen zu einem homogenen Lack verrührt.
- Von dem Basislack werden dreimal je 2 g in kleine Schnappdeckelglaschen umgefüllt, der verbleibende Rest dient als Blindprobe und bleibt unverändert.
- In die zweite Lackprobe werden noch zusätzlich 0,5 g des Siliconharzes eingerührt. In die dritte Lackprobe werden 0,05 g Siliciumdioxid und in die vierte Lackprobe 0,1 g Siliciumdioxid eingerührt.
- Es werden Proben der Nagellacke nebeneinander auf einen Objektträger aufgetragen. Es sollte auf die Konsistenz und die Fließfähigkeit der Lackproben geachtet werden.
- Nach 10 min Trockenzeit werden die Glanzeigenschaften der Lackproben miteinander verglichen.

Entsorgung: Die getrockneten Nagellackproben können mit Aceton von der Glasplatte entfernt und in den Hausmüll entsorgt werden. Die Lackproben können für die weiteren Nagellack-Versuche aufgehoben und wieder verwendet werden.

Beobachtungen: Im Vergleich zu dem unbehandelten Lack zeigt die Probe des Lacks mit Siliconharz eine glänzendere und glattere Oberfläche. Die Oberfläche der Probe mit einer geringen Konzentration an Siliciumdioxid fühlt sich rauer an als der unbehandelte Lack. Für die Probe mit einer hohen Konzentration an Siliciumdioxid fällt dies noch intensiver aus; die Oberfläche kann sogar Risse aufweisen.

Der Lack mit dem Zusatz von Siliconharz ist sehr homogen durchmischt und lässt sich bereits mit einer Schicht gleichmäßiger als der unbehandelte Lack auftragen.



Abbildung 34: Basislack, Zusatz von 0,5 g Siliconharz, Zusatz von 0,05 g und von 0,1 g Siliciumdioxid (von links nach rechts)

Auswertung: Siliconharz als Filmbildner ist in der Lage Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche auszugleichen. Die Farbechtheit und die Glanzeigenschaften eines Lackes werden daher erhöht. Siliconharze werden den Bindemitteln zugeordnet, Siliciumdioxid den Füllstoffen. Die Siliconharze beeinflussen u.a. die Glanzeigenschaften eines Lackes. Eine getrocknete Nagellackoberfläche zeigt dann einen intensiven Glanz und hat eine angenehme, samtige Haptik. Außerdem benetzen Polysiloxane eine Fläche aufgrund ihrer geringen Oberflächenspannung besonders gut und vor allem vollständig. Dabei dringen sie auch in kleinere Unebenheiten und füllen diese auf. Die Fläche wird geglättet und reflektiert so einfallendes Licht geordneter, so dass sie glänzender wirkt [9, S.1187], [17].

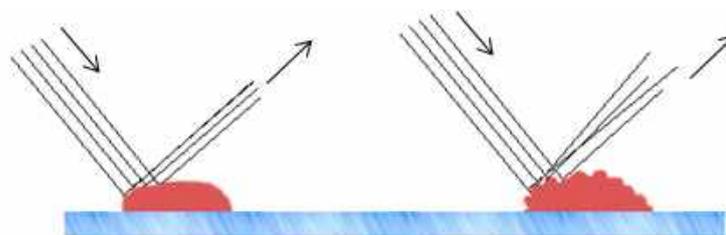


Abbildung 35: Skizze des Strahlengangs von reflektiertem Licht (links: glatte Oberfläche, rechts: unregelmäßige Oberfläche)

Siliciumdioxid dient in geringen Mengen zur Einstellung der Fließigenschaften eines Lackes und

kann das Auftragen erleichtern. In größeren Mengen wird es als Mattierungsmittel eingesetzt. Der Mattierungseffekt kommt dadurch zustande, dass die Siliciumdioxid nicht in den verwendeten Lösemitteln löslich ist und Agglomerate der Partikel in die Lackoberfläche eingelagert werden. Die unregelmäßige Struktur der Oberfläche verändert ihre optischen Eigenschaften. Einfallendes Licht wird nicht unter dem gleichen Winkel reflektiert, so dass der Glanz herab gesetzt wird.

Bei einem sehr hohen Siliciumdioxid-Anteil in einem Lack kann die Lackoberfläche während des Trocknungsvorgangs aufreißen. Dies wird bei Effektlacken, wie dem sogenannten *Crackling*-Lack, genutzt.

Hinweise: Die Trockenzeit kann für ein eindeutigeres Ergebnis gegebenenfalls verlängert werden, da sie auch von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Wenn ein Lack ohne Pigmente hergestellt wird, kann man seine Eigenschaften als Überlack in den anderen Nagellack-Versuchen überprüfen.

Zur Herstellung der Nitrocellulose-Lösung werden 0,6 g (Nitrocellulose mit 30 % Isopropanol) in 10 ml Isopropanol suspendiert.

Wenn nur die mattierenden Eigenschaften von Siliciumdioxid in einem Lack untersucht werden sollen, kann auch auf Lacke aus dem Einzelhandel zurückgegriffen werden (bsp. *Ultimate Nailacquer* von *Catrice Cosmetics*). Der modifizierte Lack kann auch direkt mit im Handel erhältlichen Effektlacken mit mattierenden Eigenschaften verglichen werden (bsp. *!arriba!* und *cracking top coat* von *essence*, im Drogeriemarkt erhältlich).

5.3 Silica

5.3.1 Qualitativer Nachweis von löslichen Silica in Zahncreme

Geräte: PE-Schraubflasche (50 ml), drei Reagenzgläser, Reagenzglasständer, Spatel, sechs PE-Messpipetten (fünfmal 2 ml, einmal 5 ml), PE-Messzylinder (10 ml)

Chemikalien: dest. Wasser, hydrophiles Siliciumdioxid, farblose Zahncreme ohne Sorbit (bsp. *Kinder Zahngel*, *Pflanzen Zahncreme* oder *Sole Zahncreme* von *Weleda*), saure Natriummolybdat-Reagenzlösung: wässrige Natriummolybdat-Dihydrat-Lösung (w = 8 %) und Schwefelsäure (c = 1 mol/l) werden im Verhältnis 1 : 1 gemischt, wässrige Weinsäure-Lösung (w = 20 %), wässrige Ascorbinsäure-Lösung (w = 5 %), Natriumhydroxid-Lösung (c = 1 mol/l)

Sicherheit: Schwefelsäure (Gefahr, GHS02, GHS05), Natriumhydroxid-Lösung (Gefahr, GHS05)

Versuchsdauer: 20 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Zur Vorbereitung der Probe wird ein Streifen Zahncreme (1 g) in einer PE-Flasche in 10 ml Natriumhydroxid-Lösung angeschlämmt. Man wartet 5 min und schüttelt dabei die verschlossene Flasche in regelmäßigen Abständen.
- Von dieser Lösung werden 2 ml mit einer Pipette in ein Reagenzglas gegeben.
- Für eine Blindprobe füllt man 2 ml Natronlauge in ein zweites Reagenzglas, für eine Vergleichsprobe 2 ml Leitungswasser und eine Spatelspitze Siliciumdioxid in ein drittes Reagenzglas.
- Man gibt mit einer Pipette 4 ml der sauren Natriummolybdat-Reagenzlösung in jedes Reagenzglas.
- Nach zwei Minuten fügt man mit einer weiteren Pipette 2 ml Weinsäure-Lösung hinzu und schüttelt.
- Abschließend wird 1 ml Ascorbinsäure-Lösung mit der zugehörigen Pipette hinzu gegeben.

Entsorgung: Die Lösungen werden gesammelt und in einem Abfallbehälter für anorganische Schwermetalllösungen entsorgt.

Beobachtungen: Nach der Zugabe der Natriummolybdat-Reagenzlösung färben sich die Lösungen in Abhängigkeit der Konzentration von vorhandenem Silica gelb. Diese Gelbfärbung ist besonders bei geringen Konzentrationen sehr schwach und kaum sichtbar. Bei der Zugabe der Ascorbinsäure-Lösung färben sich Lösungen, welche Silica enthalten, blau.

Auswertung: Die qualitative Bestimmung von löslichen Silica erfolgt durch Reaktion mit Molybdat-salzen in Anwesenheit von Schwefelsäure [190]. Unter diesen Bedingungen im sauren pH-Bereich bilden sich Molybdat-Anionen, die über die mögliche Zwischenstufe des Heptamolybdat-s zu Dodecamolybdat kondensieren, wie in den folgenden Gleichungen dargestellt.

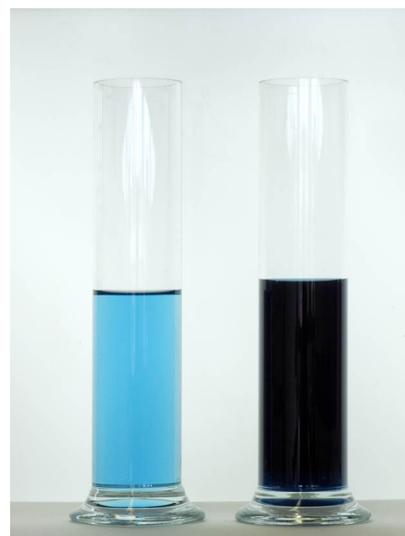
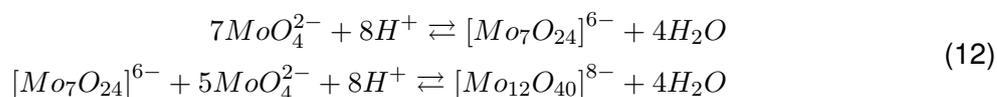
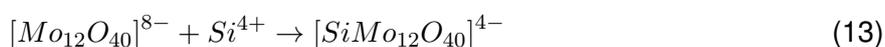


Abbildung 36: Blindprobe mit dest. Wasser (links), positiver Nachweis mit Leitungswasser (rechts)



Dieses Ion ist aus vier eckenverknüpften Gruppen von jeweils drei kantenverknüpften Oktaedern aufgebaut und weist die Keggin-Struktur auf [7, S. 1464 ff.]. In die Lücke des Isopolyanions können verschiedene Fremdatome eingelagert werden. Kieselsäure, die sich in wässrigen Lösungen aus löslichen Silica bildet, wird von den Sauerstoffen der umgebenden MoO_6 -Oktaeder tetraedrisch koordiniert. Das resultierende Heteropolyanion, das Dodecamolybdatosilicat, erscheint gelb gefärbt. Formal läuft folgende Reaktion ab:



Es kann nur ein Äquivalent **Monokieselsäure** eingelagert werden, so dass höher kondensierte Kieselsäuren einer Probenlösung zunächst keine Reaktion eingehen. Allerdings findet eine Gleichgewichtsverschiebung von kondensierten zu monomeren Kieselsäuren in dem Maße statt, in dem keine monomere Kieselsäure mehr für die Reaktion zur Verfügung steht. Dabei erfolgt die Gleich-

gewichtseinstellung zwischen dem Monomer und dem Dimer so schnell, dass beide Spezies mit dieser Methode nicht voneinander unterschieden werden können [191]. Die Umwandlung höher kondensierter Oligomere erfolgt langsamer, so dass die Konzentration des Molybdatosilicats mit der Reaktionszeit zunimmt. Die Messung sollte dann erfolgen, wenn die Sättigung erreicht ist, um einen möglichst geringen Messfehler zu produzieren. Standardisiert werden mindestens 5 min empfohlen [178], [190].

Die Einlagerung anderer Fremdatome, wie Phosphor, kann ebenfalls zur Bildung von gelb erscheinenden Heteropolyanionen führen, so dass ein eindeutiger Nachweis von Kieselsäure nicht möglich wäre. Aus etwaigen Verunreinigungen gebildete Dodecamolybdatephosphate werden hier in einem zweiten Reaktionsschritt durch die Reaktion mit Weinsäure wieder in Lösung gebracht. In einem letzten Reaktionsschritt wird das gelbgefärbte Molybdatosilicat mit Ascorbinsäure reduziert. Es bildet sich eine blau gefärbte Spezies, die nun einen eindeutigen Nachweis von Kieselsäure ermöglicht. Es wird keine Verdünnungsreihe der Probenlösung hergestellt, so dass bereits bei geringen Kieselsäure-Konzentrationen eine optische Überprüfung möglich ist. Dies ist für den Einsatz im Chemieunterricht einfacher zu handhaben.

Auf eine Blindprobe kann nicht verzichtet werden, da selbst dest. Wasser noch in geringem Maße lösliche Silica enthalten kann und ein eindeutiger Nachweis sonst nicht möglich ist (siehe Abb. 36). Aus diesem Grund sollten ausschließlich Geräte aus Kunststoff wie PE zur Versuchsdurchführung und zur Lagerung der Lösungen verwendet werden, um Wechselwirkung mit Glasoberflächen auszuschließen.

Hinweise: Es sollte eine ungefärbte Zahncreme ohne Sorbit verwendet werden, um die Farbumschläge nicht zu verfälschen. Sorbit kann die enthaltenen Silica bereits bei der Probennahme durch eine verfrühte Reduktion maskieren, so dass sie nicht mehr nachgewiesen werden könnte.

Der Versuch eignet sich gut für einen qualitativen Nachweis in Alltagsgegenständen. Neben dem vorgestellten Ansatz zur Zahncreme ist dies auch erfolgreich für das Gewürzpulver *Knoblauchsatz* der Firma *Ostmann* getestet worden. Das Gewürzpulver enthält Siliciumdioxid als Trennmittel zur Erleichterung der Streueigenschaften und daneben nur Natriumchlorid, bzw. Knoblauchsatz. Beides stört die Nachweisreaktion nicht.

Denkbar wären weitere Produkte wie Gesichtspuder und Tütensuppen. Diese sollten jeweils zuvor getestet werden, da auch alternative Fließhilfsmittel und Füllstoffe verwendet werden können, bzw. Wechselwirkungen mit anderen Inhaltsstoffen oder die Anwesenheit von Farbstoffen den Nachweis stören können.

5.3.2 Halb-Quantitativer Nachweis von löslichen Silica in Wasser

Geräte: fünf PE-Reagenzgläser für die Eichgerade und jeweils eines pro Wasserprobe, Reagenzglasgestell, Micropipette (1 ml) mit passenden Pipettenspitzen, PE-Messkolben (fünfmal 10 ml, viermal 100 ml), acht PE-Bechergläser (100 ml),

für die photometrische Konzentrationsbestimmung: Photometer (hier *Nanocolor 300 D* von *Macherey-Nagel*), fünf Photometer-Küvetten für die Eichgerade und jeweils eine pro Wasserprobe (bei zügigem Messen können Standard-Küvetten aus Glas verwendet werden), Smartphone mit einer App zur Bestimmung von RGB-Werten (für das Betriebssystem *iOS* wird die kostenlose App *Photometer*, für das Betriebssystem *Android* die kostenlose App *Colormeter Free* empfohlen.)

für die Konzentrationsbestimmung mit der RGB-App: Leuchtplatte, Stativmaterial mit Ring, Schnappdeckelgläschen oder Photometerküvetten

Chemikalien: dest. Wasser, Silicium-Standardlösung *Certipur* von *Merck* ($c = 1000 \text{ mg/l} \pm 10 \text{ mg/l}$); alternativ: Silicium-Standard-Lösung von *Aquafair* aus dem Aquarienhandel ($c = 1 \text{ mg/l} = 0,05 \text{ mg/l}$), Leitungswasser oder stilles Mineralwasser (bsp. *Selters Naturell Mineralwasser*, *Gerolsteiner Naturell Mineralwasser*, *Staatl. Fachingen Mineralwasser*), saure Natriummolybdat-Reagenzlösung: wässrige Natriummolybdat-Dihydrat-Lösung ($w = 8 \%$) und Schwefelsäure ($c = 1 \text{ mol/l}$) werden im Verhältnis 1 : 1 gemischt, wässrige Weinsäure-Lösung ($w = 20 \%$), wässrige Ascorbinsäure-Lösung ($w = 5 \%$)

Sicherheit: Schwefelsäure (Gefahr, GHS02, GHS07)

Versuchsdauer: 90 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

Herstellung der Eichlösungen und Probenvorbereitung

- Ausgehend von der Silicium-Standardlösung werden vier Eichlösungen (20 mg/l, 15 mg/l, 10 mg/l und 5 mg/l) über eine Verdünnungsreihe hergestellt: Für die erste Verdünnung wird 1 ml der Stammlösung in einen Messkolben (10 ml) überführt, bis zur Markierung aufgefüllt und homogenisiert (Verdünnung 1, $c = 100 \text{ mg/l}$). Diese Lösung wird analog im Verhältnis 1:10 verdünnt (Verdünnung 2, $c = 10 \text{ mg/l}$). Analog werden drei weitere Eichlösungen mit Konzentrationen von $c = 20 \text{ mg/l}$, 15 mg/l und 5 mg/l hergestellt.

- Es wird 1 ml eines zu untersuchenden Wassers in einen Messkolben (100 ml) pipettiert, mit dest. Wasser bis zur Markierung aufgefüllt und homogenisiert.

Nachweisreaktion und Messung mit dem Photometer

- Alle Eichlösungen werden nochmals um den Faktor 100 verdünnt, indem jeweils 1 ml in einen Messkolben (100 ml) überführt, bis zur Markierung mit dest. Wasser aufgefüllt und homogenisiert wird.
- Es wird ein Reagenzglasgestell mit fünf PE-Reagenzgläsern für die Blindprobe und die Eichlösungen und jeweils ein weiteres Reagenzglas pro Wasserprobe bereit gestellt.
- Für die Blindprobe wird 1 ml dest. Wasser in das erste Reagenzglas pipettiert. Von den Eichlösungen wird nachfolgend jeweils 1 ml in ein Reagenzglas pipettiert. Dies wird für die verdünnten Lösungen und die Wasserproben mit den weiteren Reagenzgläsern wiederholt.
- Nun werden jeweils 2 ml der sauren Natriummolybdat-Reagenzlösung zugegeben und vorsichtig geschüttelt.
- Nach einer Wartezeit von 2 min werden mit einer neuen Pipettenspitze 2 ml Weinsäure-Lösung hinzu gegeben und vorsichtig geschüttelt.
- Nach weiteren 2 min Wartezeit wird 1 ml Ascorbinsäure-Lösung mit der zugehörigen Pipettenspitze hinzu gegeben.
- Die Proben werden nach 10 min jeweils in Photometerküvetten überführt und gegen die Blindprobe bei einer Wellenlänge von 800 nm gemessen.
- Die gemessenen Extinktionswerte der Eichlösungen werden in einem Datenverarbeitungsprogramm gegen die Konzentration aufgetragen. Nach dem Erstellen einer Regressionsgerade ist es möglich die unbekannt Konzentrationen der Wasserproben zu ermitteln.

Nachweisreaktion und Messung mit einer RGB-App eines Smartphones

- Die Eichlösungen werden ohne einen weiteren Verdünnungsschritt eingesetzt.
- Die Nachweisreaktion erfolgt wie oben beschrieben.
- Mit Hilfe des Stativmaterials wird ein Stativring ca. 8,7 cm über einer liegenden Leuchtplatte angebracht. Das Smartphone wird mit aktivierter RGB-App auf dem Stativring platziert und während der Messung nach Möglichkeit nicht mehr bewegt.

- Die Proben werden jeweils in ein Schnappdeckelgläschen überführt, mittig auf der Leuchtplatte platziert und es wird mit dem der Smartphone-App ein Bild aufgenommen.
- Die angezeigten RGB-Werte werden in einer Tabelle notiert.

Entsorgung: Die Lösungen werden gesammelt und in einem Abfallbehälter für anorganische Schwermetalllösungen entsorgt.

Beobachtungen: Es werden ähnliche Ergebnisse wie im vorangegangenen Versuch 5.3.1 festgestellt.

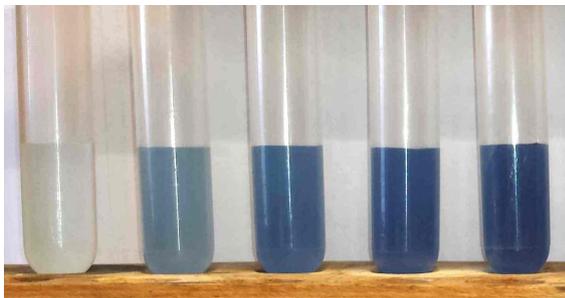


Abbildung 37: Blindwert und Proben der Eichlösungen mit steigender Konzentration nach erfolgreicher Reaktion (von links nach rechts)

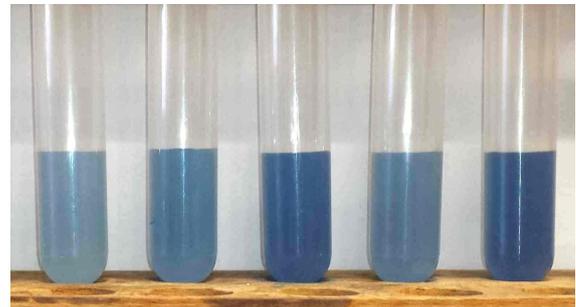


Abbildung 38: Probenlösung von Selters Naturell, Gerolsteiner Naturell, Staatl. Fachingen und zwei verschiedenen Leitungswasser (von links nach rechts)

Auswertung:

photometrische Konzentrationsbestimmung

Die Grundlage zur Auswertung in der Photometrie bildet das Lambert-Beer-Gesetz. So kann die Konzentration einer Analysensubstanz über die Intensität des transmittierten Lichts durch die Probenlösung nach folgender Formel bestimmt werden:

$$\lg\left(\frac{I_0}{I_T}\right) = \varepsilon \cdot c \cdot d \quad (14)$$

mit der Intensität des eingestrahltten Lichts (I_0), der Intensität des transmittierten Lichts (I_T), dem dekadischen Extinktionskoeffizienten ε , der Konzentration der gelösten Analysensubstanz c und der Schichtdicke d

Die Auswertung erfolgt nach mit Hilfe eines Datenverarbeitungsprogramms, wie *Excel* oder *Origin*, indem eine graphische Auftragung der gemessenen Extinktionswerte gegen die zugehörigen Kon-

zentrationen der Eichlösungen und anschließend eine Regressionsgerade erstellt wird. So lassen sich nachfolgend unter Berücksichtigung der Verdünnungsschritte die Konzentrationen der unbekannt Wasserproben bestimmen.

Konzentrationsbestimmung mit der RGB-App

Für eine halb-quantitative Untersuchung mit der Smartphone-App wird die Auswertung entsprechend adaptiert. Mit der Fotokamera des Smartphones wird ein Bild aufgenommen, aus welchem mit Hilfe der App die RGB-Werte (**R**ot **G**rün **B**lau) der Farbe extrahiert werden. Die RGB-Werte geben die Intensität der drei Grundfarben in einer additiven Mischfarbe wieder.

Die Extinktion einer Probenlösung lässt sich anschließend näherungsweise mit Formel 15 berechnen. Für die Anfangsintensität I_0 wird mit 255 der mittlere RGB-Wert einer weißen Fläche angenommen. Für die transmittierte Intensität I_T wird der Grauwert einer Probe verwendet, der sich aus dem Mittelwert der bestimmten RGB-Werte ergibt. Die Grundlage bei diesem Vorgehen ist die Annahme, dass eine Korrelation zwischen dem Grauwert und der Konzentration der färbenden Analysensubstanz vorliegt. So lässt sich näherungsweise die Extinktion berechnen und die Konzentrationen der Probenlösungen mit Hilfe einer Eichgerade bestimmen [179]. Hier wurde für die Fehlerrechnung mit der Fehlerfortpflanzung nach Gauß gearbeitet.

$$E = \lg\left(\frac{255}{RGB}\right) \quad (15)$$

Tabelle 21: *Vergleich der Konzentrationsbestimmung mittels Photometrie und RGB-App*

| Wasserprobe | Photometrie Kieselsäure (mg/l) | RGB-App <i>Colormeter Free</i> Kieselsäure (mg/l) | RGB-App <i>Photometer</i> Kieselsäure (mg/l) |
|-----------------------|-----------------------------------|--|---|
| Selters Naturell | 3,8 ± 0,5 | 3,2 ± 3 | 2,8 ± 1 |
| Gerolsteiner Naturell | 6,8 ± 0,4 | 5,8 ± 0,3 | 6,0 ± 3 |
| Staatl. Fachingen | 12,2 ± 0,6 | 12,0 ± 5 | 12,6 ± 3 |
| Leitungswasser 1 | 7,0 ± 0,6 | 4,6 ± 1 | 4,9 ± 1 |
| Leitungswasser 2 | 14,1 ± 0,8 | 14, 6 ± 2 | 15,7 ± 2 |

In Tabelle 21 sind exemplarisch gemittelte Messwerte aus jeweils drei Messungen für beide Methoden aufgeführt. Für die Konzentrationsbestimmung mit einer Smartphone-App ergibt sich ein signifikant größerer Fehler als für die photometrische Bestimmung. Dies ist hauptsächlich auf die schnell schwankenden RGB-Werte und den gemittelten Grauwert zurückzuführen. Die Diskrepanzen zwischen den beiden Apps und zwischen Ergebnissen der gleichen App auf verschiedenen Geräten zeigt den großen Einfluss der verbauten Kamera. Je nach verwendetem Gerät

sind schwankende Messwerte zu erwarten, selbst wenn die gleiche App verwendet wird. Die Konzentrationsbestimmung mit Hilfe des Smartphones kann daher nur als halb-quantitative Methode herangezogen werden. Dies ist für den Chemieunterricht bei einer geeigneten Auswahl der Wasserproben aber dennoch gut einsetzbar. Die Siliciumdioxid-Konzentrationen der Wasserproben sollten daher sich deutlich voneinander unterscheiden, was bei den vorgeschlagenen Mineralwassern der Fall ist.

Die Siliciumdioxid-Konzentration wird oft nicht auf dem Etikett einer Mineralwasser-Flasche angegeben. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass der menschliche Körper das Element Silicium nur in Spuren benötigt. Bei der Angabe der Konzentration ist die zugrundeliegende Definition oft uneinheitlich, da einige Hersteller nur die monomere Kieselsäure, andere Hersteller auch höher kondensierte Kieselsäuren berücksichtigen. Wenn ein anderes Mineral- oder Leitungswasser im Versuch verwendet werden soll, wird ein Testdurchlauf zur Festlegung des Messbereichs empfohlen.

5.3.3 Thixotropie von Zahncreme

Geräte: Mörser und Pistill, drei Spatel, Kunststoffmesspipette (2 ml), Wägeschälchen, Einmalhandschuhe, zwei Holzbrettchen, Laborwaage

Chemikalien: dest. Wasser, Glycerin, Sorbitol, hydrophiles Siliciumdioxid

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 20 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung: *Überprüfung der thixotropen Eigenschaften*

- Es werden 3 g Glycerin und 6 g Sorbitol in einen Mörser eingewogen.
- Anschließend werden 2 ml dest. Wasser tropfenweise zugegeben und die Mischung mit einem Pistill gut verrieben.
- Jetzt werden 1,8 g Siliciumdioxid abgewogen und portionsweise gut mit dem Pistill eingerieben, bis die Paste die Konsistenz einer handelsüblichen Zahncreme erreicht hat.
- Man lässt die Zahncreme für 5 Minuten ruhen, dreht den Mörser auf den Kopf und prüft das Fließverhalten.

- Die Zahncreme wird nun erneut verrührt, anschließend wird der Mörser sofort ohne Ruhezeit umgedreht und wie oben die Fließfähigkeit untersucht.

Knetbare Masse durch Erhöhung der Konzentration an Siliciumdioxid

- Es werden zusätzlich 0,6 g Siliciumdioxid (in zwei Portionen) mit dem Pistill in die Masse eingearbeitet. Dabei sollte man mit einem Spatel die Masse, die sich im Mörser verteilt, immer wieder zurück schieben.
- Es entsteht eine knetbare Masse, aus der man beispielsweise eine Kugel oder Rolle formen kann. Diese lässt man für ca. 15 min ruhen und prüft die Konsistenz.
- Übt man jetzt Druck auf die Masse aus, indem man sie zwischen den Händen (evt. Einmalhandschuhe anziehen) oder zwischen zwei Holzbrettchen zu einer Kugel oder Rolle formt, wird sie wieder weich und elastisch.
- Dieses Verhalten ist umso stärker ausgeprägt, je länger die Ruhephase gewählt wird. Es wird empfohlen die Zahncreme über Nacht zu lagern.

Entsorgung: Die Zahncreme kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: In Versuchsteil 1 nimmt die Viskosität mit der Zugabe von Siliciumdioxid nach und nach zu. Nach 5 min Wartezeit lässt sich der Mörser umdrehen, ohne dass die Zahncreme sofort heraus tropft. Nach einem anschließenden Verreiben wird die Zahncreme wieder so flüssig, dass sie beim sofortigen Anheben des Pistills wieder in den Mörser zurücktropft.

Der Effekt in Versuchsteil 2 wird umso deutlicher, je länger man die Masse ruhen lässt (beispielsweise über Nacht). Die Masse wird hart und spröde.

Auswertung: Die Zahncreme zeigt nach dem Zusatz von Siliciumdioxid die Eigenschaften einer Nicht-Newtonsche-Flüssigkeit, welche unter Krafteinwirkung flüssig ist und nach einer Ruhezeit wieder erstarrt. Diese Fließeigenschaft bezeichnet man als thixotrop. Die Zahncreme kann daher nur bei einer Krafteinwirkung aus die Tube heraus laufen, tritt aber nicht bereits nach dem Öffnen von alleine aus der Verpackung aus.

Auf der Oberfläche der Siliciumdioxid-Partikel bilden sich Wasserstoff-Brücken-Bindungen zwischen einzelnen Partikeln und anderen polaren Bestandteilen aus. Dies ist nur möglich, wenn sich die Mischung im Ruhezustand befindet. Unter Krafteinwirkung, wie beim Drücken auf die Zahncreme-Tube, bewegen sich die Partikel relativ zueinander. Die Wasserstoff-Brücken-Bind-

ungen werden gelöst und die Bewegungsfreiheit der Partikel wird erhöht. Erst jetzt ist die Zahncreme fließfähig genug, um aus der Tube zu laufen.

Zur eindeutigen Erklärung der Beobachtungen sollten die Wechselwirkungen auf der molekularen Ebene miteinbezogen werden. Dies ist erst in der Sekundarstufe II möglich. Das experimentelle Vorgehen ist aufgrund der Durchführung und des geringen Gefahrenpotentials bereits für die Sekundarstufe I geeignet. Entsprechend sollte die didaktische Elementarisierung an den Wissensstand der Schüler angepasst werden.

Hinweise: Für Versuchsteil 2 wird die Lagerung in einem verschließbaren Gefäß empfohlen, so dass die Zahncreme nicht austrocknen kann.

5.3.4 Putzkörper in Zahncreme

Geräte: Zahnbürste (soft), Aluminiumfolie (alternativ: Overhead-Folien, CDs), Becherglas (150 ml), Schere, Küchenpapier, Folienschreiber, Kunststoffpinzette, (ggf. Mikroskop)

Chemikalien: Salzsäure ($c = 1 \text{ mol/l}$), Colgate[®] Sensation White Zahncreme, Ajona[®] Stomatum-Medizinisches Zahncremekonzentrat (im Drogeriemarkt erhältlich), Wasser

Sicherheit: Salzsäure (Achtung, GHS05)

Versuchsdauer: 15 min pro Schleifkörper (Schülerversuch möglich)

Durchführung: *Vergleich der Schleifwirkung*

- Auf ein Stück Aluminiumfolie (etwa $5 \times 5 \text{ cm}$ groß) wird eine etwa erbsengroße Menge einer Zahncreme gegeben und mit der Zahnbürste unter mäßigem Druck in kreisförmigen und Längsbewegungen für ca. 1 Min. verrieben. Zur besseren Verteilung kann ein kleiner Tropfen Spülmittel hinzugegeben werden.
- Die Folie wird unter fließendem Wasser vorsichtig abgespült und mit Küchenrolle trocken getupft.
- Die Folien können anschließend mit bloßem Auge (ggf. ergänzend auch mit Hilfe eines Stereomikroskops bei 20-30 facher Vergrößerung) verglichen werden.

Vergleich der Reaktionsfähigkeit von Aluminiumfolie

- Der Versuch wird wiederholt und die Folien werden nach dem Spülvorgang mit Wasser möglichst schnell in ein zur Hälfte mit Salzsäure gefülltes Becherglas gelegt, sodass ein Stück der abgeriebenen Fläche komplett in die Säure eintaucht.
- Als Blindprobe wird ein Stück unbehandelte Aluminiumfolie verwendet.

Entsorgung: Die Folien und Pasten können in den Hausmüll, die Salzsäure neutralisiert und in den Abfluss entsorgt werden.

Beobachtungen: Mit bloßem Auge fallen bereits Unterschiede beim Abrieb der Oberflächen auf. Der Abrieb bei der Verwendung von *Colgate[®] Sensation White Zahncreme* ist deutlich größer als bei *Ajona[®] Stomaticum*. Die abgeriebene Fläche verliert ihren metallischen Glanz und erscheint in einem dunkleren Grau (siehe Abb. 39).



Abbildung 39: unbehandelte Aluminiumfolie als Blindprobe, Behandlung mit der Zahncreme *Ajona[®] Stomaticum*, Behandlung mit der Zahncreme *Colgate[®] Sensation White Zahncreme* (von links nach rechts)

Auswertung: Die Zahncreme *Colgate[®] Sensation White Zahncreme* hat einen RDA-Wert von 114. Es ist Siliciumdioxid als Putzkörper vorhanden. Die Zahncreme *Ajona[®] Stomaticum* enthält die Putzkörper Calciumcarbonat und Natriumhydrogencarbonat und weist einen RDA-Wert von 30 auf [192], [193]. Die beiden Zahncremes unterscheiden sich erheblich in der Abriebwirkung ihrer Putzkörper. Man kann davon ausgehen, dass sich die Putzkörper in ihrer Korngröße unterscheiden und daher einen verschieden starken Abrieb produzieren. Auf diesen Aspekt kann in einem nachfolgenden Modellversuch genauer eingegangen werden.

Hinweise: Es können selbstverständlich andere Zahncremes eingesetzt werden, aber es sollte

darauf geachtet werden, dass sie sich in ihrem RDA-Wert deutlich voneinander unterscheiden. Es wird empfohlen dies im Vorfeld zu testen.

5.3.5 Modellversuch zu dem Zusammenhang zwischen Korngröße von Putzkörpern und Abrieb

Geräte: feines Schleifpapier (600er Körnung), grobes Schleifpapier (40er Körnung), zwei zueinander passende Gukoringe (Innendurchmesser bsp. 2,7 cm und 3,9 cm), Gummibecher, Holzstab, Polieraufsatz für Dremel (bzw. beklebbare Fläche), Akkuschauber, Laborwaage, Glasstab, Becherglas (100 ml), zwei Demonstrationsreagenzgläser, passender Reagenzglasständer, Pinsel, Spatel, Messzylinder (50 ml), Trockenschrank, Ceranplatte, Laborhebebühne, Stativmaterial, Schere, Klebstoff

Chemikalien: Modellgips, Kupfer(II)-sulfat-Pentahydrat, konz. Ammoniaklösung (25 %)

Sicherheit: Kupfer(II)-sulfat-Pentahydrat (Gefahr, GHS05, GHS07, GHS09), konz. Ammoniaklösung (Gefahr, GHS05, GHS07, GHS09)

Versuchsdauer: 15 min pro Schleifkörper (Schülerversuch möglich)



Abbildung 40: Herstellung von Gips-Rohlingen für den maschinellen Abrieb: Gukoring als Gussform, Darstellung der aneinander angepassten Gukoringe, Gipsrohling in Form eines Kegelstumpfs, Gips-Rohling im großen Gukoring für den Versuchsaufbau (von links nach rechts)

Durchführung: Herstellung der Gipsrohlinge

- Für drei Gips-Rohlinge werden 32 g Modellgips mit 15 g Kupfer(II)-sulfat-Pentahydrat in einem Gummibecher gründlich vermischt und mit 30 ml Wasser versetzt.
- Die Gukoringe werden auf eine Ceranplatte gestellt (siehe Abbildung 40). Anschließend wird die Masse solange gründlich gerührt, bis sie leicht anzusteifen beginnt und wird dann schnell

bis etwa 0,5 cm unter die Oberkante in die drei entsprechenden Gukoringe gegossen.

- Nach der Lagerung über Nacht werden die Rohlinge aus den Gukoringen gedrückt und für etwa 3 h bei 80 °C im Trockenschrank getrocknet.



Abbildung 41: Versuchsaufbau mit Akkuschrauber, genauerer Blick auf den Schleifaufsatz und auf den Teil des Aufbaus auf der Laborwaage (von links nach rechts)

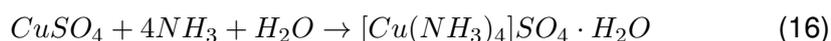
Erzeugung und Nachweis des Abriebs

- Es wird eine Apparatur wie in Abb. 41, bestehend aus einem mit Stativmaterial fixierten Akkuschrauber, Laborhebebühne und Laborwaage, aufgebaut. Es wird ein Polieraufsatz für einen Dremel verwendet. Die Fläche des Aufsatzes wird mit passend zugeschnittenem Schleifpapier beklebt.
- Die Rohlinge werden in den schwarzen Gukoringen versenkt, auf der Laborwaage platziert und mit der Laborhebebühne unter den mit dem entsprechenden Schleifpapier beklebten Polieraufsatz gefahren. Die Anpresskraft wird auf ca. 540 g eingestellt, unterliegt aber dennoch gewissen Schwankungen.
- Unter voller Umdrehungszahl wird für 1 min der Gipsrohling bearbeitet.
- Der Abrieb wird sorgfältig in ein Becherglas überführt, mit 20 ml Wasser versetzt und ordentlich mit einem Glasstab verrührt. Am Schleifpapier anhaftende Reste können mit einem Pinsel entfernt und in die Lösung gegeben werden.
- Die Lösung wird samt Bodensatz in ein Reagenzglas geschüttet und mit 20 ml konz. Ammoniaklösung versetzt. Es wird solange Ammoniaklösung zugegeben, bis der Bodensatz in Lösung gegangen ist und nur noch Gips zurückbleibt.
- Der Versuch wird mit der zweiten Sorte Schleifpapier wiederholt.

Entsorgung: Die Gips-Rohlinge mit Kupfersulfat können in den Feststoffabfall, die Tetraamminkupfer(II)-sulfat-Lösungen können in den Abfallbehälter für anorganische Schwermetallabfälle entsorgt werden.

Beobachtungen: Bereits beim Versetzen mit Wasser fällt auf, dass die Kupfersulfat-Lösung des Abriebs des groben Schleifpapiers intensiver gefärbt ist. Nach Zusatz der Ammoniaklösung bildet sich der dunkelblaue Tetraamminkupfer(II)-Komplex und die Intensität der Lösung für das grobe Schleifpapier ist wesentlich stärker.

Auswertung: Kupfer(II)-sulfat reagiert in wässriger Lösung bei der Zugabe von Ammoniak im Überschuss gemäß nachfolgender Reaktionsgleichung zu Tetraamminkupfer(II)-sulfat. Der Komplex färbt die Lösung dunkelblau und dient so als eindeutiger Nachweis von Kupfer-Ionen [7, S.1336].



Das Kupfer(II)-sulfat wird gemeinsam mit Gipsresten von dem bearbeiteten Rohling abgetragen und löst sich in Wasser. Der stärkere Abrieb des groben Schleifpapiers bedingt einen größeren Substanzabrieb vom Gips-Rohling. Dementsprechend befindet sich eine größere Stoffmenge an Kupfersulfat im Abrieb, die beim Versetzen mit konz. Ammoniaklösung den intensiv blau erscheinenden Komplex Tetraamminkupfer(II)sulfat bilden kann.

Hinweise: Für eine quantitative Analyse ist die Methode leider nicht geeignet, da zu große Unterschiede im Abrieb bei Wiederholungen mit gleicher Versuchsanordnung festzustellen sind. Es ist aber eine halb-quantitative Untersuchung möglich, wenn sich die Putzkörper ausreichend in ihrer Korngröße, und damit in ihrer Abriebsfähigkeit, unterscheiden. Dieses Vorgehen kann als Modell-experiment zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen Korngröße und Abriebsfähigkeit dienen.

Alternativ kann die Masse des Gipskörpers vor und nach dem Abriebvorgang auf einer empfindlichen Analysenwaage bestimmt werden, so dass der Rückschluss auf den Abrieb über eine gravimetrische Bestimmung ermöglicht wird. In Abhängigkeit des Leistungsstandes einer Lerngruppe ist abzuwägen, welche Variante bevorzugt werden soll.



Abbildung 42: Probenlösung mit dem Abrieb des feinkörnigen und des grobkörnigen Schleifpapiers (von li nach re)

5.3.6 Wasseraufnahme von Zement in Anwesenheit von Siliciumdioxid

Geräte: vier Wägeschälchen (bsp. Aluminiumschälchen), Gipsbecher (alternativ: abgeschnittene PET-Flasche), Holzspatel, zwei Chemikalienlöffel, Spatel, Laborwaage, Messzylinder (10 ml)

Chemikalien: Zement (bsp. *Baumit Zement CEM I 32,5 R* oder *Blitz-Zement-Mörtel PCI Polyfix[®] 5 Min.*, erhältlich bei *Hornbach*), Sand, destilliertes Wasser, pyrogenes, hydrophiles Siliciumdioxid

Sicherheit: Calciumhydroxid (Gefahr, GHS05, GHS07) im Zementmehl

Versuchsdauer: 15 min Durchführung + 24 h Wartezeit (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 20 g Zement und 60 g Sand abgewogen und in dem Gipsbecher gut miteinander vermischt.
- In vier Wägeschälchen werden jeweils 20 g des Zement-/Sand-Gemenges gefüllt.
- Anschließend werden Wasser und Siliciumdioxid in vier verschiedenen Mengenverhältnissen (siehe Tabelle 22) zu den Gemischen in den vier Wägeschälchen zu gegeben und gut verrührt.
- Anschließend beobachtet man die Mischungen für 5 Minuten und notiert die Konsistenz, bzw. überstehendes Wasser. Nun lässt man die Mischungen über Nacht aushärten und vergleicht erneut.

Tabelle 22: Mengenverhältnisse zum Anmischen der vier Zement-Siliciumdioxid-Mischungen mit unterschiedlichen Wasservolumina

| Probenbezeichnung | Additive |
|-------------------|--|
| Schälchen 1 | 6 ml dest. Wasser |
| Schälchen 2 | 5 ml dest. Wasser |
| Schälchen 3 | 0,1 g Siliciumdioxid und 6 ml dest. Wasser |
| Schälchen 4 | 0,1 g Siliciumdioxid und 5 ml dest. Wasser |

Entsorgung: Der ausgehärtete Zement kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: In Schälchen 1 steht nach der Zugabe von Wasser deutlich Wasser über dem Zementleim; die Probe weist nach dem Aushärten auffällig viele Luftblasen auf. Die Zementprobe aus Schälchen 2 ist homogen und hochviskos, lässt sich aber gut verarbeiten und bleibt fließfähig. Für die Probe aus Schälchen 3 gilt Ähnliches. Die Probe aus Schälchen 4 lässt sich schlecht bis gar nicht umrühren und zeigt nach dem Aushärten eine sehr raue Oberfläche.



Abbildung 43: unbehandelte Zement (links), Zement mit pyrogener Kieselsäure (1 Gew.-%) (rechts)

Auswertung: In Probe 1 wird zu viel Wasser eingerührt; es bleibt ein deutlicher Wasserüberstand zurück und der Zementleim wird zu flüssig. Die Probe aus Schälchen 2 hat ein gutes Wasser-/Zement-Verhältnis, wenn ohne Siliciumdioxid gearbeitet wird. In Anwesenheit von Siliciumdioxid wird mehr Wasser verbraucht. Aus diesem Grund wird die Probe aus Schälchen 4 zu viskos und lässt sich nur schlecht verarbeiten. Bei der Probe aus Schälchen 3 mit einem Zusatz von Siliciumdioxid wird daher mehr Wasser verwendet und man erhält ebenfalls einen fließfähigen Zementleim wie in Schälchen 2.

5.3.7 Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit von Zement

Geräte: Messzylinder (250 ml), Stoppuhr, zwei große Aluminiumschalen (ca. 30 x 30 cm), drei Chemikalienlöffel, Spatel, zwei große Gipsbecher (alternativ: abgeschnittene PET-Flasche), Eimer, zwei Holzspatel, Temperaturmessfühler, Teclubrenner, Dreifuß, Feuerzeug, Folienstift (Eding o.ä.), Laborwaage

Chemikalien: Zement (bsp. *Blitz-Zement-Mörtel PCI Polyfix[®] 5 Min.*, erhältlich bei *Hornbach*), Sand, destilliertes Wasser, pyrogenes, hydrophiles Siliciumdioxid, Silicat-Katzenstreu (bsp. von der Firma *MultiFit[®]*)

Sicherheit: Calciumhydroxid (Gefahr, GHS05, GHS07) im Zementmehl
Der Temperaturfühler ist nur bis zu einer maximalen Temperatur einsetzbar und sollte keinen hö-

heren Temperaturen ausgesetzt werden. Dies ist in der Bedienungsanleitung nachzulesen. Für den hier verwendeten Messfühler liegt dieser Maximalwert bei 600 °C. Das Kabel des Messfühlers darf nicht zu nahe an die Brennerflamme und an heiße Gegenstände geraten.

Versuchsdauer: 20 min Vorbereitungszeit + 1 Woche Wartezeit + 20 min Durchführung (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden 250 g Zement und 750 g Sand abgewogen und in einem Eimer gut miteinander vermengt.
- Der Ansatz wird geteilt und es werden jeweils 500 g in einen Gipsbecher gefüllt.
- In einen der beiden Gipsbecher (Becher 1) werden zusätzlich 60 g Silicat-Katzenstreu und 1,5 g Siliciumdioxid zugegeben und gut vermischt. (Für Becher 1 wird gemäß des Vorversuchs 5.3.6 entsprechend mehr Wasser benötigt.)
- In Becher 1 werden 162 ml dest. Wasser, in Becher 2 werden 120 ml dest. Wasser zugegeben.
- Es wird verrührt, bis sich jeweils eine homogene Mischung gebildet hat. Jeder Ansatz wird in eine Aluminiumschale überführt und 1 Woche zum Aushärten weggestellt.
- Jetzt werden die Zementplatten aus der Form genommen und es wird jeweils in der Mitte mit einem Folienschreiber ein Messpunkt mit einem Kreuzchen markiert. An diesem Punkt wird während des Erwärmens die Temperatur gemessen.
- Die Platten werden nacheinander auf einen Dreifuß gelegt und von unten mit einem Teclubrenner erhitzt. Nach 1, 2, 3, 5, 10, 15, und 20 min wird die Temperatur auf der Oberseite der Platte, direkt über der Flamme, gemessen. Die Messwerte werden in die Tabelle eingetragen und es werden beide Messreihen zum Vergleich graphisch aufgetragen.

Entsorgung: Der erstarrte Zement kann in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Zementplatte mit einem Zusatz von Siliciumdioxid und Silicat-Katzenstreu erwärmt sich langsamer und auch insgesamt weniger stark als die Zementplatte ohne Zusätze.

Auswertung: Bei dem verwendeten Silicat-Katzenstreu handelt es sich um ein Hydrogel, das die Wärmeisolierung des Zements verstärkt. Ein Hydrogel ist ein hochporöses Material, das in

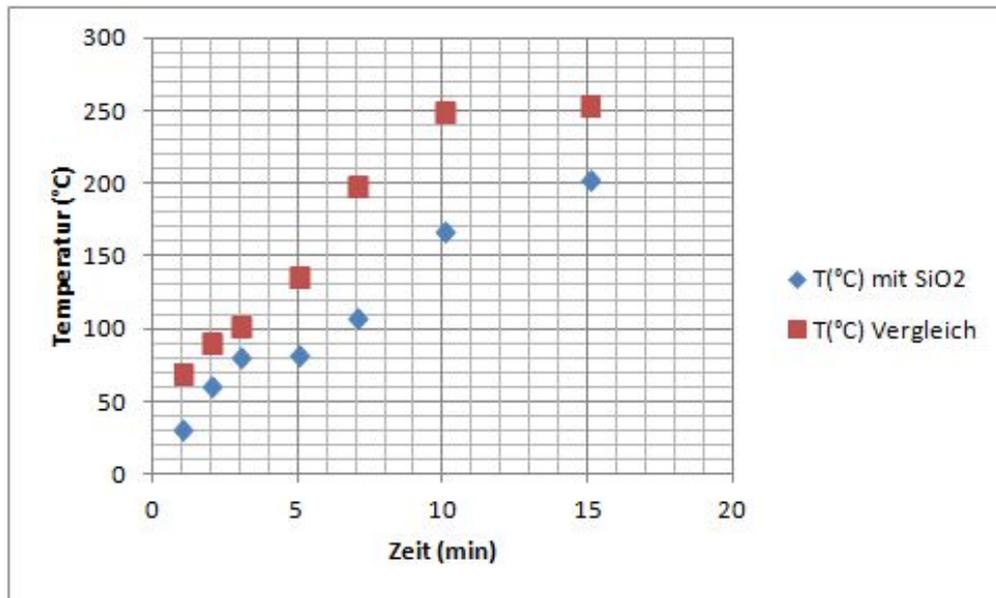


Abbildung 44: Temperaturverlauf beim Erwärmen der Vergleichsprobe (rot) und der Zementprobe mit Kieselsäure und gemörsertem Silicat-Katzenstreu (blau)

seinem Porengefüge Luft enthält und so die Wärmeleitfähigkeit des Zements herabsetzt.

Hinweise: Die genauen Wassermengen für beide Ansätze sollten im Vorfeld getestet werden, da diese sehr empfindlich von der genauen Zusammensetzung von verwendetem Zement und Sand abhängen (siehe Versuch 5.3.6).

5.3.8 Gelpunktsbestimmung mit einem Blasviskosimeter

Information: Unter Säurekatalyse wässriger Lösungen von Natronwasserglas kommt es zur Ausbildung eines Gels. Dies geht mit der Erhöhung der Viskosität einher. Der Zeitpunkt der Bildung des Gels wird als Gelpunkt bezeichnet. Durch die Variation der eingesetzten Volumina von Natronwasserglas-Lösung und Säure lässt sich der Gelpunkt verschieben. Mit diesem Versuch können die Gelpunkte einer Konzentrationsreihe bestimmt und die Auswirkungen der unterschiedlichen Zusammensetzungen auf den Gelpunkt beobachtet werden.

Es wird vorgeschlagen dieses Experiment als Interaktionsbox nach der Methode des selbstorganisierten Lernens in den Unterricht einzubinden. Die SchülerInnen bekommen alle notwendigen Chemikalien und Geräte neben Informationen zur Versuchsdurchführung zur Verfügung gestellt. Anhand einer problemorientierten Aufgabenstellung sollen sie anschließend selbstständig meh-

rere Versuchsreihen mit dem Ziel, die optimalen Bedingungen für die Gelbildung zu erarbeiten, planen und durchführen.

Geräte: sechs Reagenzgläser, Reagenzglasständer, sechs Gummistopfen, Messzylinder (25 ml), zwei Messpipetten (5 ml), Stoppuhr, Folienschreiber, Becherglas (50 ml) zum Ausspülen der Pipette

Chemikalien: dest. Wasser, Natronwasserglas, Essigsäure ($c = 2 \text{ mol/l}$)

Sicherheit: Essigsäure (Achtung, GHS07), Natronwasserglas (Gefahr, GHS05, GHS07)

Versuchsdauer: 45 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Es werden drei Messreihen mit jeweils zwei Proben durchgeführt, bei der immer die Konzentration eines Reagenz verändert wird.
- Die Reagenzgläser 1 bis 6 werden beschriftet und wie in der Tabelle angegeben mit dest. Wasser gefüllt.
- Anschließend werden nach den Angaben in der Tabelle die entsprechenden Mengen Natronwasserglas mit einer Pipette zugegeben. Die Pipette muss sofort im Anschluss mit Wasser ausgespült werden, da sie sonst verstopft!
- Nun wird zu Reagenzglas 1 die entsprechende Menge Essigsäure hinzupipettiert, das Reagenzglas schnell mit dem Gummistopfen verschlossen und durch mehrfaches Hin- und Herdrehen durchmischt. Bei der Zugabe der Säure wird die Stoppuhr gestartet. Es wird die Zeit gemessen, bis sich die Luftblasen im Reagenzglas nicht mehr bewegen und notiert.
- Dies wiederholt man für die übrigen Reagenzgläser.

Entsorgung: Die Gele können in den Hausmüll entsorgt werden.

Beobachtungen: Die Luftblase bewegt sich mit fortschreitender Zeit immer langsamer und erstarrt schließlich im sich bildenden Gel. Mit abnehmender Menge von Natronwasserglas-Lösung und Essigsäure verlängert sich die Gelierzeit, bzw. verschiebt sich der Gelpunkt.

Tabelle 23: *Mögliche Volumenverhältnisse bei der Variation der Gelbildung*

| Ansatz (ml) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | Zeit (sec) |
|------------------|----|----|----|----|----|----|------------|
| dest. Wasser | 14 | 15 | 14 | 15 | 14 | 16 | |
| Natronwasserglas | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | |
| Essigsäure | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | |
| Gesamtvolumen | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | |

Auswertung: Durch die Zusammensetzung des Sol-Gel-Systems lässt sich die Gelierzeit variieren, bzw. der Gelpunkt verschieben. Die Versuchsreihe 2 verdeutlicht, dass die Menge an Säure ausschlaggebend für die Geschwindigkeit der Gelbildung ist.

Hinweise: -

5.4 Silicium und Glas

5.4.1 Basisches Ätzen von Silicium

Geräte: Magnetrührer mit Heizplatte, Rührkern, zwei Bechergläser (150 ml, 250 ml), kleines Kunststoffgefäß (passend für das 150-ml-Becherglas), Kunststoffpinzette, Thermometer, Mikroskop (bsp. DigiMicro Lab5.0), Schmirgelpapier 1000, Reagenzglasklammer (alternativ: Wäscheklammer), Siedesteine, Haushaltspapier

Chemikalien: Bruchstücke von Reinsilicium oder Solarzellen (polykristallin und monokristallin), gesättigte Kaliumhydroxid-Lösung (ca. 112 g/ 100 ml)

Sicherheit: Kaliumhydroxid-Lösung, gesättigt (Gefahr, GHS05, GHS07)

Versuchsdauer: 40 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Das kleine Kunststoffgefäß wird mit einer Klammer innen im Becherglas (150 ml) befestigt, so dass es nicht auf dem Boden aufsitzt.
- Es wird gerade so viel Wasser in das Becherglas gefüllt, dass das Kunststoffgefäß mindestens zu zwei Dritteln in das Wasser eintaucht.
- Das Kunststoffgefäß selbst wird höchstens halbvoll mit gesättigter Kaliumhydroxid-Lösung gefüllt und das Wasser im Becherglas zum Sieden erhitzt. Es wird der Füllstand zu Versuchsbeginn markiert und ggf. während des Versuchs verdampfende Flüssigkeit mit dest. Wasser aufgefüllt.
- Von dem Solarzellenbruchstück schleift man die blaue Schutzschicht mit feinem Schmirgelpapier ab. Reinsilicium kann ohne einen Schleifvorgang verwendet werden. Beides kann vor dem Beginn des Ätzvorgangs unter dem Mikroskop betrachtet werden.

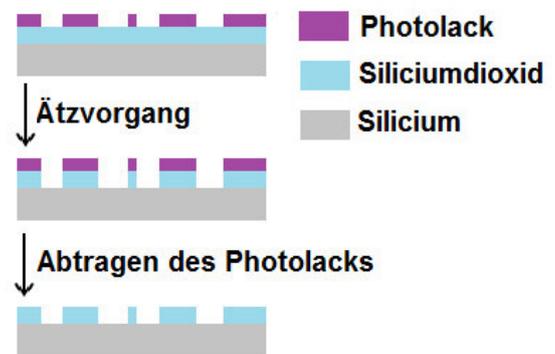


Abbildung 45: Schematische Darstellung der Bearbeitungsschritte eines Silicium-Wafers bei einem Ätzvorgang nach [194, S.22]

- Wenn die Temperatur der Kaliumhydroxid-Lösung etwa 80°C erreicht hat, legt man die Probe in die heiße Lösung und belässt sie dort für 30 min.
- Die Probe wird dann **vorsichtig** mit der Pinzette entnommen, in ein Becherglas mit Leitungswasser getaucht und für 2 min dort belassen. Anschließend wird es gründlich abgespült; dabei sollte der Strahl aus der Spritzflasche nicht direkt auf das Bruchstück gerichtet werden, um die feinen aufgebrauchten Strukturen nicht zu zerstören. Das Bruchstück wird nun **vorsichtig** mit Haushaltspapier trocken getupft.
- Es kann jetzt erneut unter dem Mikroskop oder auch mit dem bloßen Auge betrachtet werden.

Entsorgung: Die Kaliumhydroxid-Lösung kann neutralisiert und in den Ausguss entsorgt werden.

Beobachtungen: Bei dem Einkristall erscheint die Oberfläche unter der blauen Schutzschicht homogen. Nach dem Abschleifen erhält man eine silber-graue Oberfläche, die unter dem Mikroskop betrachtet sehr viele gleichmäßig verteilte schwarze Flecken enthält. Nach dem Ätzen erkennt man unter dem Mikroskop diese Flecken vertieft wieder. Zusätzlich sind Ablagerungen einer farblosen Substanz erkennbar. Dies ist bereits mit dem bloßen Auge erkennbar, wie in Abb. 46 gezeigt.

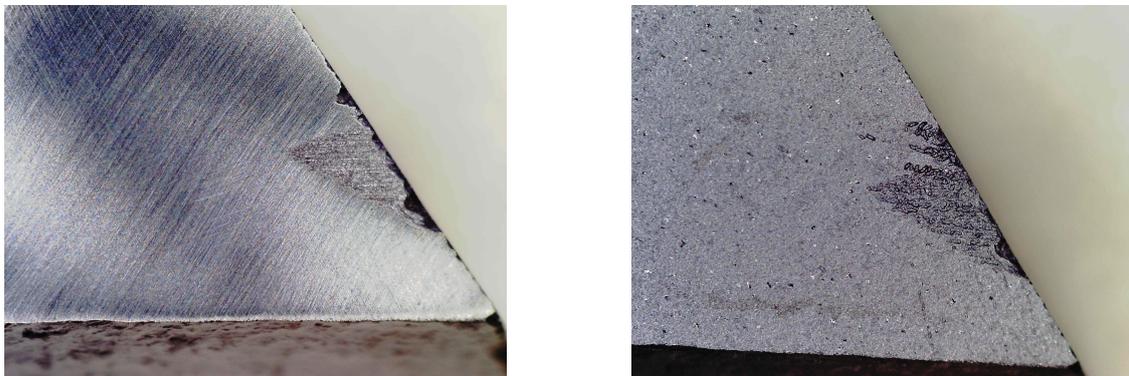


Abbildung 46: *unbehandeltes Bruchstück eines Silicium-Einkristalls, nach 30 min in 80° C warmer Natriumhydroxid-Lösung (rechts)*

Bei dem Polykristall ist vor der Behandlung eine mosaikartige Maserung, die Anordnung der Domänen mit verschiedener Ausrichtung der Kristallebenen, durch die blaue Schutzschicht aus Siliciumnitrid hindurch erkennbar. Nach dem Abschleifen der Schutzschicht ist diese Maserung nicht mehr zu erkennen und man erhält eine einheitliche grau-silberne Oberfläche. Nach dem Ätzenvorgang ist wieder die mosaikartige Maserung sichtbar (siehe Abb. 47 und 48).



Abbildung 47: unbehandeltes Bruchstück einer polykristallinen Solarzelle (links), nach 5 min in 80° C warmer Natriumhydroxid-Lösung (rechts)

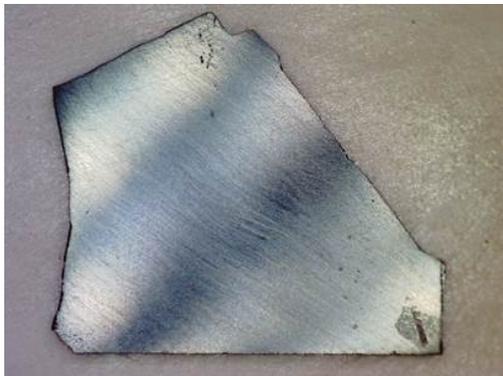
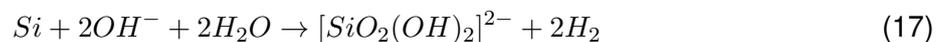


Abbildung 48: nach dem Abschleifen (links), nach 30 min in 80° C warmer Natriumhydroxid-Lösung (rechts)

Sowohl bei poly- als auch bei einkristallinem Silicium ist bei Kontakt mit der heißen Kaliumhydroxid-Lösung eine deutliche Gasentwicklung an den freigeschliffenen Stellen zu erkennen.

Auswertung: Die Siliciumoberfläche wird von der Kaliumhydroxid-Lösung angegriffen und abgetragen. Unter diesen Bedingungen läuft der Ätzvorgang nach folgender Bruttogesamtgleichung ab:



Bei einem Bruchstück aus einer Solarzelle mit Schutzschicht aus Siliciumnitrid kann wahlweise bei einer kurzen Verweildauer in der Reaktionslösung nur diese Schutzschicht entfernt werden (siehe Abb. 47). Nach dem Schleifen und einem erneuten, längeren Ätzvorgang wird die Anordnung verschiedener Bereiche mit unterschiedlicher kristalliner Ausrichtung wieder sichtbar, so dass sofort

ein Erfolg des Experiments nachvollzogen werden kann (siehe Abb. 48). Es wird Material in einer entsprechenden Schichtdicke abgetragen.

Bei einem Einkristall können die Verätzungen an einer raueren Oberfläche, bzw. an der Entstehung oder der Zunahme von Vertiefungen erkannt werden (siehe Abb. 46). Da man bei einkristal-
linem Silicium nur in Richtung einer Gitterebene auf die Oberfläche sieht, kann man abgeschiede-
nes Siliciumdioxid erkennen. Es entsteht als ein mögliches Primärprodukt der Ätzreaktion.

Hinweise: Ausschussware oder Bruchstücke von Solarzellen lassen sich über Internet-Quellen beziehen. Hier sind auch die Spitzen von Silicium-Einkristallen aus der Wafer-Herstellung günstig erhältlich, da diese industriell nicht verwertbar sind. Zur Bearbeitung ist eine Gesteinssäge o.ä. notwendig. Solche Werkzeuge sind bei Schlossereien oder geologischen Instituten zu finden. Es ist auch möglich anschließend den Versuch zum qualitativen Nachweis von löslichen Silica-
Verbindungen mit der Ätzlösung durchzuführen (siehe Abschnitt 5.3.1). Dies kann das Ergebnis des Ätzversuchs unterstützen.

5.4.2 Saures Ätzen von Glas

Geräte: kleines Schraubgefäß aus PE (30 ml), zwei Einwegspritzen (5 ml) mit Kanülen, Stativmaterial, Glasabdeckblättchen zum Mikroskopieren, Spatel, Laborwaage, Wägeschälchen

Chemikalien: Calciumfluorid, konz. Schwefelsäure, Natriumhydroxid-Lösung ($w = 32\%$), dest. Wasser

Sicherheit: Es wird unter Verwendung von Einmalhandschuhen unter einem Abzug gearbeitet!

Schwefelsäure (Gefahr, GHS05, GHS07), Natriumhydroxid-Lösung (Gefahr, GHS05), Fluorwasserstoff (Gefahr, GHS06, GHS05)

Versuchsdauer: 15 min (nur Lehrerversuch)

Durchführung:

- Ein kleines Schraubgefäß wird mit einem Stativ und einer Stativklammer gegen Umkippen gesichert.



Abbildung 49: Apparatur zur *in-situ*-Erzeugung von Fluorwasserstoff

- Es wird ein Glasabdeckblättchen in das Schraubgefäß gegeben und 0,5 g Calciumfluorid darauf gehäuft. (Alternativ kann auf eine Probe aus Glas verzichtet werden und ein Schnappdeckelglas verwendet werden.)
- Die erste Spritze wird mit 1 ml konz. Schwefelsäure, die zweite Spritze mit 3 ml konz. Natriumhydroxid-Lösung gefüllt.
- Nun wird die Spritze mit der Schwefelsäure durch den fest aufgesetzten Deckel des Schraubgefäß gestochen und die Schwefelsäure unter Beachtung des Druckausgleich unter einem Abzug rasch auf das Calciumfluorid gegeben.
- Nachdem keine Gasentwicklung mehr zu beobachten ist (nach ca. 5 Minuten), wird die Natriumhydroxid-Lösung zugegeben und vorsichtig umgeschwenkt.
- Nun wird das Schraubgefäß vorsichtig unter dem Abzug geöffnet und zur Hälfte mit dest. Wasser gefüllt.
- Das Glasblättchen kann mit einer Pinzette entnommen, **vorsichtig** mit dest. Wasser abgespült und mit einem Haushaltspapier trocken getupft werden.

Entsorgung: Das Reaktionsgemisch wird neutralisiert und filtriert. Das Filtrat kann in den Abfallbehälter für anorganische Flüssigabfälle und der zurückgebliebene Feststoff in den Abfallbehälter für Feststoffabfälle entsorgt werden.

Beobachtungen: Nach Zugabe der konzentrierten Schwefelsäure entsteht ein farbloses Gas. Es ist eine Trübung auf der Glasprobe zu erkennen. Bei der Verwendung eines Schnappdeckelglases ist noch während der Reaktion eine zunehmende Trübung der Glaswandung zu erkennen, die auch nach gründlichem Spülen nicht verschwindet. Zusätzlich fühlt sich die Innenseite des Schnappdeckelglases deutlich rauer an als dessen Außenseite.

Auswertung: Es entsteht Fluorwasserstoff durch die Reaktion von Calciumfluorid und Schwefelsäure:



Dieser reagiert mit Siliciumdioxid aus dem Glas nach folgender Gleichung:



Nach dem Ätzprozess erscheint die Glasoberfläche nicht mehr glatt. Die strukturellen Unebenheiten beeinflussen die Lichtbrechung und lassen die Glasoberfläche trüb erscheinen.

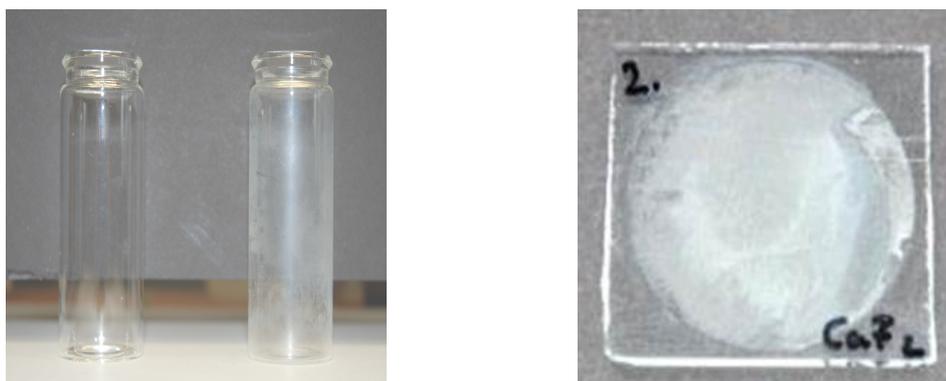


Abbildung 50: Ätzvorgang im Schnappdeckelglas (links), geätztes Deckplättchen aus dem Mikroskopierbedarf (rechts)

Hinweise: Aufgrund einer Ersatzstoffprüfung für Natriumfluorid sollte dieser Versuch bevorzugt mit Calciumfluorid durchgeführt werden. Zusätzlich sollten Versuche, bei denen Fluorwasserstoff auch nur in geringsten Mengen freigesetzt wird, grundsätzlich im Abzug durchgeführt und Schutzhandschuhe getragen werden.

Der Versuch lässt sich grundsätzlich auch auf Silicium übertragen. Bei dieser Reaktion muss allerdings Salpetersäure verwendet werden, um das elementare Silicium zu Siliciumdioxid zu oxidieren. Dieses kann dann mit Fluorwasserstoff wie oben weiter reagieren. Dabei entstehen in einer auch bei Raumtemperatur heftig ablaufenden Reaktion nitrose Gase, was die Handhabung für den Schulversuch erschwert.

5.4.3 Elektrische Leitfähigkeit von mono- und polykristallinem Silicium

Geräte: Stativmaterial, Flammrohrbrenner (alternativ: Teclubrenner), Feuerzeug, zwei gelochte Schamottsteine zum Schutz der Kabel, regelbare Stromquelle, Amperemeter, drei Kabel, zwei Krokodilklemmen

Chemikalien: dünne Siliciumproben (polykristallin und einkristallin; ca. 2 cm lang und 0,5 cm breit)

Sicherheit: -

Versuchsdauer: 15 min (Schülerversuch möglich)

Durchführung:

- Die Krokodilklemmen werden an einem Stück Silicium befestigt und die Kabel über zwei Stativklammern gehängt, so dass sich die Siliciumprobe zwischen den beiden Stativklammern befindet.
- Die Probe wird in einen Stromkreis (Gleichstrom) mit Spannungsquelle und Amperemeter eingebunden. Das Amperemeter wird auf den empfindlichsten Bereich (hier 0,03 A) eingestellt. Für polykristallines Silicium wird eine Spannung von 5 V eingestellt. Für einkristallines Silicium wird die Spannung ausgehend von 0 V langsam erhöht.
- Anschließend wird die Siliciumprobe punktuell mit einem Flambierbrenner erhitzt. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Kabel nicht beschädigt werden.

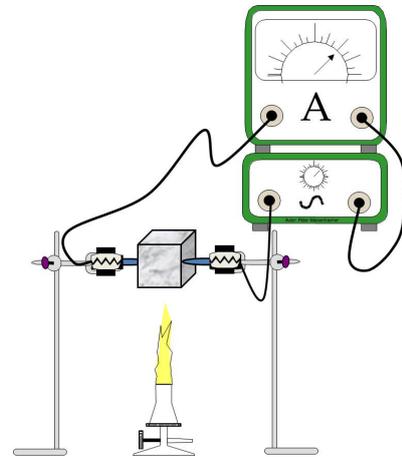


Abbildung 51: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von elementarem Silicium

Entsorgung: Die Siliciumproben können wiederverwertet werden.

Beobachtungen: Für die polykristalline Siliciumprobe ist bei Raumtemperatur eine Stromstärke von 0 mA messbar. Beim Erhitzen steigt die Stromstärke anfangs langsam, dann immer schneller auf über 30 mA an. Für den Einkristall steigt die Stromstärke bereits bei Raumtemperatur bei Erhöhung der Spannung an.

Auswertung: In polykristallinem Silicium gibt es keine einheitliche übergeordnete Gitterstruktur. Stattdessen liegen nebeneinander Bereiche mit unterschiedlicher Orientierung vor. Dies beeinträchtigt die Bewegungsfreiheit der Ladungsträger und hat zur Folge, dass erst bei höheren Temperaturen nennenswerte elektrische Leitfähigkeit möglich ist.

Silicium-Einkristalle werden aus einer Schmelze von flüssigem Silicium gezüchtet. Der gesamte Einkristall hat daher eine einheitliche Gitterstruktur, was bei Silicium meist eine Ausrichtung der Gitterebenen (100) oder (111) ist. Diese einheitliche Gitterstruktur begünstigt die Leitfähigkeit des elektrischen Stroms, weshalb solche Einkristalle zur Herstellung von elektronischen Bauteilen genutzt werden.

6 Erprobung der Experimente und Unterrichtsmaterialien im Rahmen von Schülerprojekttagen und Lehrerfortbildungen

Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Experimente wurden von LehrerInnen und SchülerInnen gleichermaßen erprobt. Die Erprobung mit Lehrkräften erfolgte während Lehrerfortbildungen, die Erprobung mit SchülerInnen in thematisch passend entwickelten Projekten im Goethe-Schülerlabor.

Die Erprobung der Experimente erfolgte unter Betrachtung verschiedener Kriterien. Die Experimente sollten hinsichtlich Handhabung und Motivation, aber auch hinsichtlich des möglichen Lernerfolgs beurteilt werden. Dabei wurde eine Optimierung der Versuchsvorschriften, sowie der Durchführung der Experimente angestrebt.

6.1 Lehrerfortbildungen

Für LehrerInnen mit dem Fach Chemie ist die Teilnahme an einer Fortbildungsmaßnahme nur eine von vielen Möglichkeiten zur Erweiterung des eigenen Wissensstands bezüglich neuer Anregungen für den Unterricht. Es ist aber nach wie vor die beste Möglichkeit mit aktuellen Forschungsinhalten und neu erarbeiteten, didaktisch aufbereiteten Unterrichtsmaterialien in Kontakt zu kommen. Nach einer aktuellen Erhebung wünschen sich LehrerInnen von Fortbildungen besonders neue Erkenntnisse über neue fachliche Inhalte, die sich nach Möglichkeit fächerübergreifend anwenden lassen, sowie die Thematisierung, wie sich naturwissenschaftliche Arbeitsweisen vermitteln lassen [195].

Im Verlauf des Promotionsprojekts wurden drei Fortbildungen angeboten. Im Folgenden wird die Konzeption der einzelnen Fortbildungen vorgestellt. Die zugehörigen Skripte und Zusatzmaterialien finden sich im Anhang.

6.1.1 Ablauf

Die Erprobung im Rahmen von Lehrerfortbildungen fand in halb- und eintägigen Fortbildungsveranstaltungen des Lehrerfortbildungszentrum des Instituts für Didaktik der Chemie statt. Die Fortbildungen wurden sowohl in den Räumlichkeiten des Instituts für Didaktik der Chemie sowie an Schulen und anderen Universitäten angeboten und durchgeführt.

Das Konzept der Fortbildungen fokussiert die praktische Tätigkeit im Chemielabor. In einem Einführungsvortrag mit einer Dauer von ca. 60 min werden sowohl theoretische Grundlagen zum Thema der Fortbildung als auch die Kernidee der neu entwickelten Experimente mit didaktischen Hinweisen zur Einbindung in den Unterricht vorgestellt. Anschließend haben die LehrerInnen Ge-

legenheit die vorgestellten Versuche an vorbereiteten Stationen selbst durchzuführen. Bei einer halbtägigen Fortbildung wird das Konzept entsprechend der zur Verfügung stehenden Zeit angepasst. Abschließend kommen die TeilnehmerInnen zu einer Feedback-Runde zur Diskussion zusammen.

Die TeilnehmerInnen erhalten ein Skript, welches neben den Folien des Vortrags weiterführende fachliche Informationen zu dem Thema der Fortbildung, sowie die Experimentiervorschriften enthält. Auf einer CD werden weitere Zusatzmaterialien zur Verfügung gestellt, die als Anschauungsexemplar in gedruckter Form während der Fortbildung ausliegen. Hier finden sich Gefährdungsbeurteilungen, Kopiervorlagen für die Schülerexemplare der Experimentiervorschriften und Informationen zur Einbindung in den Chemieunterricht (Lernziel des Versuchs, Zuordnungen zu Lehrplaninhalten, passende Basis-Konzepte und Inhaltsfelder).

6.1.2 Evaluation

Im Rahmen der Abschlussbesprechung wurde neben einem verbalen Feedback auch eine schriftliche Befragung mit Hilfe eines Fragebogens vorgenommen. Die TeilnehmerInnen wurden zu den Experimenten, den Experimentiervorschriften, dem allgemeinen Ablauf und den Zusatzmaterialien befragt. Der verwendete Fragebogen wurde zuvor mit Kollegen aus der Arbeitsgruppe und Sozialwissenschaftlern validiert. Die Auswertung der erhobenen Daten erfolgte deskriptiv. Das Design des Fragebogens zielte ausschließlich auf eine Untersuchung von affektiven und motivationalen Merkmalen. Es wurde beispielsweise nach der Verständlichkeit der Versuchsvorschriften oder der Motivation der Kontextorientierung der Experimente gefragt. Die Überprüfung einer wissenschaftlichen Hypothese wird nicht angestrebt.

Der Fragebogen wurde in allen drei Fortbildungen genutzt und jeweils auf die Versuche einer Fortbildung angepasst. Es wurden Fragen zu sinnvoll zusammengefassten Gruppen von Experimenten gestellt. Diese Fragegruppen konnten je nach Fortbildung bei Bedarf für eine weitere Gruppe von Experimenten ergänzt werden, wobei keine Änderungen der Formulierungen vorgenommen wurden.

Der Fragebogen wurde jeweils einmal in der Fortbildung „Silicone-Polymerchemie zwischen Anorganik und Organik“ und in der Fortbildung „Kosmetik-Untersuchung von Zusatzstoffen“ getestet und anschließend optimiert.

6.1.3 Lehrerfortbildung „Silicone - Polymerchemie zwischen Anorganik und Organik“

6.1.3.1 Konzeption und Experimentauswahl

Die Fortbildung „Silicone - Polymerchemie zwischen Anorganik und Organik“ wurde zunächst als ganztägige Fortbildung konzipiert und in dieser Form auch in einem Testdurchlauf im Februar

2014 mit 15 TeilnehmerInnen erprobt. Anschließend wurde eine Kombination mit der halbtägigen Fortbildung *chem2do* zu dem Experimentierkoffer der Firma *Wacker Chemie* zu Siliconen und Cyclodextrinen erwogen. Es fand daher eine Verkürzung zu einer halbtägigen Veranstaltung statt. Diese wurde in dieser Form bisher viermal mit insgesamt 37 TeilnehmerInnen durchgeführt. Es wurden folgende Experimente aufgenommen:

- Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - Vergleich der Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit
- Vergleich von Silicon- und Acrylatdichtstoffen - Temperatur und Geruch, Überstreichbarkeit und Verhalten gegenüber Wasser
- Silicondichtstoffe - Unterscheidung verschiedener Eliminierungsprodukte
- Silicondichtstoffe - Nachweis eines alkoholischen Eliminierungsprodukts
- Silicondichtstoffe - Identifizierung des alkoholischen Eliminierungsprodukts als Methanol
- Silicondichtstoffe - Nachweis von Essigsäure als Eliminierungsprodukt
- Modellversuche zu Funktionskleidung - Herstellung, Überprüfung der wasser- und schmutzabweisenden Eigenschaften, sowie der der Wasserdampfdurchlässigkeit
- Herstellung einer Abgussform mit dem Füllstoff Siliciumdioxid
- Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Präzision und Dimensionsstabilität
- Entschäumen mit Pflegelotionen
- Siliconöl - Schauminhibitor und Schaumstabilisator
- Lernzirkel zu Unterschiede von Ölen
- Siliconöl und Mineralöl - Vergleich der Viskosität
- Äquilibrierung von Silicondichtstoff
- Herstellung von „Intelligenter Knetmasse“
- Herstellung von „Magischem Sand“

6.1.3.2 Ergebnisse

Die TeilnehmerInnen bewerteten das Konzept der Fortbildung insgesamt gut. Die Zusatzmaterialien wurden positiv aufgenommen. Es wurde nach den Experimentengruppen „Öl“, „Fugenmassen“ und „Funktionskleidung“ gefragt. Unter diesen Begriffen wurden die jeweiligen Experimente zusammengefasst. Hinter dem Begriff „Öl“ verbargen sich die Experimente zum Öl-Lernzirkel, unter dem Begriff „Fugenmassen“ wurden alle Versuche zu Dichtstoffen (Vergleich von Acrylat- und Silicondichtstoff, sowie Untersuchung der Eliminierungsprodukte der Silicondichtstoffe) zusammengefasst. In der letzten Gruppe waren alle experimentellen Ansätze zu den Modellversuchen zur Funktionskleidung zu bewerten.

Die Experimentengruppen wurden gut bis sehr gut hinsichtlich der Anschaulichkeit, der motivierenden Wirkung und der Verständlichkeit der Versuchsvorschriften bewertet, wobei besonders die Experimente zu anwendungsorientierten Themen wie der Funktionskleidung hervor traten. Dies könnte mit einem hohen Alltagsbezug begründet werden. Andererseits ist die tendenziell gute Bewertung der Versuche des Öl-Lernzirkels vielleicht damit zu begründen, dass an bekannte experimentelle Zugänge und verbindlich zu thematisierende Unterrichtsinhalte angeschlossen wird. Dies ist aber noch zu prüfen, da in der kleinen Stichprobe keine signifikanten Aussagen möglich waren.

6.1.4 Lehrerfortbildung „Kosmetik - Untersuchung von Zusatzstoffen“

6.1.4.1 Konzeption und Experimentauswahl

Die Fortbildung „Zusatzstoffe in Kosmetika“ wurde als ganztägige Fortbildung konzipiert. In dieser Form wurde sie nach einem halbtägigen Testlauf im Dezember 2014 mit 13 TeilnehmerInnen fünfmal mit insgesamt 98 TeilnehmerInnen durchgeführt.

Es sollten Informationen zum Gebrauch von Zusatzstoffen in Kosmetikprodukten vermittelt werden. Ausgewählte Inhaltsstoffe und ihre jeweilige Funktion standen im Fokus und sollten mit Hilfe von Modellversuchen veranschaulicht werden. Neben den erarbeiteten experimentellen Ansätzen zu Siliconen und Siliciumdioxid wurden weitere Experimente zu anderen, oft verwendeten Zusatzstoffen im Rahmen der Fortbildung vorgestellt. Diese weiteren acht Experimente thematisierten so unterschiedliche Aspekte wie die Verkapselung empfindlicher Wirkstoffe oder die antibakterielle Wirkung von Silberionen und runden so die Betrachtung verschiedener, gebräuchlicher Zusatzstoffe in Kosmetikprodukten ab.

Es wurden folgende Experimente angeboten:

- Qualitativer Nachweis von löslichen Silica in Zahncreme
- Thixotropie von Zahncreme

- Kratzfestigkeit von Nagellack
- Viskositätseinstellung von Nagellack
- Herstellung und Modifizierung eines Nagellacks
- Mattierungseffekt von Siliciumdioxid in Nagellack
- Entschäumen mit Pflegelotionen
- Glanzoptimierung von Lipgloss
- Silicontenside in Haarpflegeprodukten
- Wasserfeste Wimperntusche
- Deostift ohne Mikro-Schaum
- Herstellung von „slow-release“-Partikeln mit Ammoniumthiocyanat
- Überprüfung der retardierten Freisetzung von Ammoniumthiocyanat
- Modellversuch zu „schmelzenden“ Verpackungen von Duftstoffen
- Analyse von Cellulose-Verpackungen in Körperpflegeprodukten
- Antibakterielle Wirkung von Silber in Cremes
- Nachweis von Silberionen in einer Creme
- Deokristall mal ganz anders: Herstellung von „New Slime“
- Cyclodextrine im Haarshampoo [196]

6.1.4.2 Ergebnisse

Die Fortbildung wurde von den TeilnehmerInnen überwiegend sehr gut bewertet, was mit dem motivierenden Themenfeld für die SchülerInnen begründet werden kann. Auch bei dieser Fortbildung wurden die ausgegeben Zusatzmaterialien, wie Gefährdungsbeurteilungen und Schülerexperimentieranleitungen, sehr gut angenommen.

Weiter wurde nach den Experimentengruppen „Nagellack“, „Zahnpasta und Kieselsäure“, sowie „Silicone“ gefragt. Unter dem Begriff „Silicone“ wurden alle Experimente zu Siliconen in Kosmetika, wie in der Wimperntusche, im Haarshampoo, im Lipgloss und im Deostift, zusammengefasst. Die Versuche wurden alle als gut bis sehr gut hinsichtlich Verständlichkeit der Versuchsvorschriften,

der Anschaulichkeit und der motivierenden Wirkung bewertet. Die Experimente um die Zahncreme werden tendenziell besser bewertet verglichen mit den anderen Gruppen. Für eine deutliche Aussage wäre eine Erweiterung der Stichprobe nötig.

6.1.5 Lehrerfortbildung „Siliciumchemie im Alltag“

6.1.5.1 Konzeption und Experimentauswahl

Die Fortbildung „Siliciumchemie im Alltag“ ist als ganztägige Veranstaltung konzipiert. Hier wurden neben eigenen Entwicklungen auch bereits literaturbekannte Experimente aufgenommen. Das Ziel der Fortbildung ist eine vielfältige Abbildung der verschiedenen Teilbereiche der Siliciumchemie. Zum Zeitpunkt der Drucklegung hat ein Testdurchlauf mit fünf Teilnehmern stattgefunden. Eine weitere Durchführung ist für November 2016 geplant.

Folgende Experimente wurden kombiniert:

- Glas aus der Mikrowelle [135]
- Basisches Ätzen von Silicium
- Elektrische Leitfähigkeit von Silicium
- Herstellung von elementarem Silicium aus Sand [98, S.169 ff.]
- Bentonit - Apfelsaftklärung [153]
- Bentonit - saurer Bentonit als Katalysator [154]
- Herstellung eines Perlglanzpigments mit Glimmer [152]
- Zeolith - Adsorption von Wasser und Einsatz als Wärmespeicher [149]
- Zeolith - Adsorption und Desorption eines Duftstoffs [145]
- Qualitativer Nachweis von löslichen Silica in Zahncreme
- Thixotropie von Zahncreme
- Kratzfestigkeit von Nagellack
- Putzkörper in Zahncreme
- Mattierungseffekt von Siliciumdioxid in Nagellack
- Wasseraufnahme von Zement

- Beeinflussung der Wärmeleitfähigkeit von Zement
- Gelpunktsbestimmung mit einem einfachen Blasenviskosimeter
- Silicondichtstoffe - Unterscheidung verschiedener Eliminierungsprodukte
- Silicondichtstoffe - Nachweis eines alkoholischen Eliminierungsprodukts
- Silicondichtstoffe - Identifizierung des alkoholischen Eliminierungsprodukts als Methanol
- Silicondichtstoffe - Nachweis von Essigsäure als Eliminierungsprodukt
- Modellversuche zu Funktionskleidung - Herstellung, Überprüfung der wasser- und schmutzabweisenden Eigenschaften, sowie der der Wasserdampfdurchlässigkeit

6.1.5.2 Ergebnisse

Diese Fortbildung wurde bisher nur einmal mit einer kleinen Teilnehmerzahl durchgeführt, so dass die untersuchte Stichprobe sehr klein ist. Alle Experimente wurden überwiegend als gut bewertet, aber für belastbare Aussagen wären weitere Durchführungen nötig.

6.2 Schülerlaborprojekte

Im Folgenden werden drei kurze Projekte beschrieben, die zur Erprobung ausgewählter, entwickelter Experimente mit SchülerInnen erarbeitet wurden.

6.2.1 Science Camp „Fugenmassen, Backform und Zahnpasta“

6.2.1.1 Konzeption des Projekts

Der Begriff *Science Camp* wird zwar weltweit für Veranstaltungen an außerschulischen Lernorten genutzt, ist aber nicht einheitlich definiert. Es werden sowohl eintägige Veranstaltungen, als auch mehrwöchige Projekte in den Ferien unter diesem Begriff zusammengefasst. Die Schwerpunktsetzung reicht dabei vom Erlernen wissenschaftlicher Arbeitsweisen in einem output orientierten Konzept bis zu sogenanntem *Edutainment* mit dem Fokus auf dem Unterhaltungswert des Experimentierens. [197]

Die Projekte, die im Goethe-Schülerlabor durchgeführt werden, sollen interessierten SchülerInnen die Möglichkeit geben einen Einblick in naturwissenschaftliche Forschungsinstitutionen zu erhalten und aktuelle Entwicklungen aus der Forschung direkt zu erleben. Ein solches *Science*

Camp findet in den Sommerferien statt, umfasst in der Regel drei Tage und wird in den Räumlichkeiten des Goethe-Schülerlabors auf dem Campus der Goethe-Universität durchgeführt. Die SchülerInnen melden sich selbstständig, und nicht etwa über ihre Schulen, an, was auf ein großes Interesse am Arbeiten im Labor und der Chemie schließen lässt.

Jeder Tag beginnt mit einer kurzen thematischen Einführung in das Thema des Tages, an den sich eine Diskussionsrunde anschließt, die zur Arbeitsphase im Labor überleitet. Hier liegt mit dem eigenständigen Experimentieren der Schwerpunkt der Veranstaltung. Es findet eine längere Experimentierphase am Vormittag (ca. 2,5 h) und eine zweite, etwas kürzere Experimentierphase (ca. 1,5 h) am Nachmittag nach einer Mittagspause statt.

Unter dem Titel „Fugenmassen, Backform und Zahnpasta“ wurden Experimente zu verschiedenen Bereichen der Siliciumchemie zusammengefasst. Neben einigen Versuchen zu Siliciumdioxid waren hauptsächlich Versuche zu Siliconen vertreten, was dem Entwicklungsstand des Forschungsprojekts zu diesem Zeitpunkt entsprach. Die Experimente wurden in drei Themengebiete aufgeteilt und im Laufe der drei Tage des Science Camps durchgeführt. An den ersten beiden Tagen standen die Silicone im Vordergrund, wobei zwischen flüssigen und elastomeren Siliconen unterschieden wurde. Der letzte Tag thematisierte die Verwendung von Siliconen und Siliciumdioxid in Kosmetikprodukten. Es wurden folgende Experimente aufgenommen:

Tag 1

- Lernzirkel zu Unterschieden von Ölen ergänzt durch Versuche zu Gemeinsamkeiten von Ölen (Löslichkeit in Wasser und organischen Lösemitteln)
- Modellversuche zu Funktionskleidung - Herstellung, Überprüfung der wasser- und schmutzabweisenden Eigenschaften, sowie der der Wasserdampfdurchlässigkeit

Tag 2

- Silicondichtstoffe - Unterscheidung verschiedener Eliminierungsprodukte
- Silicondichtstoffe - Nachweis eines alkoholischen Eliminierungsprodukts
- Silicondichtstoffe - Identifizierung des alkoholischen Eliminierungsprodukts als Methanol
- Silicondichtstoffe - Nachweis von Essigsäure als Eliminierungsprodukt
- Herstellung einer Abgussform mit dem Füllstoff Siliciumdioxid
- Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Präzision und Dimensionsstabilität

Tag 3

- Qualitativer Nachweis von löslichen Silica in Zahncreme
- Thixotropie von Zahncreme
- Kratzfestigkeit von Nagellack
- Viskositätseinstellung von Nagellack
- Mattierungseffekt von Siliciumdioxid in Nagellack
- Entschäumen mit Pflegelotionen
- Glanzoptimierung von Lipgloss
- Silicontenside in Haarpflegeprodukten

Im Anschluss an die Experimentierphase am Nachmittag erhielten die SchülerInnen in einer Feedbackrunde Gelegenheit zur Besprechung ihrer Ergebnisse, so dass eine Ergebnissicherung statt finden kann. Die Experimente konnten zwecks Optimierung auch bewertet werden.

6.2.1.2 Durchführung und Evaluation

Nach bereits erfolgten Erprobungen in Lehrerfortbildungen und sich daran anschließenden Optimierungsphasen wurde im August 2014 der Rahmen eines Science Camps genutzt, um bereits experimentell erarbeitete Ansätze ebenfalls von SchülerInnen erproben zu lassen. Dies kann gewissermaßen als die zweite Phase der Erprobung bezeichnet werden. Das Projekt wurde mit sieben Teilnehmern mit oben beschriebener Konzeption durchgeführt.

In der Feedbackrunde konnten die SchülerInnen das Science Camp zunächst im Gespräch bewerten. Sie wurden sowohl um positive Rückmeldungen, wie auch um Optimierungsvorschläge gebeten. Dies wurde anschließend in einem kurzen Fragebogen schriftlich festgehalten. Die Ergebnisse sind allerdings nur bedingt aussagekräftig und können nur Tendenzen wiedergeben, da die Stichprobe nur aus sieben Befragten bestand. Beispielsweise beurteilten über 80 % der Teilnehmer die Verständlichkeit der Versuchsvorschriften als gut, 85 % bewerten die Anzahl der Versuche pro Tag als genau richtig und fast alle würden wieder teilnehmen. Als besonders herausragend wurden die Experimente zur Untersuchung von Nagellack und Funktionskleidung, sowie zur Herstellung einer Backform wahrgenommen. Diese Experimente wurden bei der Frage zum persönlichen „Highlight“ des Science Camps mehrfach genannt.

Die Rückmeldungen zu den Experimenten und den Versuchsvorschriften wurden bei der Optimierung berücksichtigt.

6.2.2 WebQuests

Mit zwei *WebQuests* wurden Unterrichtseinheiten zum Thema Silicone erarbeitet, die der Erprobung von Experimenten zu Verdeutlichung der Funktionen von Siliconen in Kosmetikprodukten, sowie zur Untersuchung von Abformungen mit Siliconelastomeren und deren Eignung als Backform dienen. Die ausgewählten Experimente werden in dem Abschnitt des jeweiligen WebQuest genannt und sind in Kapitel 5 in Abschnitt 5.1 ausführlich beschrieben worden.

Im Rahmen der *WebQuests* werden Recherche-Aufgaben und experimentelle Arbeitsaufträge kombiniert. Die Durchführung fand bisher in den Räumen des Goethe-Schülerlabors in Form von Projekttagen statt. Die Projekte sind allerdings so konzipiert, dass eine Durchführung ebenso im schulischen Umfeld möglich ist.

6.2.2.1 Theoretischer Hintergrund

Unter einem *WebQuest* versteht man eine Unterrichtsmethode, die das Recherchieren im Internet fokussiert. Der mediengestützte Ansatz wurde im englischsprachigen Raum bereits 1995 von Dodge entwickelt und soll das Internet für den Unterricht sinnvoller nutzbar machen [198]. Der Begriff „Quest“ beschreibt ursprünglich Abenteuer in der mittelalterlichen Literatur, wird aber seit einigen Jahrzehnten auch für abenteuerliche Suchaufgaben in Video- und Computerspielen verwendet [199]. Dieses Konstrukt ist den SchülerInnen heutzutage gut bekannt. Ein WebQuest kann daher vereinfacht als mediengestützte Suche mit dem Ziel der Wissenserweiterung durch neue Informationen in einem sinnstiftenden, spannenden Rahmen bezeichnet werden.

Die Methode fördert einen handlungsorientierten, situierten Unterricht, der den SchülerInnen eine hohe Eigenaktivität ermöglicht [200, S.135]. Andere Quellen betonen auch die entdeckungsorientierte Aktivität der SchülerInnen [201, S.25]. Die Lehrkraft steht in der eigentlichen Arbeitsphase lediglich beratend und unterstützend zur Seite [202, S.37].

Die Entwicklung der didaktischen Methode erfolgt für den schulischen Rahmen, was auch den überwiegenden Einsatzort darstellt. Mögliche Beispiele sind bei Weiß, Pietzner oder Heuer zu finden [203], [204], [205]. Es wird aber auch die Möglichkeit der Nutzung in der Erwachsenenbildung vorgeschlagen [202].

In dem geschützten Raum des *WebQuests* wird dem sogenannten „lost-in-hypersapce“-Phänomen bei der Recherche zu einem Thema entgegengewirkt, indem nur ausgewählte Literaturquellen zur Verfügung gestellt werden. Die SchülerInnen verlieren so keine wertvolle Arbeitszeit auf schlecht strukturierten und fachlich mangelhaft erarbeiteten Websites und können stattdessen sofort mit sinnvollen Informationen arbeiten.

Die Phase der Informationsbeschaffung im Internet wird auf diese Weise zeitlich begrenzt. Dodge schlägt ursprünglich nur webbasierte Quellen vor, bei Moser findet man dann eine Erweiterung zu konventionellen Medien, wie Schulbücher und Zeitschriften. Dies eröffnet breitere Einsatzmöglichkeiten und integriert das Internet als ein Medium von vielen in die Möglichkeiten zur Recherche. Die SchülerInnen lernen es so als normales Arbeitswerkzeug auch für den Unterricht kennen [206].

Erwähnenswert ist die inzwischen sehr einfache Erstellung eines *WebQuests*, die auch ohne Programmierkenntnisse möglich ist. Weiß hat dazu 2008 die Variante des *BlogQuest* vorgestellt. Das *WebQuest* wird hier in der kostenlos nutzbaren Umgebung eines Blogs angelegt. Der Aufbau über mehrere, verlinkte Seiten ist in der intuitiv anwendbaren Umgebung genauso möglich, wie das für ein *WebQuest* gefordert wird [199], [203].

Das standardmäßige Modell eines *WebQuests* ist aus sechs Einheiten aufgebaut, die auch als aufeinander folgende Schritte im Bearbeitungsprozess betrachtet werden können. Nach Moser sind dies [202, S.31]:

- Thema
- Aufgabenstellungen
- Ressourcen
- Prozess
- Evaluation
- Präsentation

Die Einheiten werden im Folgenden am Beispiel eines der beiden im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten *WebQuests* beschrieben.

6.2.2.2 WebQuest zu Siliconen in Kosmetika

Auf der Startseite des *WebQuests* erhält der Nutzer grundlegende Informationen zur Nutzung des *WebQuests*. Diese Seite zählt noch nicht zu den notwendigen Einheiten eines *WebQuests*, sollte aber für einen einfachen Einstieg immer voran gestellt werden.

Auf der ersten Seite, die bei Moser als „Thema“ bezeichnet wird, erhalten die SchülerInnen einen Einblick in das Themenfeld, in welchem die zu lösenden Aufgabe anzusiedeln ist. Dies sollte immer in einem kontextorientierten, sinnstiftenden Rahmen geschehen, um die Motivation der

SchülerInnen zu steigern. Bei dem WebQuest „Silicone in Kosmetika“ wird die Thematik anhand der Entscheidung zur Herstellung von konventioneller oder Naturkosmetik in einem fiktiven Start-up-Unternehmen eingeführt. Den SchülerInnen wird dabei die Rolle eines Beraters zugewiesen, der diese Frage nachfolgend aus verschiedenen Perspektiven untersuchen soll (siehe Abb. 52).

Einleitung

Betreff: Naturkosmetik oder konventionelle Kosmetik?

Sehr geehrtes Expertengremium,

ich wende mich in meiner Funktion als Firmengründerin des Startup-Unternehmens "Kosmetik für morgen" an Sie als Experten und Expertinnen einer externen Beratungsfirma. Das Konzept meiner Firma sieht eigentlich die Produktion von Naturkosmetik vor. Die kontrovers diskutierten Silicone als Bestandteil konventioneller Kosmetik sind aber aufgrund ihrer vielfältigen Möglichkeiten in den Fokus unseres Interesses gerückt. Sie sollen sich in nahezu jedem Kosmetikprodukt einsetzen lassen. Leider ermöglicht weder mein beruflicher Hintergrund, noch der meiner wenigen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen, eine fachgerechte Beurteilung.

In Ihrer Funktion als Berater und Beraterinnen für Forschung und Wirtschaft mit jahrelanger Erfahrung vertrauen wir auf Ihre Expertise und Kompetenz für die Zusammenstellung von Informationen über die Verwendung von Siliconen als Inhaltsstoff für Kosmetika und eine Empfehlung für den Einsatz in unserer Kosmetiklinie.

Mit freundlichen Grüßen,

Manuela Wählgut (Geschäftsleitung)

Abbildung 52: Screenshot der fiktiven Problemstellung in der Einleitung



ChemikerInnen:
Welche Aufgaben haben ChemikerInnen bei der Herstellung von Kosmetikprodukten?

ChemikerInnen beschäftigt sich mit dem molekularen Aufbau von Substanzen und den Wechselwirkungen von Molekülen miteinander. Sie können die makroskopischen Eigenschaften eines Materials mit dem molekularen Aufbau der Inhaltsstoffe in Verbindung bringen. Das Wissen um den molekularen Aufbau eines Materials kann genutzt werden, um einen Rückschluss auf dessen Eigenschaften zu ziehen. Dieses Wissen wird bei der Entwicklung eines neuen Produktes benötigt. ChemikerInnen sind auch immer bei der Herstellung involviert, sei es im Labor, im Technikum oder in der Massenproduktion.

Aufgaben für die Mitglieder dieser Gruppe:

1. Informieren Sie sich über den Aufbau und die Herstellung von Siliconen. Formulieren Sie Reaktionsgleichungen für die Teilschritte im Herstellungsprozess für das Silicon Polydimethylsiloxan. Nutzen Sie dafür die Literaturquellen, die im Rahmen dieses WebQuest zur Verfügung gestellt werden.
2. Führen Sie mindestens einen der Versuche zu Siliconen in Kosmetika durch.
3. Fassen Sie Ihre Ergebnisse in Form eines Handout zusammen und stellen Sie eine kurze PowerPoint Präsentation zusammen, die in der Beratungssitzung der gesamten Gruppe vorgestellt und diskutiert wird.

Abbildung 53: Screenshot der Aufgabenstellungen, hier für die Gruppe der ChemikerInnen

Anschließend werden die SchülerInnen genauer mit der eigentlichen Fragestellung vertraut gemacht. Hier steht am Ende immer die Erstellung eines Produktes. Während bei Dodge immer ein webbasiertes Produkt angestrebt wurde, ist das bei Moser wiederum breiter ausgelegt, so dass auch eine Präsentation möglich ist [202, S.41].

Bei dem *WebQuest* zum Thema Kosmetik werden vier Expertengruppen vorgestellt, die sich je-

weils mit der Fragestellung nach der Art der Kosmetikproduktion aus einer bestimmten Perspektive auseinandersetzen. Es werden die Expertengruppen *ChemikerInnen*, *KosmetikerInnen*, *ProduktentwicklerInnen* und *Umwelt- und VerbraucherschützerInnen* vorgeschlagen. In Abbildung 53 wird exemplarisch ein Screenshot der Aufgaben für die Gruppe der *ChemikerInnen* gezeigt.

Es gibt für jede Gruppe eine Recherche-Aufgabe, die sich im Falle der *ChemikerInnen* auf den Aufbau und die Herstellung von Siliconen bezieht. Weiter sollen die Eigenschaften von Siliconen im Experiment selbst nachvollzogen werden. Es werden daher fünf verschiedene Experimente für das Projekt angeboten, die nach der Arbeitsphase zu der Recherche-Aufgabe bearbeitet werden. Dies sind folgende Experimente:

- Entschäumen mit Pflegelotionen (siehe Experiment in Abschnitt 5.1.22)
- Glanzoptimierung von Lipgloss (siehe Abschnitt 5.1.23)
- Silicontenside in Haarpflegeprodukten (siehe Abschnitt 5.1.24)
- Wasserfeste Wimperntusche (siehe Abschnitt 5.1.25)
- Deostift ohne Mikro-Schaum (siehe Abschnitt 5.1.26)

Es werden alle Experimente von allen Gruppen bearbeitet, aber jede Gruppe sucht sich anschließend selbstständig einen Versuch heraus, den sie für die Präsentation aufbereitet und vorstellt. Die letzte Aufgabe bezieht sich auf die Erarbeitung einer Kurzpräsentation, in die sowohl Ergebnisse aus der Recherche-Aufgabe, als auch aus dem experimentellen Abschnitt einfließen sollen. Die SchülerInnen sollen sich nach Möglichkeit selbstständig auf die vier zur Verfügung stehenden Gruppen aufteilen. Dies kann aber gegebenenfalls von der Lehrkraft übernommen werden. Es ist möglich anhand der Aufgaben eine Differenzierung im Anspruchsniveau vorzunehmen, so dass eine binnendifferenzierte Projektdurchführung angestrebt werden kann.

Auf Seite 3 des *WebQuests* wird das Vorgehen zu Bearbeitung der Aufgaben detailliert dargestellt. Diese Aufgaben sind in dieser Form von der Lehrkraft vorgegeben und sollten nun im Plenum diskutiert und erklärt werden. So können Unklarheiten ausgeräumt und Anregungen der SchülerInnen aufgenommen werden. Je nach Lerngruppe können an dieser Stelle von der Lehrkraft ergänzende Veränderungen vorgenommen werden [202, S.33].

Zum Bearbeiten der Aufgaben werden auf der nachfolgenden Seite „Ressourcen“ Literaturquellen zur Verfügung gestellt. Diese sind bereits den vier Gruppen zugeteilt, so dass die Zuständigkeit

der Bearbeitung durch die Gruppen eindeutig erkennbar ist. Es wurden sowohl webbasierte Literaturquellen als auch wissenschaftliche Artikel aus Zeitschriften einer Bibliothek eingebunden. Diese können von der Lehrkraft bei Bedarf bei der Autorin angefragt werden. In Abbildung 54 sind zur Veranschaulichung die Quellen für die Gruppe *ChemikerInnen* aufgeführt.

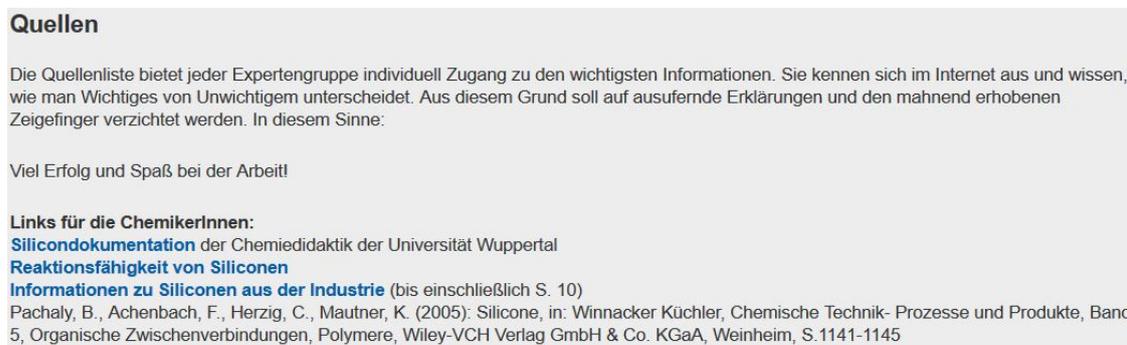


Abbildung 54: Screenshot der Quellen für die Gruppe der Chemiker

Ein *WebQuest* soll eigenständiges Lernen fördern, daher ist eine Selbstevaluation seitens der SchülerInnen immer eine Notwendigkeit. Die SchülerInnen erhalten auf der Seite „Bewertung“ Hinweise in Form eines Kompetenzrasters zur Bewertung bestimmter Bausteine der Lernaufgabe. Dies beinhaltet Aspekte der Arbeitsphase (Gruppenarbeit), des Vortrags (Referent, Form und Inhalt) sowie das Ergebnis der Problemstellung (siehe Abbildung 55).

Die Präsentation der Ergebnisse aller Gruppen bildet die Phase der Ergebnissicherung am Ende des Projekts. Um sicher zu stellen, dass alle SchülerInnen die erarbeiteten Informationen erhalten, erstellt jede Gruppe ein Handout mit einer Zusammenstellung der wichtigsten Informationen und Ergebnisse ihrer Arbeit. Das Handout dient mit der Präsentation zusammen als Grundlage für die abschließende Diskussion um die Fragestellung. Für das *WebQuest* „Silicone in Kosmetika“ ist dies eine Bewertungsaufgabe zur Herstellung von konventioneller Kosmetik oder Naturkosmetik. Abschließend werden die Ergebnisse der SchülerInnen durch ein Fazit bezogen auf die fiktive Fragestellung abgerundet.

Das *WebQuest* „Silicone in Kosmetika - Funktionen von Siliconen in Shampoo, Cremes und Co.“ ist unter folgender URL zu finden: http://www.uni-frankfurt.de/60951428/910_WebQuest-Kosmetika (ehemals: <https://siliziumchemie.wordpress.com/>).

| | Praktikantin je 2 Punkte | MitarbeiterIn je 3 Punkte | ExpertIn je 4 Punkte |
|----------------------------|---|---|--|
| Gruppenarbeit | Beteiligt sich sehr wenig an der gemeinsamen Arbeit und verletzt manchmal die Regeln zur Gruppenarbeit. | Beteiligt sich an der Gruppenarbeit und hält sich an die Regeln zur Gruppenarbeit. | Bringt sich erfolgreich in die Gruppe ein, übernimmt lenkende Aufgaben während der Arbeitsphase. |
| Referent | Der/die ReferentIn erscheint gelangweilt und ist unkonzentriert. | Der/die ReferentIn ist konzentriert und bei der Sache. | Der/die ReferentIn ist konzentriert und zeigt Interesse an der Materie. |
| Form des Vortrags | Mangelnde Organisation, z.B. fehlende Materialien und keine Visualisierung der Inhalte. | Gut vorbereitetes Material und eine vorhandene Visualisierung des Inhalts. | Ansprechende Visualisierung des Inhalts und Miteinbeziehung der Zuhörer. |
| Inhalt des Vortrags | Dem Vortrag fehlt ein inhaltlicher roter Faden und er enthält falsche Informationen. | Der Inhalt des Vortrags ist gut strukturiert, die gelieferten Informationen sind fachlich richtig und ausreichend, um sich einen Überblick über das Thema zu verschaffen. | Der Inhalt des Vortrags ist klar strukturiert und gut verständlich ausgearbeitet. Die Informationen sind fachlich richtig und ermöglichen einen Überblick über die Problematik. Zudem werden Fragen aufgeworfen, die Diskussionsanlass bieten. |
| Meetingpaper | Enthält nur wenige Informationen zum Thema. | Enthält wichtige Informationen zum Thema. | Enthält alle wichtigen Informationen zum Thema und ist sehr übersichtlich gestaltet. |
| Beratungsempfehlung | Enthält kaum relevante Informationen. | Enthält die wichtigsten Informationen zum Thema. | Enthält die wichtigsten Informationen zum Thema und ist nach Vorlage eines „echten“ Beratungspapiers gestaltet (Firmenloge, Referenzhinweise etc). |

Abbildung 55: Screenshot der Bewertungskriterien für Präsentation und Handout

6.2.2.3 WebQuest zu der Siliconbackform

Das *WebQuest* „Backform aus Siliconen - WebQuest zu Siliconelastomeren“ ist analog zu dem *WebQuest* „Silicone in Kosmetika“ aufgebaut und umfasst ebenfalls einen experimentellen Arbeitsauftrag (siehe Abbildung 56).

Es sollen die Eigenschaften von Siliconelastomeren mit Hinblick auf den Einsatz als Backform untersucht werden. Die Fragestellung umfasst eine Bewertungsaufgabe für eine Empfehlung zum Einsatz von Siliconen in Küchengeräten. Die SchülerInnen bearbeiten in der Rolle eines Beraters die fiktive Anfrage einer kleinen Firma, die Küchengeräte herstellt und dringend modernisieren sollte, wenn sie auf dem Markt bestehen möchte.

Die SchülerInnen setzen sich in den Gruppen *ChemikerInnen*, *WerkstoffwissenschaftlerInnen*, *ProduktentwicklerInnen* und *Umwelt- und VerbraucherschützerInnen* aus verschiedenen Blickwinkeln mit der Thematik auseinander.

Im Rahmen dieses *WebQuests* werden folgende Experimente eingebunden:

- Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - der Temperaturbeständigkeit (siehe Abschnitt 5.1.1)
- Vergleich von Silicon- und Naturkautschuk - Chemikalienbeständigkeit (siehe Abschnitt 5.1.2)
- Herstellung einer Abgussform mit dem Füllstoff Siliciumdioxid (siehe Abschnitt 5.2.1)
- Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Präzision (siehe Abschnitt 5.1.16)
- Vergleich von Alginat- und Siliconabformmasse - Schrumpfung (siehe Abschnitt 5.1.17)

Das *WebQuest* „Backform aus Siliconen - WebQuest zu Siliconelastomeren“ ist unter folgender URL zu finden: http://www.uni-frankfurt.de/60951415/920_WebQuest-Siliconbackformen (ehemals: <https://siliconchemie.wordpress.com/>).

6.2.2.4 Durchführung

Beide *WebQuests* wurden im November 2015 mit zwei Chemie-Leistungskursen der Q2-Phase der Internatsschule Schloss Hansenberg erprobt. Die Projekte wurden im Rahmen der NaWi-Tage der Schule als zweitägiges Projekt im Goethe-Schülerlabor durchgeführt. Ein Leistungskurs mit acht SchülerInnen bearbeitete das *WebQuest* „Silicone in Kosmetika“ und der zweite Leistungskurs mit zehn SchülerInnen bearbeitete das *WebQuest* „Backform aus Siliconen“.

Eine Erläuterung des Vorgehens bei der Bearbeitung eines solchen kurzen *WebQuests* und die Einführung in das Thema Silicone fand im Vorfeld in einer Doppelstunde in der Woche vor der Projektdurchführung statt. Es wurden organisatorische Fragen geklärt und eine Einteilung der

Goethe SchülerLabor

SILICONBACKFORMEN

WEBQUEST ZU SILICONELASTOMEREN

Ifbz Chemie
Universität Frankfurt/M.

Startseite [Einleitung](#) [Aufgabe](#) [Vorgehen](#) [Quellen](#) [Bewertung](#) [Fazit](#) [Impressum](#)

Herzlich Willkommen



zum WebQuest "Siliconbackform – WebQuest zu Siliconelastomeren".

Um dieses WebQuest zu beginnen, folgen Sie einfach den Schaltflächen in der oberen Zeile. Das WebQuest wird schrittweise beginnend mit der Einleitung bearbeitet. Nach einer Einführung in die Problemstellung kann die Aufteilung der Schülerinnen und Schüler in die Expertengruppen erfolgen. Nach einer Gruppenarbeitsphase (die sich flexibel aufteilen lässt) und Gelegenheit zum Experimentieren (falls gewünscht) sollte die Präsentation der Ergebnisse aller Gruppen das WebQuest abschließen. Es gibt auch die Möglichkeit zur Bewertung von Präsentation und Arbeit in den Schülergruppen.

Viel Spaß dabei!

Abbildung 56: Screenshot der Startseite des WebQuests zur Siliconbackform

Gruppen vorgenommen. Die SchülerInnen erhielten aber noch keinen Zugang zu dem zu bearbeitenden *WebQuest*, da zur Bearbeitung im Rahmen des Projekts zwei ganze Tage zur Verfügung standen.

Im Anschluss des Projekts fand eine Nachbearbeitung in der Schule statt, die ebenfalls eine Doppelstunde umfasste. Es fand eine theoretische Aufarbeitung der Eigenschaften der Stoffklasse der Silicone statt, die beispielhaft als eine Untergruppe von modernen Polymeren thematisiert wurden. Diese Thematik war für die SchülerInnen klausurrelevant, was ebenfalls zur Motivation beitrug. Allerdings trat dies im Verlauf des Projekts zugunsten des Interesses am Thema zurück. Dies war bei den SchülerInnen besonders ausgeprägt, die das *WebQuests* „Silicone in Kosmetika“ bearbeiteten.

6.2.2.5 Evaluation

Die Verständlichkeit der Experimentieranleitungen, die Anschaulichkeit und die Wahl der Alltagsgegenstände für die Experimente wurden gut bis sehr gut bewertet. Das eigenständige Arbeiten in der Gruppe wurde ebenfalls positiv bewertet, allerdings wurden die zur Verfügung gestellten Literaturquellen teils als zu schwierig eingeschätzt. Aus direkten Rückmeldungen im Abschlussgespräch war bekannt, dass sich dies auf die Gruppe der *ChemikerInnen* bezog. Dies hatte auch Auswirkungen auf die Bearbeitungszeit, so dass diese Gruppe ca. 20 min mehr Zeit benötigte. Dies wurde nachträglich verändert.

Nach einer Anpassung der Literaturquellen ist ein weiterer Durchgang des Projekts für November

2016 mit dem Kooperationspartner Internatsschule Schloss Hansenberg geplant.

6.2.3 Produktentwicklung eines Nagellacks

6.2.3.1 Theoretischer Hintergrund - Lernfirma

Das Konzept der *Lernfirma* stammt ursprünglich aus der beruflichen Bildung und fokussiert hier stark das Kennenlernen von Strukturen eines Unternehmens und das Erproben von Abläufen in betrieblichen Strukturen. Das Konstrukt wird inzwischen vermehrt für den Unterricht in allgemeinbildenden Schulen genutzt, da es sich lohnenswert in Unterrichtseinheiten mit experimentellem Anteil integrieren lässt [207], [208], [209].

Typische Lernziele sind das Kennenlernen von Unternehmensstrukturen und der Verzahnung der Tätigkeiten verschiedener Abteilungen eines Unternehmens zur Produktion und Vermarktung eines gemeinsamen Produkts. Dies impliziert die Zusammenarbeit in der eigenen Abteilung und zusätzlich auf einer weiteren Ebene im gesamten Unternehmen. Die SchülerInnen sollen aber auch mögliche Schwierigkeiten bei diesem kooperativen Prozess erkennen und entsprechend darauf reagieren können. Eine Problemstellung mit einem möglichst alltagsnahen Kontext soll dazu motivieren. Eine länger andauernde Motivation zur Beschäftigung mit einem Unterrichtsgegenstand verglichen mit konventionellen Unterrichtsmethoden ist bei verschiedenen Erprobungen bestätigt worden. Die hohe inhaltsbezogene Aktivität der SchülerInnen wird hier als ein maßgeblicher Grund angesehen [207].

Bei der Unterrichtsmethode der *Lernfirma* handelt sich um eine kooperative Unterrichtsform, die zur Förderung von Kommunikations- und Bewertungskompetenz der SchülerInnen eingesetzt werden kann. Die Unterrichtsform erfordert ein hohes Maß an Teamfähigkeit in der eigenen Gruppe, was je nach Konzeption auch darüber hinaus die gesamte Lerngruppe umfassen kann. Bei manchen Konzeptvorschlägen sind beide Ebenen zu finden [210], was mögliche Unternehmensstrukturen realitätsnahe abbildet. Dies lässt den Einsatz der Unterrichtsform in mit abgestuftem Schwierigkeitsgrad zu.

Die Teamarbeit schafft eine positive Abhängigkeit der SchülerInnen untereinander, was zu einem stärker kooperativen Handeln motiviert [209]. Die zu bearbeitende Problemstellung sollte möglichst offen sein, um eigenständiges Arbeiten beim Entwickeln von Lösungsstrategien zu ermöglichen. Bezogen auf den Chemieunterricht schließt dies auch das Experimentieren mit ein. Das experimentelle Vorgehen soll dabei maßgeblich von den SchülernInnen gesteuert werden und weniger wie das Abarbeiten von starren, vorgefertigten Experimenten vor sich gehen [207].

Die Unterrichtseinheit kann, muss aber nicht, multimedial unterstützt durchgeführt werden. Dies sollte immer in Betracht gezogen werden, da beispielsweise die Nutzung einer Lernplattform eine stark selbstgesteuerte Aktivität der SchülerInnen fördern kann. Bereitgestellte Materialien können

so auch außerhalb der Schule eingesehen und bearbeitet werden, was ein Anreiz für die Beschäftigung mit dem Unterrichtsgegenstand auch außerhalb der Unterrichtszeiten sein kann.

Bei den entwickelten Konzepten findet man oft eine Nachbildung von verschiedenen Abteilungen einer Firma in den einzelnen Arbeitsgruppen der SchülerInnen, die jeweils einer eigenen Fragestellung nachgehen. Diese kann für sich stehen und einen Teilaspekt einer Produktion thematisieren [207], [208], [209], sie kann aber auch mit den anderen Arbeitsgruppen zusammen zu der Herstellung eines gemeinsamen Produkts beitragen [210]. Witteck und Eilks haben hierzu mehrere Konzepte für die Sekundarstufe I entwickelt und mit Erfolg umgesetzt.

Nach dem Konzept der *Lernfirma* wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit eine Unterrichtseinheit zur Herstellung eines Nagellacks entwickelt. Dieses Projekt soll als sinnstiftender Rahmen für die Anwendung der experimentellen Vorschläge zur Untersuchung der Funktionen von Siliconen und Siliciumdioxid in einem Lack (siehe Abschnitt 5.2.3) dienen. Die Konzeption des Projekts wird nachfolgend vorgestellt.

6.2.3.2 Konzeption des Projekts

Die Unterrichtsmethode *der Lernfirma* wurde als passendes Konzept für eine Einbettung von Experimenten zur Herstellung eines Nagellacks und zur Untersuchung der Funktionen ausgewählter Inhaltsstoffe aus der Gruppe der Siliciumverbindungen angesehen. Es wurde dabei bewusst der alltagsnahe Nagellack aus der breiten Vielfalt der Lacke ausgewählt, da ein eindeutiger Bezug zur Alltagswelt der SchülerInnen erkennbar ist. Ein Nagellack kann nicht nur unter den gegebenen Bedingungen im Chemieunterricht gut synthetisiert und bearbeitet werden, es ergeben sich auch mehrere Möglichkeiten zur thematischen Eingliederung. Neben einer Schwerpunktsetzung auf den Siliconen in der Polymerchemie oder auf dem Siliciumdioxid in der angewandten Chemie kann auch eine Einbindung zum Thema Kosmetik erfolgen.

In der fiktiven *Lernfirma* bearbeiten die SchülerInnen eigenständig in kleinen Gruppen Aufgaben, die den Aufgabengebieten einzelner Abteilungen einer realen Firma nachempfunden sind. Dies sind Aufgabengebiete wie die experimentelle Arbeit im chemischen Labor, welche die Lackherstellung und die Qualitätskontrolle beinhaltet. Daneben sind weitere Aufgaben im Bereich Design und Marketing, sowie Unternehmenskommunikation angesiedelt. Auf diese Weise soll die Struktur eines Unternehmens, bzw. verschiedene miteinander im Zusammenhang stehende Tätigkeiten für die industrielle Produktentwicklung abgebildet werden. In Tabelle 24 sind die vier Teams mit ihren Aufgaben aufgelistet.

Die Einbettung der Experimente in eine nach kooperativem Lernen ausgelegte Lerneinheit nach

Tabelle 24: Arbeitsbereiche bei der Entwicklung eines Nagellacks in vier Teams

| Team | Aufgaben |
|----------------------|---|
| Forschung | Experimentelle Untersuchung der Wirkung ausgewählter Zusatzstoffe auf die Eigenschaften eines Lackes Recherche zur Funktion von Siliconen und Kieselsäuren in Lacken |
| Produktion | Herstellung eines Nagellacks unter Abstimmung mit Team Forschung Recherche zur Zusammensetzung von Lack-Systemen und Funktionen der Inhaltsstoffgruppen |
| Design und Marketing | Entwurf eines Nagellacks mit Flakon und Verpackung Entwicklung eines Fragebogens für die Marktanalyse |
| Kommunikation | Dokumentation der Arbeit jedes Teams Erstellung einer Präsentation aus Beiträgen jedes Teams |

dem Vorbild der *Lernfirma* soll durch die selbstständige Arbeit an einem sinnstiftenden Thema mit Bezug zur Lebenswelt der SchülerInnen die Motivation steigern. Gemäß dem Erwerb einer Scientific Literacy sollen die SchülerInnen durch den Chemieunterricht befähigt werden das erlernte fachwissenschaftliche Wissen als Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung von Themen aus dem Alltag zu nutzen [211]. Nach Menthe wird bei Anwendungsfeldern zur Steigerung von Bewertungskompetenz zwischen Themenfeldern für Alltagsentscheidungen und für gesellschaftliche Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund unterschieden [212].

Die Untersuchung der Funktionen von bestimmten Zusatzstoffen in Nagellack wäre in das Themenfeld Alltagsentscheidungen einzuordnen. Zusätzlich soll die multiperspektivische produktorientierte Themenstellung, die nicht nur chemische Inhalte berücksichtigt, insgesamt das Interesse der SchülerInnen am Fach Chemie fördern [11]. So können auch Schüler stärker angesprochen werden, die ihr Interesse an Chemie eher als gering einstufen würden [210].

Das Projekt ist so konzipiert, dass es im Rahmen des regulären Chemieunterrichts durchführbar ist und nicht notwendigerweise der methodischen Großform des Projektunterrichts vorbehalten ist. Die zweite Variante ist natürlich mit einer entsprechenden Adaption ebenso möglich. Die Lerneinheit umfasst 4-5 Unterrichtsstunden und ist mediengestützt aufgebaut. Alle notwendigen Arbeitsmaterialien sind online auf einer Website der Goethe-Universität unter der URL http://www.uni-frankfurt.de/60956102/930_WebQuest-Nagellack (ehemals <https://projektnagellack.wordpress>

.com) frei abrufbar. Die Materialien können online bearbeitet werden, stehen aber auch zum Download bereit, falls die Arbeit mit dem Computer eher eingeschränkt erfolgen soll. Der Aufbau der medialen Umgebung ist an den Aufbau eines WebQuest angelehnt (siehe Abschnitt 6.2.2.1). Alle Materialien sind in Anhang II aufgeführt.



Abbildung 57: Schematische Darstellung der Projektstruktur

Der Projektablauf orientiert sich an dem Vorschlag von Weßnig [210] (siehe Abbildung 57). In der Vorbereitungsphase können die SchülerInnen selbst wählen, in welcher Gruppe (siehe Tabelle 24) sie arbeiten möchten. Je nach Lerngruppe kann diese Einteilung auch von der Lehrkraft vorgenommen werden, allerdings ist es vorteilhafter, wenn die SchülerInnen dies selbst nach der Einschätzung ihres eigenen Interesses tun. Diese Wahl wird durch Informationsmaterial zum Hintergrund des entsprechenden beruflichen Aufgabenfeldes erleichtert. In einem kurzen Einleitungstext wird das reale Themenfeld im Hintergrund eines Aufgabengebietes eines Teams vorgestellt. Weiter werden Internetquellen zur Verfügung gestellt, welche beispielhaft Berufsbilder in diesem Arbeitsbereich genauer vorstellen. Abschließend gibt es einen Ausblick auf die Aufgaben des jeweiligen Teams.

Wenn sich eine Gruppe zusammengefunden hat, können die Vorbereitungsmaterialien mit einem fachlichen Schwerpunkt, ergänzt durch Quellenangaben zu weiterführenden Informationen, bearbeitet werden. Dies kann abhängig von der Art der Durchführung in Form einer Hausaufgabe oder zu Beginn eines Projekttagess durchgeführt werden.

In der Gruppenphase erfolgt zunächst eine Planung der Arbeitsschritte in den einzelnen Teams. Diese gliedert sich in zwei Arbeitsphasen, die von einer Pause unterbrochen oder auf mehrere Tage aufgeteilt werden kann. Zum Ende beider Arbeitsphasen haben die SchülerInnen die Gelegenheit innerhalb ihrer Gruppe in einer internen Feedbackrunde ihr Vorgehen und den bisherigen Fortschritt bei der Problemlösung zu reflektieren.

Jede Gruppe hat drei unterschiedliche Aufgaben zu bearbeiten. Es gibt immer eine vorbereitende Rechercheaufgabe, die einen Schwerpunkt des jeweiligen Themas stärker in den Vordergrund

stellt. Die Gruppe *Forschung* hat beispielsweise die Aufgabe, über die Funktionen von Siliconen und Siliciumdioxid in Lacken zu recherchieren und zu berichten. Die zweite Aufgabe nimmt anschließend den größten Anteil der Zeit zur Bearbeitung in Anspruch. Bei der Gruppe *Forschung* ist dies die experimentelle Untersuchung der Wirkung ausgewählter Zusatzstoffe auf die Eigenschaften eines Lackes.

Jede Gruppe stellt Informationen für eine Abschlusspräsentation zusammen, welche sowohl das Recherchethema als auch das Vorgehen beim Bearbeiten der zweiten Aufgabe und die dazugehörige Lösung wiedergeben. Die Gruppe *Kommunikation* sammelt diese Informationen und stellt sie in einem gemeinsamen Layout für eine Präsentation in der Feedback- und Abschlussrunde in der Phase Ergebnissicherung zusammen. Die vier Teams bearbeiten arbeitsteilig verschiedene Themengebiete und stellen sich diese in der Feedback- und Abschlussrunde vor. In dieser Phase ist auch Zeit zur Bewertung der Gruppenarbeitsphase.

Gemäß einer angemessenen didaktischen Elementarisierung ist die Erarbeitung von fachlichen Informationen zunächst so gehalten, dass die Funktionen von Siliconen und Siliciumdioxid zunächst auf einer phänomenologischen Ebene thematisiert werden. Dies ermöglicht auch einen Einsatz in der Sekundarstufe I oder an einer berufsbildenden Schule. Der Schwerpunkt sollte in diesem Fall bei den betrieblichen Abläufen liegen, was den Lernzielen in dualen Ausbildungsgängen näher kommt. Ebenso kann für einen Einsatz in der Sekundarstufe II die Chemie der Silicone und des Siliciumdioxids stärker in den Vordergrund rücken, was eine vertiefende Behandlung der chemischen Grundlagen ermöglicht.

6.2.3.3 Durchführung

Das Projekt wurde zweimal erfolgreich erprobt. Im ersten Durchgang fand die Durchführung im Juli 2015 an einer Berufsschule (Paul-Ehrlich-Schule) in Frankfurt am Main in zwei Klassen mit Auszubildenden Drogisten statt. Eine Lerngruppe umfasste 22 TeilnehmerInnen, die andere Lerngruppe 15 TeilnehmerInnen. In beiden Gruppen wurde das Projekt wie oben im Rahmen eines Projekttagess durchgeführt.

Ein dritter Durchgang fand im Februar 2016 mit 13 SchülerInnen eines Chemie-Leistungskurs der E-Phase der Internatsschule Schloss Hansenberg, ebenfalls in den Fachräumen der Schule, statt. Allerdings wurden nur Aufgaben von zwei der vier möglichen Teams bearbeitet, da viele SchülerInnen wegen Krankheit und einer kurzfristigen Änderung im Stundenplan nicht teilnehmen konnten. Es wurden nur die Aufgaben der Teams *Forschung* und *Produktion* bearbeitet. Das Projekt wurde daher nicht wie in Abschnitt 6.2.3.2 vorgestellt, sondern fokussierte das experimentelle Arbeiten zum Thema Nagellack. Trotzdem konnte dieser Durchgang zur Optimierung der Arbeitsphasen im Labor genutzt werden.

Es standen während der ersten Durchführung abzüglich der Pausen sechs Zeitstunden zur Bearbeitung zur Verfügung. Während dieser Zeit waren nicht nur die drei Aufgaben zu bearbeiten, sondern auch die Einarbeitung in das Projekt und das Lesen der Informationsmaterialien für die Gruppeneinteilung zu bewältigen. Im Anschluss wurde in der Feedback- und Abschlussrunde ein Fragebogen zur Evaluierung des Projektablaufs, der zur Verfügung gestellten Materialien und der Experimente von den SchülerInnen ausgefüllt.

Für die Teams *Forschung*, *Produktion*, sowie *Design und Marketing* war die zur Verfügung gestellte Zeit zur Bearbeitung der Aufgaben völlig ausreichend. Für das Team *Kommunikation* musste mehr Zeit für die Fertigstellung der Präsentation eingeplant werden. Dies erwies sich als ungünstig, da die überwiegende Mehrheit der SchülerInnen aus den übrigen drei Gruppen in dieser Zeit keinen Arbeitsauftrag hatte. Die Situation hatte sich so ergeben, weil das Team *Kommunikation* die Zusammenstellung und Gestaltung der Inhalte für die Kurzpräsentationen den Teams alleine überlassen und keinerlei Vorgaben gemacht hatte. So wurden die erforderlichen Informationen erst zum Ende der zweiten Arbeitsphase weitergereicht.

Für den zweiten Durchlauf wurde daraufhin die Aufgabenstellung für das Team *Kommunikation* dahingehend überarbeitet, dass zum Ende der ersten, bzw. zu Beginn der zweiten Arbeitsphase bereits im Gespräch geklärt werden sollte, welche Inhalte jedes Team für die Präsentation beisteuern soll. Dies sollte eine Vorbereitung der Folien, sowie eine Bereitstellung von Fotos zu einem früheren Zeitpunkt in der zweiten Arbeitsphase sicherstellen.

6.2.3.4 Evaluation

Die SchülerInnen der Paul-Ehrlich-Schule empfanden das eigenständige Arbeiten und den Austausch zwischen den Gruppen als sehr bereichernd. Es gestaltete sich so, dass weitergehende Ideen entwickelt wurden, die den zeitlichen Rahmen der Projektdurchführung überstiegen hätten.

Alle SchülerInnen hatten zuvor an der beruflichen Schule wenig Erfahrung mit der Arbeitsform der Gruppenarbeit gesammelt und nach eigenen Angaben in der allgemeinbildenden Schule im Chemieunterricht selbst wenig experimentiert. Dennoch haben die meisten SchülerInnen den Tag als motivierend und gewinnbringend wahrgenommen. So waren 89 % der Befragten mit dem Ergebnis der Arbeit ihres Teams voll zufrieden oder zufrieden. Mit der Bearbeitungszeit waren 77 % zufrieden.

Etwa die Hälfte der teilnehmenden SchülerInnen hatte vor der Durchführung des Projekts noch nichts über die Verwendung von Siliconen und Siliciumdioxid in Nagellacken gehört und gab an im Rahmen des Projekts mehr über die Zusammensetzung von Nagellacken und die Funktion der Inhaltsstoffe gelernt zu haben. Dies wurde von der überwiegenden Zahl der TeilnehmerInnen (70 %) als positiv im Sinne eines Wissenszuwachses mit Nutzen für den zukünftigen Beruf bewertet.

Die Rückmeldungen wurden zur Optimierung des Projekts genutzt.

Die Ergebnisse des dritten Durchgangs werden hier nicht wider gegeben, da das Projekt nicht vollständig durchgeführt wurde. Es wurden nur Aufgaben von zwei der vier Teams bearbeitet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nach einer ausführlichen Analyse der fachdidaktischen Literatur und ausgewählter Schulbücher der aktuelle Stand zur Thematisierung von Siliciumverbindungen und zur Einbindung in den Chemieunterricht dargestellt. Der Schwerpunkt der Arbeit lag bei der Entwicklung von experimentellen Zugängen zu ausgewählten Siliciumverbindungen mit einer hohen fachlichen und lebensweltlichen Bedeutung. Die Thematik der Siliciumchemie sollte angemessen für eine Umsetzung im Chemieunterricht an allgemeinbildenden Schulen weiter entwickelt werden.

Die Thematisierung von Siliciumverbindungen wird als notwendig erachtet, da die vielfältigen Verbindungen dieses Elements in vielen Produkten des täglichen Lebens zu finden sind und die SchülerInnen unbewusst jeden Tag mit solchen Produkten in Berührung kommen. Diese Vielfältigkeit und die weite Verbreitung im Alltag machen den gesamten Themenkomplex für den Chemieunterricht bedeutend.

Diese hohe Alltagsrelevanz legitimiert neben der damit verknüpften großen wirtschaftlichen Bedeutung eine Beschäftigung mit der Siliciumchemie im Rahmen der schulischen Bildung. Die gegenwärtig unverbindliche Thematisierung der Siliciumchemie im Unterricht wird der zunehmenden wirtschaftlichen Bedeutung und der verbreiteten Nutzung der Siliciumverbindungen im Alltag nicht gerecht. Es werden nur einzelne Teilbereiche in den verbindlichen Lehrplänen berücksichtigt.

Auf der Grundlage einer breiten Darstellung der fachdidaktischen Literatur erfolgte eine Auswahl didaktisch sinnvoller Bereiche der Siliciumverbindungen, die sich aufgrund ihrer Verbreitung im Alltag für einen Einsatz im Chemieunterricht eignen. Es wurden die Silicone, die Silica und am Rande auch das elementare Silicium in den Fokus der Arbeit gerückt, da in diesen Teilbereichen der Siliciumchemie viele innovative Entwicklungen in der aktuellen Forschung realisiert werden. Es lassen sich viele ansprechende Experimente erarbeiten, die mit schulexperimentellen Mitteln gut dargestellt werden können.

Innerhalb dieser Substanzklassen wurden nun geeigneten Alltagsgegenstände mit den geforderten Verbindungen für die experimentelle Entwicklung ausgewählt, da ein sinnstiftender Kontext für die SchülerInnen gegeben sein sollte. Dies eröffnet die Möglichkeit chemische Eigenschaften der Siliciumverbindungen anhand der Untersuchung von leicht verfügbaren und kostengünstigen Alltagsprodukten zu thematisieren. Dabei wurde auch der Bekanntheitsgrad von Alltagsgegenständen aus den ausgewählten Siliciumverbindungen bei Lehrkräften berücksichtigt.

Der Schwerpunkt der experimentellen Entwicklung lag bei den Siliconen und den Silica. Besonders ergiebig erwies sich die Einbettung in den Kontext der Bauchemie, sowie der Kosmetik. Es ging eine Vielzahl an Experimenten zur Untersuchung der Eigenschaften von kommerziell erhältlichen Alltagsgegenständen und an Modelleexperimenten zur Verdeutlichung der zugrunde liegenden Struktur-Eigenschafts-Beziehungen daraus hervor. Gerade in der Siliconchemie erwies sich die Umsetzung in ansprechenden Experimenten, die ein eindrucksvolles Ergebnis zeigen, aufgrund der Reaktionsträgheit der Silicone aber auch als anspruchsvoll.

Obwohl sie in erster Linie der Thematisierung der Siliciumchemie dienen, eignen sich einige experimentelle Ansätze zusätzlich als alternative Herangehensweisen zur Verdeutlichung von Sachverhalten, die bereits im Lehrplan verankert sind. Hier sind exemplarisch die Nachweisreaktionen zur Untersuchung der Eliminierungsprodukte von Silicindichtstoffen zu nennen. Diese eröffnen die Möglichkeit zur experimentellen Erarbeitung der Polykondensation als eine der drei Polymerisationsreaktionen anhand eines bekannten Alltagsprodukts, was eine Alternative zu klassischen Experimenten, wie der Grenzflächenpolymerisation von Nylon, darstellt. Die Nachweisreaktionen von Eliminierungsprodukten verschiedener Silicindichtstoffe bieten Anknüpfungspunkte an die Redoxchemie, sowie an das Themenfeld zu Säuren und Basen.

Weiterhin kann am Beispiel der Silicone auch die stark in den Fokus der Öffentlichkeit gerückte Problematik des Recyclings von Polymeren thematisiert werden. Eine kurze Versuchsreihe zur Wiederverwertung durch Downcycling durch Synthese der sogenannten „Intelligente Knete“ bietet diese Möglichkeit.

Anhand der nach einer DIN-Norm erweiterten Nachweisreaktion für lösliche Silica ist nicht nur der Nachweis in Alltagsprodukten, wie der Zahncreme, möglich. Die Nachweisreaktion kann auch in das Themenfeld der Komplexchemie eingebunden werden.

Weiter können Aspekte der Säure-Base-Chemie im Kontext der Verarbeitung von elementarem Silicium thematisiert werden. Dies betrifft besonders die Definition der Säurestärke und kann zur Thematisierung von Recycling von Silicium in elektronischen Bauteilen leiten.

Die Siliciumverbindungen lassen sich analog zu gängigen Unterteilungen in der organischen Chemie in verschiedene Gruppen und Untergruppen bezüglich ihres strukturellen Aufbaus und der resultierenden chemischen Eigenschaften einteilen. Es wäre daher leicht möglich eine vergleichbare Bearbeitung einzelner Teilbereich analog zur organischen Chemie, allerdings in einem kleineren Maßstab, im Unterricht durchzuführen. Bei einer Orientierung an bereits verbindlichen Lehrplaninhalten über geeignete Experimente kann die Thematisierung einzelner Gruppen von Siliciumverbindungen curricular fortschreitend eingebunden werden.

Die breit gefächerten experimentellen Ansätze wurden bei Vorträgen, Lehrerfortbildungen und Projekten im Schülerlabor vorgestellt und erprobt. Die erarbeiteten Inhalte wurden seitens der Schulpraktiker mit einer großen Akzeptanz und dem Wunsch zur Eingliederung in den eigenen Unterricht aufgenommen, was sich mit dem hohen Alltagsbezug und der einfachen Umsetzung begründen lässt.

Die Fortbildungen „Silicone - Polymerchemie zwischen Anorganik und Organik“ und „Kosmetik - Untersuchung von Zusatzstoffen“ konnten mehrfach erfolgreich durchgeführt werden. Die „jüngste“ Fortbildung „Siliciumchemie im Alltag“ wurde bisher nur einmal getestet. Es stehen noch weitere, bereits geplante Durchgänge zur Erweiterung und Optimierung aus.

Die Erprobung mit SchülerInnen erfolgte in Form von mediengestützten Unterrichtseinheiten im Goethe-Schülerlabor, sowie in den Fachräumen der kooperierenden Schulen. Die Experimente wurden von aktuellen Kontexten eingebettet angeboten und können in dieser Projektform sinnvoll in den Chemieunterricht integriert werden.

Es wurde ein breites Spektrum an Experimenten entwickelt, das verschiedene Bereiche der Siliciumchemie aufgreift. Dieses ist auch weiterhin ausbaufähig, da einige Aspekte bisher nur exemplarisch erschlossen wurden. Es ist eine Erweiterung des experimentellen Repertoires angedacht.

Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang eine Erweiterung der Ätzreaktion an Silicium zu einer Versuchsreihe zum Recycling von siliciumhaltigen elektronischen Bauteilen, wie beispielsweise Solarzellen. Hier sollen Modellexperimente unter Berücksichtigung gängiger experimenteller Verfahren aus der Festkörperchemie entwickelt werden.

Im Bereich der Siliconchemie sollen Ergebnisse aus der aktuellen Forschung zu Siliconen, die UV-induzierte Vernetzungsreaktionen eingehen, aufgegriffen und für eine Umsetzung in einem für die Schule geeigneten Rahmen aufbereitet werden.

Die Lehrerfortbildungen sollten ebenfalls fortgesetzt werden, was sich besonders auf die Fortbildung zu einem Überblick über die Siliciumchemie bezieht, die bisher nur einmal getestet werden konnte. Dieses Szenario eignet sich auch für eine Übertragung in ein Projekt im Schülerlabor in einem geeigneten Rahmen. In einer sich anschließenden empirischen Studie könnten Hypothesen zum Wissenstand der SchülerInnen über das Gesamtbild der Siliciumchemie mit seinen Quervernetzungen geprüft werden.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----|---|-----|
| 1 | Inhalte der Kapitel im Überblick | 6 |
| 2 | Übersicht über die industriell wichtigsten Untergruppen der Siliciumchemie | 9 |
| 3 | Strukturformel eines Polydimethylsiloxans (oben) und eines Polyethersiloxans (unten) | 11 |
| 4 | Einteilung der Siliconelastomere anhand der Vernetzungsreaktion nach [9, S.1132] | 12 |
| 5 | Polykondensation des Acetoxy-Silicondichtstoffs verändert nach [9, S.1148] | 19 |
| 6 | Reaktionsschema für eine Polyaddition nach RTV-2 mit Platin-Katalysator nach [14, S.47] | 21 |
| 7 | Backform aus einem Siliconelastomer | 21 |
| 8 | Übersicht der Substanzen hinter dem Sammelbegriff Silica nach [16, S.123], [38, S.850] | 24 |
| 9 | Inhaltsstoffe einer Zahncreme verändert nach [47] | 27 |
| 10 | Haarshampoo mit dem Werbeaufkleber "ohne Silikone" | 36 |
| 11 | IR-Spektrum des äquilibrierten Siliconöls aus dem Dichtstoff | 69 |
| 12 | IR-Spektrum des Verbrennungsrückstand des äquilibrierten Siliconöls | 70 |
| 13 | im Standzylinder: Acetoxy-Dichtstoff (sauer), Alkoxy-Dichtstoff (neutral), Amin-Dichtstoff (basisch) (von links nach rechts); im Agar-agar: Alkoxy-Dichtstoff (neutral), Acetoxy-Dichtstoff (sauer), Amin-Dichtstoff (basisch)(von links nach rechts) | 96 |
| 14 | negativer Nachweis, positiver Nachweis, Alkoxy-Dichtstoff (von links nach rechts) | 98 |
| 15 | positiver Nachweis mit Alkoxy-Dichtstoff (links), negativer Nachweis mit Amin-Dichtstoff (rechts) | 100 |
| 16 | Mechanismus der Chromotropsäure-Reaktion zum Nachweis von Formaldehyd | 101 |
| 17 | Vergleichsprobe mit Essigsäure, sauer vernetzender Silicondichtstoff in dest. Wasser und Blindprobe mit dest. Wasser (von links nach rechts) | 103 |

| | | |
|----|--|-----|
| 18 | Skizze der Wechselwirkungen zwischen einem aminofunktionellen Silicon und einer Baumwollfaser (verändert nach [185, S.15]) | 105 |
| 19 | Wassertropfen auf mit Silcondichtstoff beschichteter Baumwolle | 106 |
| 20 | Baumwolle, beschichtet mit Silcondichtstoff, beschichtet mit Wetsoft CTA und unbehandelt nach dem Abwischen des Rote-Beete-Safts (von links nach rechts) | 107 |
| 21 | Skizze des Versuchsaufbaus zur qualitativen Überprüfung der Durchlässigkeit für Wasserdampf | 108 |
| 22 | Strukturformel der Alginsäure | 114 |
| 23 | Schematische Darstellung der Einlagerungsverbindung von Calciumionen in Alginat | 115 |
| 24 | Schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Siliconentschäumers [14, S.39] | 117 |
| 25 | Verseifung eines Triglycerids | 121 |
| 26 | Depolymerisation eines Silicons unter basischen Bedingungen | 121 |
| 27 | Sand mit hydrophober Beschichtung in Wasser | 126 |
| 28 | Schematische Darstellung der Verdrängung von Tensidmolekülen im Schaum durch Siliconpolymere | 127 |
| 29 | unbehandeltes Lipgloss (links), Lipgloss mit Siliconzusatz (rechts) | 129 |
| 30 | Haarsträhnen, gewaschen mit siliconhaltigem und mit siliconfreiem Shampoo (von links nach rechts) | 130 |
| 31 | siliconfreie Wimperntusche (links), siliconhaltige Wimperntusche (rechts) | 132 |
| 32 | verwischter siliconhaltiger Deostift (links), verwischter siliconfreier Deostift (rechts) | 134 |
| 33 | unbehandelter, selbst hergestellter Lack, Lack mit Zusatz von Siliciumdioxid, Lack mit Zusatz von Siliconöl (1 Tropfen) (von links nach rechts) | 137 |
| 34 | Basislack, Zusatz von 0,5 g Siliconharz, Zusatz von 0,05 g und von 0,1 g Siliciumdioxid (von links nach rechts) | 139 |

| | | |
|----|--|-----|
| 35 | Skizze des Strahlengangs von reflektiertem Licht (links: glatte Oberfläche, rechts: unregelmäßige Oberfläche) | 139 |
| 36 | Blindprobe mit dest. Wasser (links), positiver Nachweis mit Leitungswasser (rechts) | 142 |
| 37 | Blindwert und Proben der Eichlösungen mit steigender Konzentration nach erfolgreicher Reaktion (von links nach rechts) | 146 |
| 38 | Probenlösung von <i>Selters Naturell</i> , <i>Gerolsteiner Naturell</i> , <i>Staatl. Fachingen</i> und zwei verschiedenen Leitungswasser (von links nach rechts) | 146 |
| 39 | unbehandelte Aluminiumfolie als Blindprobe, Behandlung mit der Zahncreme <i>Ajona</i> [®] <i>Stomaticum</i> , Behandlung mit der Zahncreme <i>Colgate</i> [®] <i>Sensation White Zahncreme</i> (von links nach rechts) | 151 |
| 40 | Herstellung von Gips-Rohlingen für den maschinellen Abrieb: Gukoring als Gussform, Darstellung der aneinander angepassten Gukoringen, Gipsrohling in Form eines Kegelstumpfs, Gips-Rohling im großen Gukoring für den Versuchsaufbau (von links nach rechts) | 152 |
| 41 | Versuchsaufbau mit Akkuschauber, genauerer Blick auf den Schleifaufsatz und auf den Teil des Aufbaus auf der Laborwaage (von links nach rechts) | 153 |
| 42 | Probenlösung mit dem Abrieb des feinkörnigen und des grobkörnigen Schleifpapiers (von li nach re) | 154 |
| 43 | unbehandelter Zement (links), Zement mit pyrogener Kieselsäure (1 Gew.-%) (rechts) | 156 |
| 44 | Temperaturverlauf beim Erwärmen der Vergleichsprobe (rot) und der Zementprobe mit Kieselsäure und gemörsertem Silicat-Katzenstreu (blau) | 158 |
| 45 | Schematische Darstellung der Bearbeitungsschritte eines Silicium-Wafers bei einem Ätzvorgang nach [194, S.22] | 161 |
| 46 | unbehandeltes Bruchstück eines Silicium-Einkristalls, nach 30 min in 80°C warmer Natriumhydroxid-Lösung (rechts) | 162 |
| 47 | unbehandeltes Bruchstück einer polykristallinen Solarzelle (links), nach 5 min in 80°C warmer Natriumhydroxid-Lösung (rechts) | 163 |

| | | |
|----|---|-----|
| 48 | nach dem Abschleifen (links), nach 30 min in 80°C warmer Natriumhydroxid-Lösung (rechts) | 163 |
| 49 | Apparatur zur in-situ-Erzeugung von Fluorwasserstoff | 164 |
| 50 | Ätzvorgang im Schnappdeckelglas (links), geätztes Deckplättchen aus dem Mikroskopierbedarf (rechts) | 166 |
| 51 | Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit von elementarem Silicium | 167 |
| 52 | Screenshot der fiktiven Problemstellung in der Einleitung | 180 |
| 53 | Screenshot der Aufgabenstellungen, hier für die Gruppe der ChemikerInnen | 180 |
| 54 | Screenshot der Quellen für die Gruppe der Chemiker | 182 |
| 55 | Screenshot der Bewertungskriterien für Präsentation und Handout | 183 |
| 56 | Screenshot der Startseite des WebQuests zur Siliconbackform | 185 |
| 57 | Schematische Darstellung der Projektstruktur | 189 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Struktureinheiten zum Aufbau von Polysiloxanen (mit R = -CH ₃ und X = -OH) nach [9, S.1183] | 13 |
| 2 | Anwendungsmöglichkeiten von Siliconen in Kosmetikprodukten (ergänzt nach [15, S.140]) | 17 |
| 3 | Auswahl verschiedener Vernetzungssysteme von Silicondichtstoffen nach [9, S.1150] | 20 |
| 4 | Experimente mit Zuordnung zu Lehrplaninhalten | 39 |
| 5 | Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Siliconen in der fachdidaktischen Literatur | 46 |
| 6 | Silicone in Schulbüchern | 47 |
| 7 | Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Silica in der fachdidaktischen Literatur | 48 |
| 8 | Silica in Schulbüchern | 49 |
| 9 | Auswahl von experimentellen Ansätzen zu elementarem Silicium in der fachdidaktischen Literatur | 51 |
| 10 | Silicium in Schulbüchern | 51 |
| 11 | Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Glas in der fachdidaktischen Literatur | 52 |
| 12 | Glas in Schulbüchern | 53 |
| 13 | Auswahl von experimentellen Ansätzen zu Wasserglas in der fachdidaktischen Literatur | 53 |
| 14 | Wasserglas in Schulbüchern | 54 |
| 15 | Experimentelle Ansätze zu Silicaten in der fachdidaktischen Literatur | 55 |
| 16 | Silicate in Schulbüchern | 55 |
| 17 | Aussagen der Umfrageteilnehmer zu Siliconen im Alltag | 58 |
| 18 | Aussagen der Umfrageteilnehmer zu Silicium im Alltag | 59 |

| | |
|---|-----|
| 19 Aussagen der Umfrageteilnehmer zu Silica im Alltag | 59 |
| 20 Ausflusszeit (Mittelwert aus drei Durchgängen) eines Mineral- und eines Siliconöls bei 0°C, bei Raumtemperatur und bei 120 °C) | 124 |
| 21 Vergleich der Konzentrationsbestimmung mittels Photometrie und RGB-App | 147 |
| 22 Mengenverhältnisse zum Anmischen der vier Zement-Siliciumdioxid-Mischungen mit unterschiedlichen Wasservolumina | 155 |
| 23 Mögliche Volumenverhältnisse bei der Variation der Gelbildung | 160 |
| 24 Arbeitsbereiche bei der Entwicklung eines Nagellacks in vier Teams | 188 |

Literaturverzeichnis

- [1] Hessisches Kultusministerium. Lehrplan Chemie: Gymnasialer Bildungsgang, Jahrgangsstufen 7G bis 9G und gymnasiale Oberstufe, 2010.
- [2] GDCh. Empfehlungen der Studienreformkommission zum Studium Lehramt Chemie an Gymnasien und vergleichbaren Schulformen. Frankfurt am Main, 2001.
- [3] V. Müller. Alltagsorientierter Chemieunterricht. *NiU-C*, (24):40–43, 1994.
- [4] Ilka Parchmann and Bernd Ralle. Chemie im Kontext: Eine Konzeption zum Aufbau und zur Aktivierung fachsystematischer Strukturen lebensweltorientierter Fragestellungen. *MNU*, 53(3):132–137, 2000.
- [5] Alfred Freissmuth, J. Dietl, D. Helmreich, and E. Sirtl. Silicium. In Ernst Bartholomé, Wolfgang Gehartz, and Hertha Buchholz-Meisenheimer, editors, *Schwefel Bis Sprengstoffe*, volume 21 of *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*, pages 417–428. Verlag Chemie, Weinheim, 1982.
- [6] Friedhelm Kober. Komplexbildner in Waschmitteln. *PdN-Ch.*, 37(2):18–21, 1988.
- [7] Arnold F. Holleman. *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. de Gruyter, Berlin, 101., verb. und stark erw. aufl. / von nils wiberg edition, 1995.
- [8] Manfred Wick, Gerhard Kreis, and Franz-Heinrich Kreuzer. Silicone. In Ernst Bartholomé, Wolfgang Gehartz, and Hertha Buchholz-Meisenheimer, editors, *Schwefel Bis Sprengstoffe*, volume 21 of *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*, pages 511–540. Verlag Chemie, Weinheim, 1982.
- [9] Bernd Pachaly, Frank Achenbach, Christian Herzig, and Konrad Mautner. Silicone. In Roland Dittmeyer, Wilhelm Keim, Gerhard Kreysa, and Alfred Oberholz, editors, *Organische Zwischenverbindungen, Polymere*, volume 5 of *Winnacker-Küchler: Chemische Technik: Prozesse und Produkte*, pages 1095–1213. Wiley-VCH, Weinheim, 2004-2006.
- [10] Eugene G. Rochow. *Einführung in die Chemie der Silikone*. Verlag Chemie, Weinheim, 1952.
- [11] K. Feldner. Chemie und Technologie der Direktsynthese. In G. Schulze M. Weis J. (Hrsg.) Koerner, editor, *Silicone*, pages 9–22. Vulkan-Verlag, 1989.
- [12] G. Koerner. Einführende Bemerkungen über die Besonderheiten der Silicon-Chemie. In G. Schulze M. Weis J. (Hrsg.) Koerner, editor, *Silicone*, pages 1–7. Vulkan-Verlag, 1989.

- [13] J. Burkhardt. Chemie und Technologie der Polysiloxane. In G. Schulze M. Weis J. (Hrsg.) Koerner, editor, *Silicone*, pages 23–38. Vulkan-Verlag, 1989.
- [14] Andreas Tomanek. *Silicone & Technik: Ein Kompendium für Praxis, Lehre und Selbststudium*. Hanser, München, 1990.
- [15] Sabine Ellsäßer. *Körperpflegekunde und Kosmetik: Ein Lehrbuch für die PTA-Ausbildung und die Beratung in der Apothekenpraxis*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2. überarb. und erw. aufl edition, 2008.
- [16] F. und A. Burczyk. *Kosmetik-Lexikon: Nutzen und Risiken kosmetischer Grund- und Inhaltsstoffe*. Ehrenwirt, München, 1989.
- [17] Wacker Chemie AG. Simply beautiful. A guide for silicones for the cosmetics industry: Belsil, 2015.
- [18] Marina Bährle-Rapp. *Springer Lexikon Kosmetik und Körperpflege*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 4. auflage edition, 2012.
- [19] Jutta Brückmann. *Basiswissen, Arbeitsmaterial Körperpflegemittel: Klasse 7 bis 13*. Offener Unterricht : Chemie, Biologie. Klett, Stuttgart, 1. aufl edition, 2003.
- [20] Wacker Chemie AG. Leistungsfähige Siliconlösungen für technische Textilien, 2015.
- [21] Manfred Pröbster. *Baudichtstoffe: Erfolgreich Fugen abdichten*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 3. auflage edition, 2016.
- [22] peter breeck. TI-Probau Sanitaer Silikon: Technisches Datenblatt, 2012.
- [23] peter breeck. TI-Probau Naturstein Silikon: Technisches Datenblatt, 2012.
- [24] W. Hechtl. Chemie und Technologie des kalthärtenden Siliconkautschuks. In G. Schulze M. Weis J. (Hrsg.) Koerner, editor, *Silicone*, pages 49–64. Vulkan-Verlag, 1989.
- [25] A. J. Chalk and J. F. Harrod. Homogeneous catalysis II. The mechanism of the hydrosilation of olefins catalyzed by group VIII metal complexes. *J.Am.Chem.Soc.*, (87):16–21, 1965.
- [26] Shigeyoshi Sakaki, Nobuteru Mizoe, and Manabu Sugimoto. Theoretical study of platinum(0)-catalyzed hydrosilylation of ethylene. Chalk-Harrod mechanism or modified Chalk-Harrod mechanism. *Organometallics*, (17):2510–2523, 1998.
- [27] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Lebensmittel-, Bedarfsgegenstände- und Futtermittelgesetzbuch: LFGB.

- [28] Wacker Chemie AG. Fest- und Flüssigkautschuk - Der Leitfaden für die Praxis, 2014.
- [29] Bachblechbeschichtungen - Intelligente Lösungen für mehr Effizienz, 2011.
- [30] Fabia Denninger, editor. *Lexikon technische Textilien*. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2009.
- [31] Uta-Maria Groth. Visionen der Bekleidungsindustrie. In Petra Knecht, editor, *Funktionstextilien*, pages 269–274. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2003.
- [32] Karl Heinz Umbach. Die physiologische Funktion der Bekleidung. In Petra Knecht, editor, *Funktionstextilien*, pages 43–56. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2003.
- [33] Ulrike Luckmann. Der lange Weg von der Idee zum multifunktionellen Textilprodukt. In Petra Knecht, editor, *Funktionstextilien*, pages 33–42. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2003.
- [34] Joachim Lorsbach. Schutzbekleidung. In Petra Knecht, editor, *Technische Textilien*, pages 379–398. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2006.
- [35] Petra Gottwald. Ausrüstung von Technischen Textilien. In Petra Knecht, editor, *Technische Textilien*, pages 67–82. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2006.
- [36] Reinhold Schneider. Die Bedeutung von Ausrüstung. In Petra Knecht, editor, *Funktionstextilien*, pages 69–80. Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2003.
- [37] Wacker Chemie AG. Wacker Siliconeöle AK, Januar.
- [38] Kerner, Dieter, Norbert Schall, Wolfgang Schmidt, Ralf Schmoll, and Jost Schütz. Siliciumverbindungen. In Roland Dittmeyer, Wilhelm Keim, Gerhard Kreysa, and Alfred Oberholz, editors, *Anorganische Grundstoffe, Zwischenprodukte*, volume 3 of *Winnacker-Küchler: Chemische Technik: Prozesse und Produkte*, pages 803–890. Wiley-VCH, Weinheim, 2004–2006.
- [39] Wacker Chemie AG. HDK Pyrogene Kieselsäure - Beschichtungen und Druckfarben, 2006.
- [40] Rudolf Weiss, Siegfried Paschen, Peter Schober, Gerhard Merz, Hans-Ulrich Schlimper, Horst Ferch, Alfons Kreher, and Silke Habersang. Siliciumdioxid. In Ernst Bartholomé, Wolfgang Gehartz, and Hertha Buchholz-Meisenheimer, editors, *Schwefel Bis Sprengstoffe*, volume 21 of *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*, pages 439–476. Verlag Chemie, Weinheim, 1982.

- [41] Detlev Koth and Horst Ferch. Eigenschaften hochtemperaturhydrolytisch hergestellter Kieselsäuren und Metalloxide für Katalysatoren. *Chemie Ingenieur Technik*, 52(8):628–634, 1980.
- [42] Christopher Wortmann, Fabian Dettmer, and Frank Steiner. Die Chemie des Reifens. *Chemie in unserer Zeit*, 47(5):300–309, 2013.
- [43] Hans Jörg Fahrner. *Grund- und Fachkenntnisse für Maler- und Lackierer: Mit vielen Merk-sätzen, Aufgaben, Versuchen, Projekten*. Handwerk und Technik, Hamburg, 2001.
- [44] p2 Cosmetics. Ultimate Matte Top Coat, 2016.
- [45] essence. nail art cracking top coat, 2016.
- [46] Dieter Meschede. *Gerthsen Physik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 24. auflage edition, 2010.
- [47] Henning Steff, Mara Buchwald, and Katrin Sommer. Warum der Pharao nicht lächelte... Das Thema Zahnpflege im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *NiU-C*, 24(137):18–23, 2013.
- [48] Dieter Wundram. *Kosmetik: Chemie auf Haut und Haaren*. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1988.
- [49] C. Zantner and A. M. Kielbassa. Wie wirksam sind Weißmacher-Zahnpasten? *Oralprophy-laxe*, 24(1):23–29, 2002.
- [50] Verein Deutsche Zementwerke. *Zement: Taschenbuch 2002*. Verlag Bau + Technik, Düs-seldorf, 50 edition, 2002.
- [51] Evonik Industries. Technische Information 1398: AEROSIL®[®], AEROXIDE®[®] und SIPERNAT®[®] für die Baustoffindustrie, 09/2013.
- [52] Hans Joachim Bader and Viviane Hoßfeld. Zement, Beton und Leichtbeton: Schulexperi-mente zum Thema Baustoffe. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 26(150):11–15, 2015.
- [53] Herbert Jacob. Reinstsilicium: Grundwerkstoff der Mikroelektronik und Solartechnik. *NiU-C*, 2(10):9–17, 1991.
- [54] Guido Wenski, Georg Hohl, Peter Storck, and Ivo Crößmann. Die Herstellung von Reinst-siliciumscheiben: Mehr Chemie als man glaubt. *Chemie in unserer Zeit*, 37(3):198–208, 2003.

- [55] Philip Hofmann. *Einführung in die Festkörperphysik*. Wiley-VCH-Verl., Weinheim, 2013.
- [56] Abt. B1.2 BGR. Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe - Silizium, 2014.
- [57] Walter Schumann. *Edelsteine und Schmucksteine: Alle Arten und Varietäten der Welt ; 1600 Einzelstücke*. Blv, München, 13. Aufl. edition, 2002.
- [58] Matthias Drieß. Mehrfachbindungen zwischen schweren Hauptgruppenelementen? Von der klassischen pi-Bindung zu strukturchemischem Neuland. *Chemie in unserer Zeit*, 27(3):141–148, 1993.
- [59] Rudolf Janoschek. Kohlenstoff und Silicium - wie verschieden können homologe Elemente sein? *Chemie in unserer Zeit*, 22(4):128–138, 1988.
- [60] Manfred Weidenbruch. Doppelbindungen in der 4.Hauptgruppe: Der lange Weg von Ethenen zu Diplumbenen. *Chemkon*, 7(2):69–72, 2000.
- [61] Michael J. Owen. Why Silicon?, 2012.
- [62] Wolfgang Gräber. Interesse am Unterrichtsfach Chemie, an Inhalten und Tätigkeiten. *Chemie in der Schule*, 39(10):354–358, 1992.
- [63] The Nielsen Company. Umsatz mit Männerkosmetik, 2009.
- [64] Bernhard Sieve. Chemie mit Haut und Haaren - Experimente zum Thema Kosmetik. *PdN-Ch.*, 48(5):40–44, 1999.
- [65] Hessisches Kultusministerium. Lehrplan Chemie: Gymnasialer Bildungsgang, Jahrgangsstufen 8 bis 13.
- [66] P. Böttinger. Einblick in die Chemie der Silicone. *PdN-Ch.*, 1978(7):2–11.
- [67] Harold Hausman. Silicon organics. *Journal of Chemical Education*, 23(1):16–21, 1946.
- [68] Spalding, David, P. Lecture demonstrations with silicones. *Journal of Chemical Education*, 29(6):288–289, 1952.
- [69] Hugo Körperth. Silicone. In Franz Bukatsch and Wolfgang Glöckner, editors, *Experimentelle Schulchemie*, pages 87–101. Aulis-Verlag Deubner, Köln, 1976.
- [70] A. Tomanek. Silicone. *NiU-C*, 2(10):33–37, 1991.
- [71] W. Wies J. Held. Silicone: "Alleskönner" unter den Werkstoffen. *PdN-ChiS*, (7):20–26, 2002.

- [72] A. Held. Silicone: Verbindungen, die uns täglich begegnen. *PdN-ChiS*, 51(7):15–20, 2002.
- [73] Burkhard Standke. Permanenter Graffitienschutz: Zur Wirkung nanoskaliger, organofunktionaler Silan-Systeme. *MNU*, 59(8):452–457, 2006.
- [74] Jessica X. H. Wong and Hua-Zhong Yu. Preparation of Transparent Superhydrophobic Glass Slides: Demonstration of Surface Chemistry Characteristics. *Journal of Chemical Education*, 90(9):1203–1206, 2013.
- [75] M. Tausch, S. Krees, M. Anton, K. Hock, J. Zdzieblo, and A. Bader. Experimentieren mit Siliconen und Cyclodextrinen: Schulversuche mit Wacker-Produkten, 2007.
- [76] Peter Habitz, Heinrich Puff, and Otto Schmitz-DuMont. *Chemische Unterrichtsversuche*. Steinkopff, Darmstadt, 1979.
- [77] Viktor Obendrauf. CVD - Chemical Vapour Deposition: Microscale - Modellexperimente mit Monosilan. *PdN-ChiS*, 54(2005):43–47.
- [78] M. Tausch M. W. Seesing. Silicone im Unterricht: Hydrolyse von Chlormethylsilanen. *PdN-ChiS*, (7):15–20, 2002.
- [79] Helmut Koch and Hans Kappeler. *Chemische Experimente zur organischen Chemie und zum Umweltschutz*. Diesterweg, Frankfurt am Main, 1981.
- [80] Michael W. Tausch. Didaktische Silicon-Dokumentation.
- [81] W. Hardam. Erste Begegnung mit Siliconen. *PdN-ChiS*, (7):12–14, 2002.
- [82] Georg Wagner. *Chemie in faszinierenden Experimenten*. Aulis, Köln, 5 edition, 1984.
- [83] D. A. Katz. Chemie im Spielwarengeschäft: Magic Sand. *PdN-ChiS*, 5:36, 2001.
- [84] Beate Drechsler-Köhler, Günter Wagner, Uwe Gessner, and Jens Salzner. Arzneimittel und Chemie: Unterrichtsmaterialien für einen zeitgemäßen Chemieunterricht. 2001.
- [85] Walter Wagner. Experimente in Zusammenhang mit dem Silicon-Koffer von Wacker, 2007.
- [86] Ludwig Kotter. Schauminhibierung bei synthetischen Waschmitteln. *PdN-ChiS*, (8):205–209, 1979.
- [87] Simone Krees. CHEM2DO - Experimentieren mit Siliconen und Cyclodextrinen. *PdN-ChiS*, (8):44–45, 2012.

- [88] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Octamethylcyclotetrasiloxan (D4), 2001.
- [89] Wolfgang Asselborn, editor. *Chemie heute: [Gesamtband]*. Schroedel Schulbuchverlag, Hannover, [allg. ausg.] 2001, druck a 7 edition, 2006.
- [90] Wolfgang Asselborn and Rosemarie Förster. *Chemie heute: S II [Sekundarbereich 2] : Gesamtband*. Schroedel, Braunschweig, 2010.
- [91] Wolfgang Asselborn and Manfred Jäckel, editors. *Chemie heute / Sekundarbereich II*. Schroedel, Hannover, 1 edition, 1998.
- [92] Thomas Bitter, Ursula Boberlin, and Anette Riederer. *Elemente Chemie II: Unterrichtswerk für die Sekundarstufe II*. Klett, Stuttgart, 2000.
- [93] Thomas Bitter, Bettina Sommer, and Alfred (Red.) Tompert. *Elemente Chemie*. Klett, Stuttgart, 1. aufl., edition, 2010.
- [94] Reinhard Demuth, Ilka Parchmann, and Bernd Ralle, editors. *Chemie im Kontext: Sekundarstufe II ; [Kontexte, Medien, Basiskonzepte ; mit CD]*. Cornelsen, Berlin, [ausg. westliche bundesländer], 1. aufl., 1. dr edition, 2006.
- [95] Manfred Jäckel and Karl T. Risch, editors. *Chemie heute*. Schroedel-Schulbuchverl., Hannover, druck a,5 edition, 1991.
- [96] Felix Wöhrle and Sonja Dressendörfer. Chromatographie mit Kieselgel. *NiU-C*, (15):218–220, 1992.
- [97] Helmut Boeck. *Anorganische Chemie*, volume 1 of *Chemische Schulexperimente*. Volk-und-Wissen-Verl, Berlin, 1 edition, 1998.
- [98] Karl Häusler, Heribert Rampf, and Roland Reichelt. *Experimente für den Chemieunterricht: Mit einer Einführung in die Labortechnik*. Oldenbourg, München, 1 edition, 1991.
- [99] Walter Fischer and Albert Fuhrmann. *Schülerübungen Chemie 2*. Buchner, Bamberg, 1 edition, 1983.
- [100] Helmut Boeck. *Chemische Schulexperimente*. Deutsch, Thun and Frankfurt/M, 1978.
- [101] Helmut Stapf, Eberhard Rossa, Albert Hradetsky, Hans Keune, Rudi Kuhnert, Helmut Boeck, and Helmut Herbig. *Chemische Schulversuche: Eine Anleitung für den Lehrer*. Volk und Wissen, Berlin, 1961-67.

- [102] Klaus Wloka. Überraschend und doch so naheliegend. *PdN-ChiS*, 50(8):24–26, 2001.
- [103] G. Schwedt. Serie Kurzversuche mit Elementen-Teil 2: Silicium. *PdN-ChiS*, (8):35–36, 2003.
- [104] H. Kern. Die Bleitiegelprobe im Chemieunterricht. *NiU-C*, (9):283–285, 1977.
- [105] Walter Held and Asta Tehnzen-Heinrich. Begreifen und Verstehen. Schulversuche mit Wacker-Siliconen.
- [106] Wacker Chemie GmbH. Begreifen und Verstehen. Schulversuche mit Wacker-Siliconen, 2004.
- [107] Timm Wilke, Stefanie Haffer, Michael Tiemann, and Thomas Waitz. Mesoporöse Silica. *Chemkon*, 19(2):67–72, 2012.
- [108] Emmerich Christiansen. *Praktikum chemischer Demonstration*, volume 1 of *Chemie*. Eydam, Kiel, 2 edition, 1970.
- [109] Alfred Schleip and Erwin Wiederholt. *Chemie: Ab 7. Schuljahr*. Denken und Wissen. Hirschgraben-Verl., Frankfurt am Main, 1979.
- [110] Werner Eisner, editor. *Elemente Chemie: Unterrichtswerk für Gymnasien*. Klett, Stuttgart, 1988.
- [111] Walther Fischer and Wolfgang Glöckner, editors. *Stoff und Formel: Chemie für Gymnasien*. Buchner, Bamberg, gymnasium edition, 1990.
- [112] Karl Hartl. Kohlenstoff und Silizium - muß man sie immer vergleichen? *NiU-C*, 2(10):6–8, 1991.
- [113] Ulrich Dämmgen and Herbert Keune. Die Gitter der Elemente der 4. und 5. Hauptgruppe (III/1). *PdN-Ch.*, (3):74–78, 1984.
- [114] Jack Edwin Bissey. Some aspects of d-Orbital participation in phosphorous and silicon chemistry. *Journal of Chemical Education*, 44(2):95–100, 1967.
- [115] Manfred Weidenbruch. Faszination Symmetrie: Platonische Moleküle und andere polyedrische Verbindungen aus Elementen der 4. Hauptgruppe. *Chemkon*, 2(1):6–9, 1995.
- [116] Jürgen Hüller and Richard Roß. Chemische Prozesse in der Mikroelektronik-Technologie. *ChidS*, 30(4):137–144, 1983.

- [117] Erhard Sirtl. Meilensteine in der Materialtechnik von Halbleiter-Silicium. *PdN-Ch.*, 37(5):20–23, 1988.
- [118] Klaus Lips and Bernd Rech. Silizium - Photovoltaik: Energie der Zukunft. *PdN-ChiS*, 59(2):10–14, 2010.
- [119] Peter Würfel. Wie Solarzellen funktionieren. *PdN-ChiS*, 59(2):19–22, 2010.
- [120] Otfried Hollricher. Photovoltaik - Strom aus Licht. *PdN-Ch.*, 37(5):24–28, 1988.
- [121] Patrizia Mikulcik and Robert J. Schwankner. Silicium - Elemente seiner Frühgeschichte. *PdN-ChiS*, (5):2–7, 1988.
- [122] N. Auner and S. Holl. Silicium als Energieträger: Fakten und Perspektiven. *PdN-ChiS*, 52(8):2–6, 2003.
- [123] Dieter Meissner. Energie für das Jahr 2050 - Nachhaltige Energieversorgung für eine Stabilisierung des Weltklimas. *PdN-ChiS*, 59(2):6–9, 2010.
- [124] D. P. Lasher, B. A. DeGraff, and B. H. Augustine. Understanding the origin of luminescence in porous silicon: An undergraduate solid-state chemistry experiment. *Journal of Chemical Education*, 77(9):1201–1203, 2000.
- [125] Ron Swisher. Porous silicon and the search for a silicon-based LED. *Journal of Chemical Education*, 73(8):738–741, 1998.
- [126] Michael Wolf. Die Bindungs- und Halbleitereigenschaften des Siliciums. *PdN-Ch.*, (11):335–338, 1983.
- [127] Michael Veith, Werner Weckler, and Andreas Adolf. *Chemie als Experimental-Show: Zum Miterleben und Selbermachen ; [mit CD-ROM: Chemie als Experimental-Show]*. Athena, Oberhausen, 1 edition, 2006.
- [128] Constanze Grasshoff. *RAAbits: Impulse und Materialien für die kreative Unterrichtsgestaltung*. Nachschlagen - Finden. Raabe, Stuttgart, 2010.
- [129] Cramer Toni, editor. *Elemente Chemie für die Gymnasien in Hessen*. Klett, Stuttgart, 1. aufl., edition, 2013.
- [130] Dieter Cieplik, editor. *Erlebnis Naturwissenschaften: Ein Lehr- und Arbeitsbuch*. Rund um ... 2.0. Schroedel, Braunschweig, [hessen, niedersachsen] edition, 2012.

- [131] Dieter Cieplik, Horst-Dietmar Kirks, and Hans (Hrsg.) Tegen, editors. *Erlebnis Chemie*. Schroedel, Braunschweig, dr. 1 edition, 2012.
- [132] Dieter Frühauf and Hans Tegen, editors. *Blickpunkt Chemie*. Schroedel, Braunschweig, dr. a,1 edition, 2012.
- [133] Paul Gietz, editor. *Prisma Chemie: [differenzierende Ausgabe]*. Klett, Stuttgart, 2013.
- [134] Dieter Frühauf, editor. *Blickpunkt Chemie*. Schroedel, Braunschweig, sachsen, Neubearb., dr. a 1 edition, 2006.
- [135] Arnim Lühken and Hans Joachim Bader. Herstellung von Glas und Email im Mikrowellennofen. *PdN-ChiS*, 51(2):41–44, 2002.
- [136] Jürgen Reiss. *Alltagschemie im Unterricht*. Unterrichtshilfen Naturwissenschaften. Aulis-Verl. Deubner, Köln, 6 edition, 2002.
- [137] W. Köhler. Glasfabrikation an der Platinöse: Ein großtechnisches Verfahren im Kleinen. *NiU-P/C.*, (3):93–94, 1978.
- [138] P. Heinzerling. Vom Lotus-Effekt zur Nanochemie: Anregungen zu Schülerversuchen. *PdN-ChiS*, 2/53:40–43, 2004.
- [139] Wolfgang Asselborn. *Chemie heute: S1 : Gesamtband*. Schroedel, Hannover, 2013.
- [140] Elisabeth Dane, Hartmut Laatsch, and Franz Wille. *Kleines chemisches Praktikum*. VCH, Weinheim, 9 edition, 1997.
- [141] Bernhard Sieve. Fassaden schützen mit Wasserglas: Einfache Experimente zur Bedeutung von Natriumwasserglas als Flammenschutzmittel und als Säureschutz für Baustoffe. *NiU-C*, 20(109):11–13, 2009.
- [142] H. W. Roesky and K. Möckel. *Chemische Kabinettstücke: Spektakuläre Experimente und geistreiche Zitate*. VCH, Weinheim, korrigierter Nachdruck, 1996, der 1. Aufl. edition, 1996.
- [143] W. Kuhr. Wasserglas-Herstellung und Anwendung. *PdN-ChiS*, (1):10–14, 1997.
- [144] M. Boos. Wasser ist an allem schuld: Siliciumorganische Chemie im Bautenschutz. *NiU-C*, 20(109):7–10, 2009.
- [145] Bernd Lutz and Sigrid Schäfer. Zeolithe-Gerüstsilicate mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten. *PdN-Ch.*, 37(5):29–35, 1988.

- [146] Bernd Lutz. Zeolithe-Ein Thema für die Schule? *NiU-C*, 2(10):22–28, 1991.
- [147] Ingo Eilks, M. Burmeister, and E. Ralle. Festkörpersäuren-Moderne Katalysatoren auf dem Weg zu grüneren Synthesen. *PdN-ChiS*, (1):17–18, 2011.
- [148] Sabine Nick and Zuzanna Chomicz. Zeolithe selbst gemacht! *Chemkon*, 20(1):14–20, 2013.
- [149] Bernd Lutz. Das System Zeolith-Wasser: Ein Modell zur Energiespeicherung für den Unterricht. *NiU-C*, 10(54):12–14, 1999.
- [150] Frank Röhmer and G. Backes. *Waschmittelchemie: 46 Schülerversuche z. Chemie d. Seifen u. waschaktiven Substanzen mit erg. Hinweisen f. d. Lehrer*. Chemie. Leybold Didactic, Hürth, 1993.
- [151] Reinhard Scheller and Eberhard Just. Thermisches und katalytisches Cracken: Selektivität der Reaktoren. *PdN-Ch.*, (44):23–28, 1995.
- [152] Melanie Stahl, Bolko Flintjer, and Hans Joachim Bader. Eisenoxid-Pigmente Versuche für eine anwendungsorientierte Unterrichtskonzeption in der Sekundarstufe I. *Chemkon*, 4(4):181–186, 1997.
- [153] B. Hesselink, D. Sgoff, S. Horn, and H.-J Bader. Nicht nur der Töpfer braucht Ton: Schulversuche mit Bentoniten. *MNU*, 60(3):155–162, 15.4.2007.
- [154] B. Hesselink, D. Sgoff, and H.-J Bader. Bentonit: Unbekannter Rohstoff für Adsorbentien, Katalysatoren und Verdickungsmittel. *MNU*, 60(4):217–223, 1.6.2007.
- [155] Heinz Schmidkunz. Woraus besteht Katzenstreu? Schüler ermitteln die Zusammensetzung eines Alltagsproduktes durch die Planung und Durchführung von Experimenten. *NiU-C*, 22(126):29–33, 2011.
- [156] Heinz Schmidkunz and Stefan Ritter. Wärmeenergie durch Adsorption von Wasser. *Chem. Sch.*, 15(3):2–6, 2000.
- [157] Sabine Venke and Heinz Schmidkunz. Sorptionsspeicher-Wie man mit Wasser Wärme erhält. *NiU-C*, (116):36–40, 2010.
- [158] Peter Pfeifer. *Konkrete Fachdidaktik Chemie*. Oldenbourg, München, 3. aufl., neubearb edition, 2002.
- [159] Manfred Prenzel and Ilka Parchmann. Kompetenz entwickeln - Vom naturwissenschaftlichen Arbeiten zum naturwissenschaftlichen Denken. *NiU-C*, (76–77):15–17, 2003.

- [160] Franz E. Weinert. Vergleichende Leistungsmessung in Schulen - eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In Franz E. Weinert, editor, *Leistungsmessung in Schulen*, pages 17–21. Beltz Verlag, Weinheim und Basel, 2001.
- [161] Hans-Jürgen Becker, Jennifer Christine Kühlmann, and Ilka Parchmann. Chemiedidaktik 2013 - Der Kompetenzbereich "Erkenntnisgewinnung". *Nachrichten aus der Chemie*, 62(3):356–359, 2014.
- [162] P. Labbude and K. Möller. Stichwort: Naturwissenschaftlicher Unterricht. *ZfE*, (15):11–36, 2012.
- [163] Ilka Parchmann and Helmut Kaufmann. Kompetenzen entwickeln: Wie Bildungsstandards zu einer Chance für Schulentwicklung werden können. *NiU-C*, 17(94/95):4–17, 2006.
- [164] Alfred Flint and Michael W. Tausch. Chemiedidaktik 2013 - Experimentell-konzeptionelle Forschung. *Nachrichten aus der Chemie*, 62(3):359–361, 2014.
- [165] D. Di Fuccia, J. Schellenbach-Zell, and B. Ralle. Chemie im Kontext. *MNU*, 60(5):274–282, 2007.
- [166] Werner Hofmann. Kautschuk, Einleitung und Naturkautschuk. In Ernst Bartholomé, Wolfgang Gehartz, and Hertha Buchholz-Meisenheimer, editors, *Hormone bis Keramik*, volume 13, pages 581–709.
- [167] Stefanie Herzog, Odilla Finlayson, Katharina Hickmann, and Ilka Parchmann. Poren nach Maß - Struktur-Eigenschafts-Beziehungen unter der chemiedidaktischen Lupe. *Chemkon*, 22(1):29–36, 2015.
- [168] Sabine Struckmeier and Bernhard Sieve. Vom Friesennerz zur atmungsaktiven Jacke. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 27(152):12–17, 2016.
- [169] Dietrich Braun, Harald Cherdrón, and Helmut Ritter. *Praktikum der makromolekularen Stoffe: Grundlagen, Synthesen, Modifizierungen, Charakterisierungen*. Wiley-VCH, Weinheim, 1999.
- [170] Volker Wiskamp. *Umweltfreundlichere Versuche im anorganisch-analytischen Praktikum*. VCH, Weinheim, 1995.
- [171] Heraeus Kulzer GmbH. Alginate - Leitfaden für die perfekte Situationsabformung, 2006.
- [172] L. Körber and K. Ludwig. *Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie*. Thieme Verlag, Stuttgart, 2 edition, 1993.

- [173] M. Benz, K.-H. Scharf, and T. Weber, editors. *Nachwachsende Rohstoffe: Unterrichtsmaterial für Gymnasien*. Aulis-Verl. Deubner, Köln, 2. aufl., edition, 2001.
- [174] Helmut Dreißig, editor. *Fette, Seifen und Waschmittel - Kunststoffe*. Cornelsen, Berlin, 1. aufl. edition, 1994.
- [175] Viviane Hoßfeld and Arnim Lühken. Polymerchemie mit Kosmetika – Polymerchemie mit Kosmetik - Einfache Versuche mit Haarshampoo und Wimperntusche. *Chemkon*, ((eingereicht)), 2016.
- [176] A. Reller, M. Braungart, J. Soth, and O. Uexküll. Silicone - eine vollsynthetische Materialklasse macht Geschichte(n). *GAIA*, 9(1):13–24, 2000.
- [177] Wilfried Umbach and Günter Bechmann, editors. *Kosmetik: Entwicklung, Herstellung und Anwendung kosmetischer Mittel ; 37 Tabellen*. Thieme, Stuttgart, 2. auflage edition, 1988.
- [178] Normenausschuss Wasserwesen (NAW9 im Deutschen Institut für Normung e.V. Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Anionen (Gruppe D), Photometrische Bestimmung von gelöster Kieselsäure (D 21), Oktober 1990.
- [179] Arnim Lühken, Silke Weiß, and Nadine Wigger. Smartphones im Chemieunterricht: Recherchieren und Experimentieren mit Apps. *PdN-ChiS*, 63(4):22–27, 2014.
- [180] Andrew Joiner. Whitening toothpastes: A review of the literature. *Journal of Dentistry*, 38:e17–e24, 2010.
- [181] Hans Joachim Bader and C. Heger. Mineralische Baustoffe - Schulversuche zu einem vernachlässigtem Thema. *GDCP*, (22):344, 1994.
- [182] Lorenz Ratke. Herstellung und Eigenschaften eines neuen Leichtbetons: Aerogelbeton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 103(4):236–243, 2008.
- [183] Ralph Hub. Etching: Säure-Alarm in der U-Bahn: 17-Jähriger schmiert Graffitis an die Scheiben, 09.11.2014.
- [184] m/s. Vorsicht - Lebensgefahr! Echt ätzend!, 01.09.2013.
- [185] Wacker Chemie AG. Wacker_Silicone in Textilien, 2013.
- [186] Alan Imeson. Agar. In Alan Imeson, editor, *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*, pages 31–49.

- [187] Trond Helgerud, Olav Gaserod, Therese Fjaereide, Peder. O. Andersen, and Christian K. Larsen. Alginates. In Alan Imeson, editor, *Food Stabilisers, Thickeners and Gelling Agents*, pages 50–72.
- [188] Jean Pütz and Christine Niklas. *Cremes und sanfte Seifen: Kosmetik zum Selbermachen ; natürl. u. gesund*. Hobbythek. Vgs, Köln, 2. aufl. edition, 1986.
- [189] Jean Pütz and Christine Niklas. *Schminken, pflegen, schönes Haar: Die sanfte Kosmetik*. Hobbythek. Vgs, Köln, 3. aufl. edition, 1989.
- [190] G. B. Alexander. The reaction of low molecular weight silicic acids mit molybdic acid. *J.Am.Chem.Soc.*, 75(22):5655–5657, 1953.
- [191] G. B. Alexander. The effect of particle size on the solubility of amorphous silica in water. *The Journal of Physical Chemistry*, 61(11):1544–1551, 1957.
- [192] Sven Loose. RDA-Werte Zahnpasten, 08.04.2016.
- [193] Rudolf Liebe. Ajona - Stomaticum: Beipackzettel.
- [194] Sven Matthias. *Herstellung und Charakterisierung von 3D-photonischen Kristallen aus makroporösem Silizium*. PhD thesis, Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, 2005.
- [195] Mathias Ropohl, Katharina Schönau, and Ilka Parchmann. Welche Wünsche und Erwartungen haben Lehrkräfte an aktuelle Forschung als Gegenstand von Fortbildungsveranstaltungen? *Chemkon*, 23(1):25–33, 2016.
- [196] Simone Krees. *Wirt-Gast-Komplexe mit Cyclodextrinen: Strukturelle Merkmale und didaktisches Potential*. PhD thesis, Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, 2009.
- [197] Frederike Tirre, Lorenz Kampschulte, and Ilka Parchmann. Ein Science Camp zu Wissenschaft und Wissenschaftskommunikation: Schüler präsentieren (ihre) Nanoforschung. *Chemkon*, 22(4):179–186, 2015.
- [198] Matthias Nolte. WebQuests: Eine handlungsorientierte Methode zum Interneteinsatz im Chemieunterricht. *NiU-C*, 16(90):12–15, 2005.
- [199] Silke Weiß, Rolf Goldstein, Sven-Heiko Bubel, Stephen Amann, Lars Jakob, and H.-J. Bader. BlogQuests im Chemieunterricht: Individualisiertes Lernen und Förderung von Kompetenzen - nicht nur im Bereich digitaler Medien. *PdN-ChiS*, 60(4):42–48, 2011.
- [200] Alivisos Sofos and Friedrich Wilhelm Kron. *Erfolgreicher Unterricht mit Medien: 1. Aufl.* Logophon-Verlag, Mainz, 2010.

- [201] Daniela Schlemmer. *Gestaltung von Blended Learning unter emotionalen Gesichtspunkten - WebQuest ein geeigneter Ansatz? Ein Beitrag zum E-Learning-Einsatz in der Lehrerbildung*, volume 19 of *Schriftenreihe Medienpädagogik und Mediendidaktik*. Kovac, Hamburg, 1. Aufl. edition, 2011.
- [202] Heinz Moser. *Abenteuer Internet: Lernen mit WebQuests*. Verl. Pestalozzianum, Zürich, 2. Aufl. edition, 2008.
- [203] Silke Weiß, Simona Schmitt, and H.-J. Bader. Zimtstern-Alarm: Ein WebQuest für den Chemieunterricht. *19(108):29–33*, 2008.
- [204] Verena Pietzner, Reinhard Vettors, and Tobias Schwab. Interaktiv und experimentell vom Raps zum Biodiesel. *PdN-ChiS*, 59(1):30–34, 2010.
- [205] Heuer (gen. Hallmann), Benjamin, Erhard Irmer, Timm Wilke, and Thomas Waitz. Ein Webquest zum Thema Alkalimetalle: Angeleitet Informationen suchen, strukturieren, reflektieren und präsentieren. *PdN-ChiS*, 63(3):20–24, 2014.
- [206] A. Moser. Hydrophobie - einmal anders. *PdN-ChiS*, 52(4):42, 2002.
- [207] Katharina Beck, Thorsten Witteck, and Ingo Eilks. Lernen in Gruppen und offenes Experimentieren in der Lernfirma - ein Beispiel zur chemischen Reaktion im Anfangsunterricht. *PdN-ChiS*, 59(7):11–14, 2010.
- [208] Thorsten Witteck and Ingo Eilks. Die Max Sauer GmbH: Eine Lernfirma zu Säuren und Basen. *NiU-C*, 16(88/89):51–56, 2005.
- [209] Ralf Marks, C. Baune, A. Siol, and Ingo Eilks. Einfach GESUND trinken: Eine Lernfirma zu Getränkeuntersuchungen. *PdN-ChiS*, 61(3):27–30, 2012.
- [210] Susanne Weßnigk and Manfred Euler. Wie die Produktion von Eierlöffeln das Image von Chemie und Physik verändern kann. *Chemkon*, 21(3):123–128, 2014.
- [211] Bernhard Sieve, Anna Friedemann, and Sascha Schanze. Bewerten Lernen - aber wie? Bewertungskompetenz im Chemieunterricht. *NiU-C*, 23(127):2–8, 2012.
- [212] Jürgen Menthe. Bewertungskompetenz mit Methode: Entscheidung Planspiele zur Förderung des Urteilen und Bewerten. *NiU-C*, 23(127):22–25, 2012.

Anhang I

Publikationsliste

Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Kompetenzerwerb mit Nagellack!? – Ein Projektvorschlag für den Chemieunterricht, PdN-ChiS (angenommen)

Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Polymerchemie mit Kosmetika – Einfache Versuche mit Haarschampoo und Wimperntusche, CHEMKON (angenommen)

Bader, Hans Joachim, Hoßfeld, Viviane, Zement, Beton und Leichtbeton – Schulversuche zu einem interessanten Thema, NiU-Ch 2015, 150, 11–15

Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Einfache Polymerchemie im Badezimmer – Experimentelle Untersuchung der Polykondensation an Silicindichtstoffen, CHEMKON 2015, 22/1, 37–39

Lühken, Arnim, Hoßfeld, Viviane, Siliziumchemie – Vom Alltag ins Schülerlabor, NiU-Ch 2014, 143, 25/3, 28–33

Nitsche, Edith, Hoßfeld, Viviane, Pizza, Eis und Gummibärchen. In: Dokumentation Hessische Schülerakademie Mittelstufe, 2015, 13–24

Aktive Beiträge zu Fachtagungen

15.09. – 19.09.2016 Hoßfeld, Viviane, Diskussionsvortrag: Siliciumchemie –
lohnenswert für den Experimentalunterricht?, GDCh-
Fachgruppentagung, Universität Hannover

15.09. – 19.09.2016 Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Poster: „Intelligente
Knetmasse“ im nachhaltigen Chemieunterricht?, GDCh-
Fachgruppentagung, Universität Hannover

- 30.08. – 02.09.2015 Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Experimentalvortrag: Fugenmasse, Zahnpasta und Glas – Allgegenwärtiges Silizium im Chemieunterricht, GDCh-Wissenschaftsforum, Messe Dresden
- 30.08. – 02.09.2015 Lühken, Arnim, Hoßfeld, Viviane, Workshop: Zusatzstoffe in Kosmetika, GDCh-Wissenschaftsforum, Messe Dresden
- 11.09. – 13.09.2014 Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Poster: Fugenmasse und Zahnpasta – Experimente zu Siliconen und Kieselsäure in Alltagsprodukten, GDCh-Fachgruppentagung, Universität Kiel
- 01.09. – 04.09.2013 Hoßfeld, Viviane, Lühken, Arnim, Poster: Siliciumchemie im Unterricht – Experimente zu Siliconen in Kosmetikprodukten, GDCh-Wissenschaftsforum, Universität Darmstadt

Leitung von Lehrerfortbildungen zu den Themen Silicone, Kosmetik und Siliciumchemie

Lehrerfortbildung „Silicone - Polymerchemie zwischen Anorganik und Organik“

- 25.02.2016 Hoßfeld, Viviane, Fischer, Kirsten, halbtägig in Kombination mit dem Experimentierkoffer *chem2do*, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Goethe-Universität Frankfurt

- 28.10.2015 Hoßfeld, Viviane, Fischer, Kirsten, halbtägig in Kombination mit dem Experimentierkoffer *chem2do*, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Goethe-Universität Frankfurt
- 23.09.2015 Hoßfeld, Viviane, Fischer, Kirsten, halbtägig in Kombination mit dem Experimentierkoffer *chem2do*, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Goethe-Universität Frankfurt
- 06.05.2015 Hoßfeld, Viviane, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Goethe-Universität Frankfurt
- 19.02.2014 Hoßfeld, Viviane, Fischer, Kirsten, halbtägig in Kombination mit dem Experimentierkoffer *chem2do*, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Goethe-Universität Frankfurt

Lehrerfortbildung „Kosmetik - Untersuchung von Zusatzstoffen“

- 30.08 – 02.09.2015 Lühken, Arnim, Hoßfeld, Viviane, halbtägiger Workshop, GDCh-Wissenschaftsforum 2016, Messe Dresden
- 21.07.2015 Hoßfeld, Viviane, Fischer, Kirsten, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Christian-Rauch-Schule, Bad Arolsen
- 10.12.2014 Hoßfeld, Viviane, Schüler, Christiane, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt in Kooperation mit dem XENOS-Bundesprogramm, Paul-Ehrlich-Schule, Frankfurt
- 25.06.2014 Hoßfeld, Viviane, Fortbildung in Kombination mit einem Workshop zur Kosmetikherstellung, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt, Goethe-Universität Frankfurt

Lehrerfortbildung „Silicium im Alltag - Solarzelle, Fugenmasse und Zahnpasta“

20.11.2015

Hoßfeld, Viviane, Fischer, Kirsten, Lehrerfortbildungszentrum Frankfurt in Kooperation mit dem Zentrum für wissenschaftliche Weiterbildung (ZWW) an der Gutenberg-Universität Mainz

Anhang II

Lehrerfortbildungszentrum Chemie
 Frankfurt

 Hoßfeld
 2015-07-21/LfbBadArolsen


Zu dieser Veranstaltung führen wir eine Befragung im Rahmen einer Dissertation zum "Siliciumchemie in der Schule" durch. Ihre Daten und Ihre Antworten werden nach den Vorgaben des Datenschutzgesetzes streng vertraulich behandelt.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Bitte so markieren: Der Fragebogen wird maschinell ausgewertet. Bitte verwenden Sie zum Ausfüllen einen blauen oder schwarzen Kugelschreiber, aber keinen Bleistift.
 Korrektur:

1. Allgemeines

- | | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1.1 Die Anzahl der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.2 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Silicone als hoch ein. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.3 Haben Sie bereits Versuche zum Thema Silicone in Ihrem Unterricht eingesetzt? | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.4 Können Sie sich vorstellen nach dieser Fortbildung das Thema Silicone im Rahmen Ihres Unterrichts (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) zu verwenden? | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.5 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Kieselsäure als hoch ein. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.6 Haben Sie bereits Versuche zum Thema Kieselsäure in Ihrem Unterricht eingesetzt? | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.7 Können Sie sich vorstellen nach dieser Fortbildung das Thema Kieselsäuren im Rahmen Ihres Unterrichts (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) zu verwenden? | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

2. Versuche zum Thema „Nagellack“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Nagellack“. Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 2.1 Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.2 Das Thema der Versuche ist anschaulich gewählt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.3 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.4 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.5 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |



2. Versuche zum Thema „Nagellack“. [Fortsetzung]

- 2.6 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Nagellack“?

3. Versuche zum Thema „Zahnpasta und Kieselsäure“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Zahnpasta und Kieselsäure“. Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- 3.1 Das Thema der Versuche ist anschaulich gewählt. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.2 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.3 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.4 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.5 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.6 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.7 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.8 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Zahnpasta und Kieselsäure“?



4. Versuche zum Thema „Silicone“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die anderen Versuche zum Thema „Silicone“ (Wasserfeste Wimperntusche, Lipgloss, Haarshampoo usw.). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | | |
|-----|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 4.1 | Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.2 | Das Thema der Versuche ist anschaulich gewählt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.3 | Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.4 | Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.5 | Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.6 | Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.7 | Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.8 | Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.9 | Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Silicone“? | | | | | | | |

5. Bewertung der Zusatzmaterialien

Denken Sie nun an die Zusatzmaterialien, die Sie auf der CD zur Verfügung gestellt bekommen (Anschauungsexemplar lag aus). Welche Aussagen zu den Schülervorschriften, den Gefährdungsbeurteilungen und den Materialien zu den Lernzielen treffen zu?

- | | | | | | | | | |
|-----|---|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 5.1 | Die Schülerversion der Versuchsvorschriften sind angemessen verständlich für Schüler formuliert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.2 | Ich könnte mit vorstellen die Schülerversionen der Versuchsvorschriften in meinem Unterricht einsetzen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.3 | Die Schülerversion der Versuchsvorschrift enthalten die notwendigen Aufgaben für eine vertiefende Bearbeitung des Themas. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.4 | Es ist hilfreich, dass die Zusatzmaterialien auf der CD für alle Versuche Lernziele, einen Lehrplanbezug und Basiskonzepte enthalten. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |



5. Bewertung der Zusatzmaterialien [Fortsetzung]

5.5 Ich könnte mir vorstellen, dass die auf der CD zur Verfügung gestellten Gefährdungsbeurteilung zu den Versuchen die Vorbereitung einer Chemiestunde erleichtern. trifft voll zu trifft nicht zu

5.6 Die möglichen Lernziele, die in den Zusatzmaterialien formuliert werden, unterstützen mich bei der Erarbeitung einer Unterrichtseinheit. trifft voll zu trifft nicht zu

5.7 Haben Sie noch weitere Anregungen zu den Zusatzmaterialien?

6. Angaben zu Ihrer Person

6.1 Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an:

männlich weiblich

6.2 Welcher Altersgruppe gehören Sie an?

20 - 29 30 - 39 40 - 49
 50 - 59 60 - 69

6.3 In welchem Tätigkeitsbereich arbeiten Sie? (Mehrfachnennungen möglich)

Förderschule Grundschule Hauptschule
 Realschule Gymnasium u. Berufl. Gym. Kooperative Gesamtschule
 Integrierte Gesamtschule Berufliche Schule Sonstiges

6.4 Wie lange arbeiten Sie schon in Ihrem derzeitigen Tätigkeitsbereich? (einschließlich Vorbereitungsdienst)

bis 5 Jahre 6 - 10 Jahre 11 - 15 Jahre
 16 - 20 Jahre 21 - 25 Jahre über 26 Jahre

6.5 Haben Sie Chemie oder ein Fach mit Bezug zur Chemie studiert?

Naturwiss. Grundsch. Naturwiss. Fördersch. Chemie Lehramt
 Chemie Dipl./B./M. Sonstiges Nein

6.6 Unterrichten Sie das Fach Chemie momentan?

Ja Nein

6.7 Haben Sie ein weiteres Fach neben dem Fach Chemie studiert? (Mehrfachnennungen möglich)

Mathematik Physik Biologie
 Geographie Sonstiges Nein

6.8 Unterrichten Sie dieses Fach momentan?

Ja Nein

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



Lehrerfortbildungszentrum Chemie
 Frankfurt

 Hoßfeld
 #fb2536/2015-09-23


Zu dieser Veranstaltung führen wir eine Befragung im Rahmen einer Dissertation zum "Siliciumchemie in der Schule" durch. Ihre Daten und Ihre Antworten werden nach den Vorgaben des Datenschutzgesetzes streng vertraulich behandelt.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Bitte so markieren: Der Fragebogen wird maschinell ausgewertet. Bitte verwenden Sie zum Ausfüllen einen blauen oder schwarzen Kugelschreiber, aber keinen Bleistift.
 Korrektur:

1. Allgemeines

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1.1 Die Anzahl der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.2 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Silicone als hoch ein. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.3 Haben Sie bereits Versuche zum Thema Silicone in Ihrem Unterricht eingesetzt? | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.4 Könnten Sie sich vorstellen nach dieser Fortbildung das Thema Silicone im Rahmen Ihres Unterrichts (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) zu verwenden? | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

2. Versuche zum Thema „Fugenmasse“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Fugenmasse“ (V3 - 8). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 2.1 Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.2 Das Thema der Versuche ist gut gewählt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.3 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.4 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.5 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.6 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |



2. Versuche zum Thema „Fugenmasse“. [Fortsetzung]

- 2.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Fugenmasse“?

3. Versuche zum Thema „Öle“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Öle“ (V16 und 23). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- 3.1 Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.2 Das Thema der Versuche ist gut gewählt. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.3 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.4 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.5 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.6 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft voll zu trifft nicht zu
- 3.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft voll zu trifft nicht zu



3. Versuche zum Thema „Öle“. [Fortsetzung]

3.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Öle“?

4. Versuche zum Thema „Funktionskleidung und Recycling“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Funktionskleidung“ (V17 - 20). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 4.1 Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.2 Das Thema der Versuche ist gut gewählt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.3 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.4 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.5 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.6 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

4.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Funktionskleidung“?



5. Bewertung der Zusatzmaterialien

Denken Sie nun an die Zusatzmaterialien, die Sie auf der CD zur Verfügung gestellt bekommen haben. Welche Aussagen zu den Schülervorschriften, den Gefährdungsbeurteilungen und den Materialien zu den Lernzielen treffen zu?

- 5.1 Die Schülerversion der Versuchsvorschriften sind angemessen verständlich für Schüler formuliert. trifft voll zu trifft nicht zu
- 5.2 Ich werde die Schülerversionen der Versuchsvorschriften in meinem Unterricht einsetzen. trifft voll zu trifft nicht zu
- 5.3 Die Schülerversion der Versuchsvorschrift enthalten die notwendigen Aufgaben für eine vertiefende Bearbeitung des Themas. trifft voll zu trifft nicht zu
- 5.4 Es ist hilfreich, dass die Zusatzmaterialien auf der CD für alle Versuche Lernziele, einen Lehrplanbezug und Basiskonzepte enthalten. trifft voll zu trifft nicht zu
- 5.5 Ich könnte mir vorstellen, dass die auf der CD zur Verfügung gestellten Gefährdungsbeurteilung zu den Versuchen die Vorbereitung einer Chemiestunde erleichtern. trifft voll zu trifft nicht zu
- 5.6 Die möglichen Lernziele, die in den Zusatzmaterialien formuliert werden, unterstützen mich bei der Erarbeitung einer Unterrichtseinheit. trifft voll zu trifft nicht zu
- 5.7 Haben Sie noch weitere Anregungen zu den Zusatzmaterialien?

6. Angaben zu Ihrer Person

- 6.1 Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an:
 männlich weiblich
- 6.2 Welcher Altersgruppe gehören Sie an?
 20 - 29 30 - 39 40 - 49
 50 - 59 60 - 69
- 6.3 In welchem Tätigkeitsbereich arbeiten Sie? (Mehrfachnennungen möglich)
 Förderschule Grundschule Hauptschule
 Realschule Gymnasium u. Berufl. Gym. Kooperative Gesamtschule
 Integrierte Gesamtschule Berufliche Schule Sonstiges
- 6.4 Wie lange arbeiten Sie schon in Ihrem derzeitigen Tätigkeitsbereich? (einschließlich Vorbereitungsdienst)
 bis 5 Jahre 6 - 10 Jahre 11- 15 Jahre
 16 - 20 Jahre 21 - 25 Jahre über 26 Jahre



6. Angaben zu Ihrer Person [Fortsetzung]

6.5 Haben Sie Chemie oder ein Fach mit Bezug zur Chemie studiert?

 Naturwiss. Grundsch. Naturwiss. Fördersch. Chemie Lehramt Chemie Dipl./B./M. Sonstiges Nein

6.6 Unterrichten Sie das Fach Chemie momentan?

 Ja Nein

6.7 Haben Sie ein weiteres Fach neben dem Fach Chemie studiert? (Mehrfachnennungen möglich)

 Mathematik Physik Biologie Geographie Sonstiges Nein

6.8 Unterrichten Sie dieses Fach momentan?

 Ja Nein

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



Lehrerfortbildungszentrum Chemie
 Frankfurt

 Hoßfeld
 #fb2566/2015-11-20


Zu dieser Veranstaltung führen wir eine Befragung im Rahmen einer Dissertation zum "Siliziumchemie in der Schule" durch. Ihre Daten und Ihre Antworten werden nach den Vorgaben des Datenschutzgesetzes streng vertraulich behandelt.
 Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Bitte so markieren: Der Fragebogen wird maschinell ausgewertet. Bitte verwenden Sie zum Ausfüllen einen blauen oder schwarzen Kugelschreiber, aber keinen Bleistift.
 Korrektur:

1. Allgemeines

- 1.1 Die Anzahl der Versuche war genau richtig. trifft nicht zu trifft voll zu
- 1.2 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Siliziumchemie als hoch ein. trifft nicht zu trifft voll zu
- 1.3 Haben Sie bereits Versuche zum Thema Siliziumchemie in Ihrem Unterricht eingesetzt? trifft nicht zu trifft voll zu
- 1.4 Wenn ja, welche Versuche waren dies?

- 1.5 Könnten Sie sich vorstellen nach dieser Fortbildung das Thema Siliziumchemie im Rahmen Ihres Unterrichts (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) zu verwenden? trifft nicht zu trifft voll zu

2. Versuche zum Thema "Silizium" und "Glas".

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Silizium/ Glas“ (V1 - 4). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- 2.1 Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. trifft nicht zu trifft voll zu
- 2.2 Das Thema der Versuche ist gut gewählt. trifft nicht zu trifft voll zu
- 2.3 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. trifft nicht zu trifft voll zu
- 2.4 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. trifft nicht zu trifft voll zu
- 2.5 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. trifft nicht zu trifft voll zu
- 2.6 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. trifft nicht zu trifft voll zu



2. Versuche zum Thema "Silizium" und "Glas". [Fortsetzung]

2.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft nicht zu trifft voll zu

2.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft nicht zu trifft voll zu

2.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Silizium/ Glas“?

3. Versuche zum Thema „Silikate“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Silikate“ (V5 - 10). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

3.1 Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. trifft nicht zu trifft voll zu

3.2 Das Thema der Versuche ist gut gewählt. trifft nicht zu trifft voll zu

3.3 Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. trifft nicht zu trifft voll zu

3.4 Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. trifft nicht zu trifft voll zu

3.5 Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. trifft nicht zu trifft voll zu

3.6 Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. trifft nicht zu trifft voll zu

3.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft nicht zu trifft voll zu

3.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft nicht zu trifft voll zu

3.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Silikate“?

4. Versuche zum Thema „Silica“.



4. Versuche zum Thema „Silica“. [Fortsetzung]

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Silica“ (V11 - 16). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | | |
|-----|--|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| 4.1 | Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.2 | Das Thema der Versuche ist gut gewählt. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.3 | Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.4 | Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.5 | Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.6 | Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.7 | Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.8 | Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 4.9 | Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Silica“? | | | | | | | |

5. Versuche zum Thema „Silicone“.

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche zum Thema „Silicone“ (V17 - 23). Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | | |
|-----|--|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| 5.1 | Der Schwierigkeitsgrad der Versuche war genau richtig. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 5.2 | Das Thema der Versuche ist gut gewählt. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 5.3 | Der Kontext der Versuche ist für meine Schüler verständlich und ansprechend. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 5.4 | Die Versuchsvorschriften sind verständlich und detailliert formuliert. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 5.5 | Das Ziel eines Versuchs ist in der Versuchsvorschrift in den Abschnitten "Beobachtung" und "Auswertung" gut erklärt. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |
| 5.6 | Der Abschnitt „Informationen“ in der Versuchsvorschrift macht den Kontext der Versuche deutlich. | trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> | trifft voll zu |



5. Versuche zum Thema „Silicone“. [Fortsetzung]

- 5.7 Die fachlichen Informationen aus dem Skript zur Lehrerfortbildung sind ausführlich genug, um eine Unterrichtseinheit mit diesen Versuchen vorzubereiten. trifft nicht zu trifft voll zu
- 5.8 Ich werde einen oder mehrere dieser Versuche in meinem eigenen Unterricht (Regelunterricht, internes oder fachübergreifendes Projekt, Referat für interessierte Schüler o.ä.) einsetzen. trifft nicht zu trifft voll zu
- 5.9 Haben Sie noch weitere Anmerkungen zu den Versuchen zum Thema „Silicone“?

6. Bewertung der Zusatzmaterialien

Denken Sie nun an die Zusatzmaterialien, die Sie auf der CD zur Verfügung gestellt bekommen haben. Welche Aussagen zu den Schülervorschriften, den Gefährdungsbeurteilungen und den Materialien zu den Lernzielen treffen zu?

- 6.1 Die Schülerversion der Versuchsvorschriften sind angemessen verständlich für Schüler formuliert. trifft nicht zu trifft voll zu
- 6.2 Ich werde die Schülerversionen der Versuchsvorschriften in meinem Unterricht einsetzen. trifft nicht zu trifft voll zu
- 6.3 Die Schülerversion der Versuchsvorschrift enthalten die notwendigen Aufgaben für eine vertiefende Bearbeitung des Themas. trifft nicht zu trifft voll zu
- 6.4 Es ist hilfreich, dass die Zusatzmaterialien auf der CD für alle Versuche Lernziele, einen Lehrplanbezug und Basiskonzepte enthalten. trifft nicht zu trifft voll zu
- 6.5 Ich könnte mir vorstellen, dass die auf der CD zur Verfügung gestellten Gefährdungsbeurteilung zu den Versuchen die Vorbereitung einer Chemiestunde erleichtern. trifft nicht zu trifft voll zu
- 6.6 Die möglichen Lernziele, die in den Zusatzmaterialien formuliert werden, unterstützen mich bei der Erarbeitung einer Unterrichtseinheit. trifft nicht zu trifft voll zu
- 6.7 Haben Sie noch weitere Anregungen zu den Zusatzmaterialien?

7. Angaben zu Ihrer Person

- 7.1 Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an:
 männlich weiblich
- 7.2 Welcher Altersgruppe gehören Sie an?
 20 - 29 30 - 39 40 - 49
 50 - 59 60 - 69



7. Angaben zu Ihrer Person [Fortsetzung]

7.3 In welchem Tätigkeitsbereich arbeiten Sie? (Mehrfachnennungen möglich)

- | | | |
|---|--|---|
| <input type="checkbox"/> Förderschule | <input type="checkbox"/> Grundschule | <input type="checkbox"/> Hauptschule |
| <input type="checkbox"/> Realschule | <input type="checkbox"/> Gymnasium u. Berufl. Gym. | <input type="checkbox"/> Kooperative Gesamtschule |
| <input type="checkbox"/> Integrierte Gesamtschule | <input type="checkbox"/> Berufliche Schule | <input type="checkbox"/> Sonstiges |

7.4 Wie lange arbeiten Sie schon in Ihrem derzeitigen Tätigkeitsbereich? (einschließlich Vorbereitungsdienst)

- | | | |
|--|--|--|
| <input type="checkbox"/> bis 5 Jahre | <input type="checkbox"/> 6 - 10 Jahre | <input type="checkbox"/> 11- 15 Jahre |
| <input type="checkbox"/> 16 - 20 Jahre | <input type="checkbox"/> 21 - 25 Jahre | <input type="checkbox"/> über 26 Jahre |

7.5 Haben Sie Chemie oder ein Fach mit Bezug zur Chemie studiert?

- | | | |
|---|--|---|
| <input type="checkbox"/> Naturwiss. Grundsch. | <input type="checkbox"/> Naturwiss. Fördersch. | <input type="checkbox"/> Chemie Lehramt |
| <input type="checkbox"/> Chemie Dipl./B./M. | <input type="checkbox"/> Sonstiges | <input type="checkbox"/> Nein |

7.6 Unterrichten Sie das Fach Chemie momentan?

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |
|-----------------------------|-------------------------------|

7.7 Haben Sie ein weiteres Fach neben dem Fach Chemie studiert? (Mehrfachnennungen möglich)

- | | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Mathematik | <input type="checkbox"/> Physik | <input type="checkbox"/> Biologie |
| <input type="checkbox"/> Geographie | <input type="checkbox"/> Sonstiges | <input type="checkbox"/> Nein |

7.8 Unterrichten Sie dieses Fach momentan?

- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Ja | <input type="checkbox"/> Nein |
|-----------------------------|-------------------------------|

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Lehrerfortbildungszentrum Chemie
 Frankfurt

 Hoßfeld
 2015-11-19/ISH

Diese Veranstaltung ist der Teil des Tests von Materialien, die im Rahmen einer "Siliziumchemie in der Schule" entstanden sind. Zur Optimierung bitten wir Sie an teilzunehmen. Es gibt auch keine richtigen oder falschen Antworten!

Ihre Antworten werden gemäß des Datenschutzgesetzes streng vertraulich behandelt.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.



Bitte so markieren: Der Fragebogen wird maschinell ausgewertet. Bitte verwenden Sie zum Ausfüllen einen blauen oder schwarzen Kugelschreiber, aber keinen Bleistift.
 Korrektur: Bitte füllen Sie die Kästchen nicht über den Rand hinaus aus, da dies nicht ausgelesen werden kann.

1. Bewertung der Versuche

Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 1.1 Die Versuche waren zu leicht. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.2 Es ist mir leicht gefallen die Versuche zu bearbeiten. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.3 Die Anzahl der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.4 Ich hätte mehr Zeit zum Experimentieren benötigt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.5 Das schrittweise Vorgehen bei der Durchführung hat mir das Arbeiten erleichtert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.6 Die Versuchsvorschrift war verständlich formuliert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 1.7 Das Thema der Versuche war neu und interessant für mich. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

2. Bewertung der Arbeitsmaterialien

Denken Sie nun an das WebQuest. Welche Aussagen treffen zu?

- | | | | | | | | |
|---|--|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 2.1 In welchem Team haben Sie in diesem Projekt gearbeitet? | | | | | | | |
| <input type="checkbox"/> Chemiker | <input type="checkbox"/> Produktentwickler | <input type="checkbox"/> Umwelt- und Verbraucherschützer | | | | | |
| <input type="checkbox"/> Kosmetiker | | | | | | | |
| 2.2 Ich bin zufrieden mit dem Ergebnis der Arbeit meines Teams beim WebQuest. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.3 Dieser Projekttag hat mir Spaß gemacht. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.4 Der Aufbau des WebQuest war übersichtlich und gut nachvollziehbar. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.5 Die Zeit zur Bearbeitung der Aufgaben war ausreichend für mich. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |



2. Bewertung der Arbeitsmaterialien [Fortsetzung]

- 2.6 Mein Team hätte mehr Zeit zum Bearbeiten des WebQuests benötigt. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.7 Die Texte der angegebenen Literaturstellen und Links waren gut verständlich. trifft voll zu trifft nicht zu
- 2.8 Ich hätte mir mehr Literatur zum Bearbeiten der Aufgaben gewünscht. trifft voll zu trifft nicht zu

2.9 Was für Erwartungen hatten Sie an die Projekttag?

- 2.10 Meine Erwartungen an die Projekttag wurden erfüllt. trifft voll zu trifft nicht zu

3. Eigene Anmerkungen

3.1 Was ich noch sagen wollte:

4. Angaben zu Ihrer Person

4.1 Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an:

- männlich weiblich

4.2 Wie alt sind Sie?

- jünger als 17 17 - 19 20 - 22
 älter als 22

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



Institut für Didaktik der Chemie
 Frankfurt

Hoßfeld
 2016-02/ISH

Diese Veranstaltung ist der Teil des Tests von Materialien, die im Rahmen einer Dissertation zum "Siliciumchemie in der Schule" entstanden sind. Zur Optimierung bitten wir Sie an dieser Umfrage teilzunehmen. Es gibt auch keine richtigen oder falschen Antworten!



Ihre Antworten werden gemäß des Datenschutzgesetzes streng vertraulich behandelt.

Bitte geben Sie an, inwieweit Sie den folgenden Aussagen zustimmen.

Bitte so markieren: Der Fragebogen wird maschinell ausgewertet. Bitte verwenden Sie zum Ausfüllen einen blauen oder schwarzen Kugelschreiber, aber keinen Bleistift.
 Korrektur: Bitte füllen Sie die Kästchen nicht über den Rand hinaus aus, da dies nicht ausgelesen werden kann.

1. Allgemeines

Bei Aussagen zum Bewerten kreuzen Sie bitte an, ob sie den Aussagen zustimmen.

1.1 Wir haben uns im Unterricht zuvor inhaltlich auf das Projekt vorbereitet. trifft voll zu trifft nicht zu

1.2 Was für Erwartungen hatten Sie an den Projekttag?

1.3 Meine Erwartungen an den Projekttag wurden erfüllt. trifft voll zu trifft nicht zu

1.4 Ich bin zufrieden mit dem Ergebnis der Arbeit meines Teams. trifft voll zu trifft nicht zu

1.5 Mein Team hätte mehr Zeit zur Bearbeitung benötigt. trifft voll zu trifft nicht zu

1.6 Dieser Projekttag hat mir Spaß gemacht. trifft voll zu trifft nicht zu

1.7 In welchem Team haben Sie in diesem Projekt gearbeitet?
 Team Forschung Team Produktion Team Design und Marketing
 Team Kommunikation

2. Bewertung der Versuche

Die Fragen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf die Versuche, die von den Teams "Forschung" und "Produktion" durchgeführt wurden. Sollten Sie in einem anderen Team gearbeitet haben, betrifft Sie dies nicht und Sie dürfen zu Abschnitt 3 auf der nächsten Seite springen.

Im Folgenden können Sie Versuche und Versuchsvorschriften bewerten. Geben Sie bitte an, inwieweit sie den Aussagen zustimmen.

2.1 Die Versuche waren zu leicht. trifft voll zu trifft nicht zu

2.2 Es ist mir leicht gefallen die Versuche zu bearbeiten. trifft voll zu trifft nicht zu



2. Bewertung der Versuche [Fortsetzung]

- | | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 2.3 Die Anzahl der Versuche war genau richtig. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.4 Ich hätte mehr Zeit zum Experimentieren benötigt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.5 Das schrittweise Vorgehen bei der Durchführung hat mir das Arbeiten erleichtert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 2.6 Das Thema der Versuche war interessant für mich und hilft mir für meine berufliche Ausbildung weiter. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

3. Bewertung der Arbeitsmaterialien

Denken Sie nun an die Arbeitsmaterialien. Welche Aussagen treffen zu?

- | | | | | | | | |
|---|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 3.1 Die Kurzbeschreibungen der Teams mit ihren Aufgaben hat mir die Entscheidung der Teamwahl erleichtert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 3.2 Der Informationstext zum Thema meines Teams war hilfreich zum Bearbeiten der Aufgaben. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 3.3 Ich habe die angegebenen Literaturstellen und Links aus dem Informationstext zur Vorbereitung oder zum Bearbeiten der Aufgaben genutzt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 3.4 Ich hätte mir mehr Informationen als Hilfe zum Bearbeiten der Aufgaben gewünscht. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

4. Lernzuwachs

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 4.1 Ich habe heute Wissen erworben, das mir später als Hintergrundwissen auch im Beruf weiterhelfen kann. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.2 Ich konnte mir mithilfe der Arbeitsaufträge selbstständig Wissen aneignen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.3 Ich habe heute neue Sachverhalte aus der Chemie kennengelernt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.4 Ich habe heute etwas Neues über Inhaltsstoffe im Nagellack gelernt, was mir vorher nicht bewusst war. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 4.5 Vor diesem Projekttag wusste ich nicht, dass Silicone und Kieselsäuren Inhaltsstoffe eines Nagellacks sein können. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

5. Kommunikation

5. Kommunikation [Fortsetzung]

- | | | | | | | | |
|--|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------|
| 5.1 Ich arbeite im Unterricht oft in arbeitsteiliger Gruppenarbeit (jede Gruppe bearbeitet eine andere Aufgabe). | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.2 Wir haben in unserem Team gemeinsam entschieden wie wir vorgehen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.3 Wir haben heute viel inhaltlich miteinander diskutiert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.4 Sämtliche Teammitglieder waren an den Diskussionen beteiligt. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.5 In unserem Team hat jeder einzelne etwas zum gemeinsamen Lernen und Vorankommen beigetragen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.6 Die Diskussionen in unserem Team verliefen effektiv. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.7 In unserem Team wurde viel über Unwesentliches diskutiert. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.8 Die Diskussionen im Team haben mir geholfen die Inhalte besser zu verstehen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.9 Inhaltliche Fragen wurden so lange diskutiert, bis wir zu einem Ergebnis kamen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.10 Wir haben uns innerhalb des Teams immer wieder abgesprochen. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |
| 5.11 Wir haben unser Vorgehen im Team sorgfältig geplant. | trifft voll zu | <input type="checkbox"/> | trifft nicht zu |

6. Eigene Anmerkungen

- 6.1 Was ich noch sagen wollte:

7. Angaben zu Ihrer Person

- 7.1 Geben Sie bitte Ihr Geschlecht an:
 männlich weiblich
- 7.2 Wie alt sind Sie?
 jünger als 16 16 17
 18 19 älter als 19

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!



Zu dieser Veranstaltung führen wir eine Befragung im Rahmen einer Dissertation zum Thema "Siliziumchemie in der Schule" durch. Ihre Daten und Ihre Antworten werden nach den Vorgaben des Datenschutzgesetzes streng vertraulich behandelt.

Bitte so markieren: Der Fragebogen wird maschinell ausgewertet. Bitte verwenden Sie zum Ausfüllen einen blauen oder schwarzen Kugelschreiber, aber keinen Bleistift.
Korrektur:

1. Vorwissen zu Siliconen

1.1 Denken Sie jetzt bitte an Ihren Alltag. Welche Anwendungen von Siliconen kennen Sie dort?

1.2 Kommen wir nun zu Ihrem Unterricht. Verwenden Sie das Thema Silicone bereits?

Ja Nein

1.3 In welchem Kontext verwenden Sie das Thema in Ihrem Unterricht?

1.4 Führen Sie bereits Versuche zum Thema Silicone in Ihrem Unterricht durch?

Ja Nein

1.5 In welchen Jahrgangsstufen verwenden Sie das Thema Silicone in Ihrem Unterricht?

7-8 9-10 11-13
 gar nicht

1.6 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Silicone trifft voll zu trifft gar nicht zu als sehr hoch ein.

2. Vorwissen zu Silica

Mit dem Begriff "Silica" sind die folgenden Verbindungen gemeint: Siliziumdioxid, Kieselsäuren, Kieselgel und Kieselzol.

2.1 Denken Sie jetzt bitte an Ihren Alltag. Welche Anwendungen von Silica kennen Sie dort?

2.2 Kommen wir nun zu Ihrem Unterricht. Verwenden Sie das Thema Silica bereits?

Ja Nein

2.3 In welchem Kontext verwenden Sie das Thema in Ihrem Unterricht?

2.4 Führen Sie bereits Versuche zum Thema Silica in Ihrem Unterricht durch?

Ja Nein

2.5 In welchen Jahrgangsstufen verwenden Sie das Thema Silica in Ihrem Unterricht?

7-8 9-10 11-13
 gar nicht



2. Vorwissen zu Silica [Fortsetzung]

- 2.6 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Silica als trifft voll zu trifft gar nicht zu sehr hoch ein.

3. Vorwissen zu Silicium

- 3.1 Denken Sie jetzt bitte an Ihren Alltag. Welche Anwendungen von Silicium kennen Sie dort?

- 3.2 Kommen wir nun zu Ihrem Unterricht. Verwenden Sie das Thema Silicium bereits?

Ja Nein

- 3.3 In welchem Kontext verwenden Sie das Thema in Ihrem Unterricht?

- 3.4 Führen Sie bereits Versuche zum Thema Silicium in Ihrem Unterricht durch?

Ja Nein

- 3.5 In welchen Jahrgangsstufen verwenden Sie das Thema Silicium in Ihrem Unterricht?

7-8 9-10 11-13
 gar nicht

- 3.6 Ich schätze mein Fachwissen zum Thema Silicium trifft voll zu trifft gar nicht zu als sehr hoch ein.

4. Angaben zu Ihrer Person

- 4.1 Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an:

männlich weiblich

- 4.2 Welcher Altersgruppe gehören Sie an?

20 - 29 30 - 39 40 - 49
 50 - 59 60 - 69

- 4.3 In welchem Tätigkeitsbereich arbeiten Sie? (Mehrfachnennungen möglich)

Förderschule Grundschule Hauptschule
 Realschule Gymnasium u. Berufl. Gym. Kooperative Gesamtschule
 Integrierte Gesamtschule Berufliche Schule Sonstiges

- 4.4 Wie lange arbeiten Sie schon in Ihrem derzeitigen Tätigkeitsbereich? (einschließlich Vorbereitungsdienst)

bis 5 Jahre 6 - 10 Jahre 11 - 15 Jahre
 16 - 20 Jahre 21 - 25 Jahre über 26 Jahre

- 4.5 Haben Sie Chemie oder ein Fach mit Bezug zur Chemie studiert?

Naturwiss. Grundsch. Naturwiss. Fördersch. Chemie Lehramt
 Chemie Dipl./B./M. Sonstiges Nein

- 4.6 Unterrichten Sie das Fach Chemie momentan?

Ja Nein

- 4.7 Haben Sie ein weiteres Fach neben dem Fach Chemie studiert? (Mehrfachnennungen möglich)

Mathematik Physik Biologie
 Geographie Sonstiges Nein

- 4.8 Unterrichten Sie dieses Fach momentan?

Ja Nein

Vielen herzlichen Dank für Ihre Mitarbeit!

