

# Lebensmittelverpackungen als Thema des Chemieunterrichts

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften

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

von

Bernd Landsgesell

aus Bad Soden-Salmünster

Frankfurt 2010  
(D 30)

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

Dekan: Herr Univ.-Prof. Dr. D. Steinhilber

Gutachter: Herr Univ.-Prof. Dr. H. J. Bader, Herr Jun. Prof. Dr. A. Lühken

Datum der Disputation: 14. 12. 2010

Die vorliegende Arbeit entstand in der Zeit  
von Mai 1999 bis Juni 2010  
am Institut für Didaktik der Chemie  
der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main  
unter der Leitung von  
Herrn Professor Dr. Hans Joachim Bader.

Herrn Professor Dr. Hans Joachim Bader gilt mein aufrichtiger Dank  
für die interessante Themenstellung  
sowie die stete Bereitschaft  
zur konstruktiven Diskussion.

Mein besonderer Dank gilt  
Herrn Dieter Sgoff  
für die wertvolle Unterstützung und Hilfsbereitschaft  
bei der Erstellung dieser Arbeit.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Ausgewählte fachwissenschaftliche Aspekte zur Funktion von Lebensmittelverpackungen (Sachstruktur)</b>	<b>10</b>
2.1	Allgemeine Zusammenhänge	10
2.1.1	Vorüberlegungen	10
2.1.2	Erwartungen an Lebensmittelverpackungen	10
2.1.3	Lebensmittelrecht	12
2.2	Funktionen von Verpackungsmaterialien	12
2.2.1	Übersicht über mögliche Gefährdungen und eingesetzte Materialien	12
2.2.2	Sauerstoff-Barriere	16
2.2.3	Vergleich der Sauerstoffdurchlässigkeit unterschiedlicher Folien	17
2.2.4	Die Rolle des Sauerstoffs bei der Verpackung von Frischfleisch	20
2.2.5	Transparenz und Lichtschutz	21
2.2.5.1	Lichtgefährdete Lebensmittel und ihre Bestandteile	22
2.2.6	Wasserdampf-Barriere	24
2.2.7	Kohlenstoffdioxid-Barriere	26
2.2.8	Verhinderung von Wechselwirkungen zwischen Packstoff und Füllgut	27
2.2.9	Thermische Belastbarkeit von Kunststoffen	28
2.3	Technologische und ökologische Aspekte	30
2.3.1	Herstellung von Verbundfolien	30
2.3.2	Umweltbelastungen durch Verpackungen	32
2.3.2.1	Ökologische Bewertung von Verpackungsmaterialien	32
2.3.2.2	Verpackungsverordnung	33
<b>3</b>	<b>Didaktisch-methodischer Kommentar – Begründung zur Behandlung des Themas im Chemieunterricht</b>	<b>35</b>
3.1	Gegenwartsbedeutung	35
3.2	Vermutete Zukunftsbedeutung	36
3.3	Exemplarische Bedeutung	36
3.4	Thematische Struktur	37
3.5	Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit	39
3.6	Zugänglichkeit bzw. Darstellbarkeit	40
3.7	Lehr-Lern-Prozessstruktur (Methodik)	40
3.8	Zusammenfassung	41
<b>4</b>	<b>Derzeitiger Stand der fachdidaktischen Forschung unter besonderer Berücksichtigung des Themas „Lebensmittelverpackungen“</b>	<b>42</b>
4.1	Die Krise des Chemieunterrichts: Ursachen und Lösungen	42
4.2	Das Thema „Packstoffe“ in der methodisch-didaktischen Literatur	43
4.2.1	Berücksichtigung des Alltagsbezuges	43
4.2.2	Berücksichtigung von Schülerinteressen	45
4.2.3	Schülerexperimente	46
4.2.4	Förderung der Selbstständigkeit	47
4.3	Zusammenfassende Bewertung der vorliegenden fachdidaktischen Literatur	48
4.4	„Lebensmittelverpackungen“ als Thema in ausgewählten Schulbüchern	52
<b>5</b>	<b>Konsequenzen für die eigene Arbeit</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>Übersicht zu experimentell erschließbaren Teilen von Lebensmittelverpackungen und ihren Funktionen</b>	<b>56</b>
6.1	Verpackungen für Milch und Joghurt	57
6.2	Getränkedosen	60
6.3	Konservendosen	61
6.4	Aluminiumhaltige Verbunde	62
6.5	PVC	64
6.6	Mehrschichtige Kunststoff-Folien	66
6.7	Verpackung von Babybel-Käse	67

6.8	Obstschalen	68
6.9	Barrierefunktion unterschiedlicher Verpackungsmaterialien - Diffusionsfähigkeit verschiedener Substanzen	69
6.9.1	Migration	69
6.9.2	Permeation	70
6.9.2.1	Durchlässigkeit einer fettlöslichen Modellsubstanz (Sudanrot 7B)	70
6.9.2.2	Sauerstoff-Durchlässigkeit	70
6.9.2.3	Kohlenstoffdioxid-Durchlässigkeit	70
6.9.2.4	Wasserdampf-Durchlässigkeit	70
6.10	Zusammenfassung zur experimentellen Erschließbarkeit / Kriterien für ein Ordnungssystem der Experimentiervorschriften	71
<b>7</b>	<b>Ordnung der Experimente nach Stoffklassen und Funktionen sowie nach dem Ausmaß der eigenen Bearbeitung und Entwicklung</b>	<b>72</b>
<b>8</b>	<b>Lehrplanbezug der Experimente</b>	<b>77</b>
<b>9</b>	<b>Einfache Versuche mit geringerem Zeitaufwand</b>	<b>77</b>
<b>10</b>	<b>Das Thema „Lebensmittelverpackungen“ unter dem Gesichtspunkt des Struktur-Eigenschaften-Konzeptes</b>	<b>82</b>
10.1	Aluminiumhaltige Verpackungen	82
10.2	Getränkeflaschen aus verschiedenen Materialien	84
10.3	Verbund-Folien (PA/PE)	86
10.4	Zusammenfassende Bewertung des Struktur-Eigenschaften-Konzeptes	88
<b>11</b>	<b>Ausgewählte Unterrichtseinheiten des Themas „Lebensmittelverpackungen“ im Rahmen verschiedener Unterrichtsverfahren.</b>	<b>91</b>
11.1	Thema 1: Untersuchung des Aufbaus einer aus mehreren Komponenten bestehenden Folie (Forschend-entwickelndes Unterrichtsverfahren)	94
11.2	Thema 2: Untersuchung einer aluminiumhaltigen Folie (Forschend-entwickelndes Unterrichtsverfahren)	98
11.3	Thema 3: Untersuchung der Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien (Analytisch-synthetisches Verfahren)	105
11.4	Thema 4: Rund um den Joghurtbecher (Expertenunterricht)	111
11.5	Thema 5: Nachweis der Lichtschutzfunktion bei Lebensmittelverpackungen (Chemie im Kontext)	114
11.6	Thema 6: Metalldosen als Lebensmittelverpackungen / Experimente zur Ermittlung von Aufbau und Funktion (Chemie im Kontext)	117
11.7	Thema 7: Zerlegung von Polymeren durch Hydrolyse (PA, PET, PC, Cellophan), (Chemie im Kontext)	119
11.8	Thema 8: PVC als Bestandteil von Verpackungen (Wahldifferenzierter Chemieunterricht)	124
11.9	Thema 9: Welche Verpackung für unsere Schulmilch? (Projektunterricht / projektorientierter Chemieunterricht)	126
11.10	Eigene Bewertung zu den Einsatzmöglichkeiten der in diesem Kapitel vorgestellten verschiedenen Unterrichtsverfahren	132
<b>12</b>	<b>Aufgabensammlung zum Thema „Lebensmittelverpackungen“</b>	<b>134</b>
12.1	Aufgaben	134
12.2	Lösungen	140
<b>13</b>	<b>Lehrerfortbildung</b>	<b>146</b>
13.1	Eigene Einschätzung zur Optimierung der angebotenen Veranstaltung	149
<b>14</b>	<b>Zusammenfassende Überlegungen zum Einsatz von Schülerversuchen und Lehrerversuchen im vorliegenden Thema</b>	<b>150</b>
<b>15</b>	<b>Experimenteller Teil</b>	<b>152</b>
<b>15.1</b>	<b>Metalle</b>	<b>152</b>
V 1.1:	Entfernung der Aluminiumschicht aus größeren Verbunden	152

V 1.2.1: Nachweis der Aluminiumschicht in einer Verbundfolie mit Alizarin S	153
V 1.2.2: Herstellung von Thénards Blau aus dem Deckel einer Getränkedose	154
V 1.3.1: Ermittlung der Dicke einer Aluminiumschicht mit Hilfe von Teststreifen (Merck)	156
V 1.3.2: Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens	158
V 1.3.3: Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht durch ein titrimetrisches Verfahren	161
V 1.4.1: Anodische Oxidation des Aluminiums aus einer Getränkedose durch Elektrolyse	164
V 1.4.2: Oxidation von Aluminium aus einer Kaugummifolie durch Luftsauerstoff (Galvanische Zelle)	166
V 1.4.3: Aluminium-Sauerstoff-Element mit Blech aus einer Getränkedose	167
V 1.5: Umschmelzen von Aluminium im Mikrowellenofen	167
V 1.6: Anodische Oxidation von Eisen aus einer Getränkedose durch Elektrolyse	168
V 1.7.1: Untersuchung der Zinnschicht einer Konservendose	168
V 1.7.2: Ermittlung des Zinngehaltes von Weißblech durch Titration mit Iodlösung	172
V 1.7.3: Trennung von Zinn- und Eisen-Ionen aus Weißblech durch Fällung als Sulfide mit Thioacetamid	174
<b>15.2 Makromoleküle und Kohlenstoffverbindungen</b>	<b>178</b>
V 2.1: Nachweis von Terephthalsäure durch alkalische Hydrolyse von PET	178
V 2.2: Untersuchung von Obstschalen (Nachweis von PET, PP und PS)	180
V 2.3: Herstellung einer Folie aus einem Polystyrol-Joghurtbecher	183
V 2.4.1: Nachweis von Polycarbonat	184
V 2.4.2: Nachweis von Bisphenol A durch alkalische Hydrolyse von Polycarbonat	185
V 2.5.1: Nachweis der Polyamidschicht einer Käsefolie (Polyamid/Polyethylen-Verbund) durch den Pyrolysetest	187
V 2.5.2: Selektive Anfärbung einer Polyamidschicht mit Lebensmittelfarbstoffen	187
V 2.5.3: Nachweis der Polyamidschicht einer Käsefolie (Polyamid-Polyethylen-Verbund) durch Ablösen mit Salzsäure	189
V 2.5.4: Nachweis von Polyamid mit Dimethylaminobenzaldehyd	190
V 2.5.5: Trennung der beiden Bestandteile eines PA/PE-Folienverbundes einer Käsefolie mit Hilfe von Essigsäure	191
V 2.5.6: Identifizierung des aus einem PA/PE-Verbund stammenden Polyamid-Typs durch Ermittlung des Schmelzbereiches	192
V 2.5.7: Zerlegung von Polyamid (PA 6) durch saure Hydrolyse	192
V 2.6: Tiefziehfolien und Deckfolien, Mehrschichtfolien mit EVOH	193
V 2.7: Zerlegung eines Getränkekartons	197
V 2.7.1: Nachweis des Holzstoffes Lignin in Papier und Karton	198
V 2.8.1: Hinweis auf Cellulose-Bestandteile in Verpackungen durch den Molisch-Test auf Kohlenhydrate	198
V 2.8.2: Zersetzung von regenerierter Cellulose durch saure Hydrolyse	200
V 2.9: Nachweis von Epoxidharz als Innenbeschichtung einer Getränkedose	201
V 2.10.1: Stoffliche Identifizierung des Kunststoff-Stülpedeckels eines Joghurtbechers	204
V 2.10.2: Herauslösen des Weichmachers aus einer Dichtungsmasse mit Hilfe von Olivenöl	206
V 2.10.3: Herauslösen des Weichmachers aus einer PVC-Folie	207
V 2.10.4: Bestimmung des PVC-Gehaltes von Dichtungsmassen mit dem Schöniger-Verfahren	208
V 2.10.5: Nachweis von Phthalsäureestern als Weichmacher in PVC	213
V 2.10.6: Dünnschichtchromatografische Untersuchung von Weichmachersubstanzen	215
V 2.11: Acetaldehyd-Freisetzung aus zerkleinerten PET-Flaschen	216
V 2.12.1: Isolierung und Nachweis des roten Farbstoffes aus der Paraffinschicht von Babybel-Käse	219
V 2.12.2: Versuche mit der roten Cellophan-Folie einer Käseverpackung (Babybel®)	221
V 2.12.3: Selektive Färbung von PET mit dem roten Farbstoff aus der Babybel-Folie	224
V 2.13: Nachweis von Titandioxid im weißen Joghurtbechern	225
V 2.14: Untersuchung der Struktur eines Flaschenkorkens und eines Styropor-Stückes	226
V 2.15: Mechanische Stabilität / Elastizitätsmodul verschiedener Folien	227
V 2.16.1: Messung der von einer Schrumpffolie beim Erwärmen erzeugten Kraft	235
V 2.16.2: Thermische Stabilität verschiedener Thermoplaste (PS, PP und PET)	237
V 2.17: Thermisches Verhalten der Babybel-Wachsschicht: Suche nach Schmelz- und Erstarrungspunkt	238
<b>15.3 Glas</b>	<b>238</b>
V 3.1: Herstellung von Glasgrieß-Suspensionen und von Glaspulver verschiedener Glassorten	238
V 3.2.1: Vergleich von Natronkalkglas und Borosilicat-Glas - Elektrische Leitfähigkeit der Glasgrieß-Suspensionen	240
V 3.2.2: Vergleich von Natronkalkglas und Borosilicat-Glas - Test auf alkalische Reaktion	241
V 3.2.3: Vergleich zweier Glassorten hinsichtlich ihrer Wasserbeständigkeit	242
V 3.3: Schmelzen von Flaschenglas (Natronkalkglas) im Mikrowellenofen	244

<b>15.4</b>	<b>Barrierewirkung und Durchlässigkeit</b>	<b>245</b>
V 4.1.1:	Fernhalten des Sauerstoffs von sauerstoffempfindlichen Substanzen	245
V 4.1.2:	Sauerstoffdurchlässigkeit von Folien - ermittelt mit einer Zink-Luft-Batterie	246
V 4.2.1:	Halbquantitativer Nachweis für die CO <sub>2</sub> -Durchlässigkeit einer PET-Flasche – Ermittlung der pH-Änderung durch Farbumschlag von Bromthymolblau	255
V 4.2.2:	Halbquantitativer Nachweis für die CO <sub>2</sub> -Durchlässigkeit einer PET-Flasche – Ermittlung der pH-Änderung mit Hilfe eines pH-Meters	258
V 4.2.3:	Halbquantitativer Nachweis des Verlustes von Kohlenstoffdioxid und Wasser aus PET-Cola- Flaschen durch gravimetrische und volumetrische Messungen	260
V 4.2.4:	Halbquantitativer Nachweis des Verlustes von Kohlenstoffdioxid und Wasser aus PET-Cola- Flaschen durch gravimetrische und titrimetrische Messungen	267
V 4.2.5:	Nachweis von Kohlenstoffdioxid in den Wänden von Getränkeflaschen mit Kalkwasser	272
V 4.3:	Wasserdampfdurchlässigkeit von Kunststoff-Folien	273
V 4.4:	Untersuchung der Permeabilität ausgewählter Kunststoff-Folien für einen fettlöslichen Farbstoff	280
V 4.5:	Lichtdurchlässigkeit von gefärbtem und ungefärbtem Glas	284
<b>16</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>286</b>
<b>17</b>	<b>Anhang</b>	<b>289</b>
17.1	Kunststoffe: Abkürzungen und Übersicht	289
17.2	Übersicht: Verwendete Chemikalien	291
17.3	Übersicht: Herstellung verwendeter Reagenzien	297
17.4	Übersicht: Bezugsquellen ausgewählter Materialien	299
17.5	Übersicht: Abbildungen	300
17.6	Übersicht: Tabellen	302
17.7	Literatur	304

## 1 Einleitung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die experimentelle Erschließung des Themas „Lebensmittelverpackungen“ für den Chemieunterricht sowie dessen didaktisch-methodische Bewertung. Im Zentrum steht dabei die Frage, wie sich durch experimentelle Analyse von Lebensmittelverpackungen Erkenntnisse über chemische Lerninhalte gewinnen und darstellen lassen. Dabei sind Aufbau und Funktion der Packstoffe die beiden wichtigen Untersuchungsgegenstände des experimentellen Arbeitens. Besondere Berücksichtigung findet der Einsatz der Verpackungsmaterialien selbst als „Laborchemikalien“. Ebenfalls berücksichtigt werden bei der Planung der Experimente die Möglichkeiten zur Optimierung des Zeitbedarfs, der Materialersparnis und der Verwendung gesundheitlich möglichst unbedenklicher Substanzen. Dies gilt auch für die Revision bereits vorliegender Versuchsvorschriften.

Obwohl eine beträchtliche Zahl an Versuchsanleitungen zu den verschiedenen Stoffklassen vorliegt, findet man Verpackungsmaterialien nur selten als gezielt ausgewählten zentralen Gegenstand einer Arbeit. Ist auch der häufig geforderte Alltagsbezug des hier bearbeiteten Themas offensichtlich, wird er doch selten in diesem Zusammenhang erwähnt [1].

Es erscheint somit attraktiv, das Thema „Lebensmittelverpackungen“ in das Zentrum ausführlicher Erörterungen zu stellen und somit diese Themen-Lücke zu schließen. Mit Blick auf die Schülerseite wiederum stellt sich die Frage, ob der starke Alltagsbezug dieses Themas den Jugendlichen bewusst ist. Immerhin zeigt eine Studie, dass Schüler dem Themenkomplex „Alltag und Umwelt“ auch den Aspekt „Verpackungen für Lebensmittel“ zuordnen würden [2].

Lebensmittelverpackungen müssen der außerordentlich hohen Empfindlichkeit von bereits zubereiteten Lebensmitteln gerecht werden, handelt es sich doch um Substanzen „mit meist geringer chemischer Stabilität“, die „zahlreichen Möglichkeiten des Verderbs ausgesetzt“ sind [3, S. 3]. Neben den Ansprüchen an mechanische Stabilität sowie den Schutz vor Fremdgerüchen, Licht und Mikroorganismen muss die Verpackung am Lebensmittel den Gehalt an Wasserdampf, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Aromasubstanzen möglichst konstant halten. Unkontrollierter Ein- oder Austritt dieser Substanzen führt zu Reaktionen, welche die vorzeitige Veränderung oder Zerstörung des Füllgutes zur Folge haben [4, S. 6]. Diese vielfältigen Ansprüche mit jeweils unterschiedlichen Gewichtungen erfordern unterschiedliche Verpackungsmaterialien, wie Glas, Weißblech, Aluminium, Kunststoffe, Papier sowie deren Kombination. Die Forschungsarbeit von Verpackungstechnikern orientiert sich aber nicht nur an der optimalen Erfüllung eines Eigenschaftsprofils, sondern auch an der Minimierung des Materialeinsatzes. Neben der Umweltverträglichkeit der ausgewählten Materialien müssen auch deren Herstellungskosten berücksichtigt werden.

Es stellt sich nun die Frage, wie diese fachwissenschaftlichen Grundlagen Schülern vermittelt werden können.

Hierbei geht es nicht nur um das Sammeln geeigneter Experimente, sondern auch um die Frage, wie der Zusammenhang von Struktur und Funktion von den Lernenden nachvollzogen werden kann. Stets ist dabei auf die Begründung zu achten, warum bestimmte Materialien als Verpackungstoffe verwendet werden. Zur erfolgreichen Einordnung in den aktuellen didaktisch-methodischen Kontext müssen weiterhin geeignete Unterrichtsverfahren ausgewählt werden, stets mit Blick auf die konkreten Erfordernisse des Chemieunterrichtes sowie der Lehrpläne [5, S. 26-28], [6, S. 61], [7], [8].

## 2 Ausgewählte fachwissenschaftliche Aspekte zur Funktion von Lebensmittelverpackungen (Sachstruktur)

### 2.1 Allgemeine Zusammenhänge

#### 2.1.1 Vorüberlegungen

PIRINGER [3, S. 1] schreibt über Verpackungen: „Der Begriff Verpackung erweckt unwillkürlich den Eindruck von etwas Nebensächlichem, das ohne die Verbindung zum eigentlichen Inhalt, dem verpackten Gut, keinen Wert besitzt. Dieser Eindruck wird durch eine täglich von uns vollzogene Handlung beim Entleeren einer Packung erhärtet, der wir den Beinamen „Wegwerfgesellschaft“ verdanken. Im Augenblick der Trennung vom Inhalt wird die Verpackung für uns – von der möglicherweise noch einlösbaren Pfandgebühr abgesehen – nicht nur wertlos, sondern zu einem lästigen Abfallproblem“ [3, S. 1].

In einem Supermarkt sollte man sich aber nicht nur von Sonderangeboten und der beeindruckenden Werbewirksamkeit der verschiedenen Beutel, Schalen, Becher, Flaschen, Dosen und Kartons beeindrucken lassen. Man sollte sich auch die Frage stellen, warum verschiedene Lebensmittel in unterschiedlichen Verpackungen angeboten werden, also welche unverzichtbare Funktion diese zu erfüllen haben. Zur Vereinfachung: Man stelle sich einmal vor was geschähe, wenn die angebotenen Lebensmittel einen Tag lang ohne Verpackung in den Regalen lägen.

Lebensmittel wie Äpfel, Citrusfrüchte, Bananen, Kiwis, Gurken und Kartoffeln können einige Zeit ohne Verpackung gelagert werden, ohne dass sie verderben. Hier liefert die Natur selbst die Verpackung. Deren Bedeutung erkennt man, wenn man die Schale z. B. eines Apfels entfernt. Ein zubereiteter Obstsalat muss also umgehend speziell verpackt werden, damit er nicht verdirbt. Kühle Aufbewahrung verzögert den Verderb, ersetzt aber nicht die passende Hülle. Es stellt sich nun die Frage, wie die jeweils passende Hülle zu sein hat, mit deren Hilfe Schinken, Milch und Joghurt für einige Tage genießbar bleiben. Die Qualitätserhaltung der Lebensmittel ist die wichtigste Aufgabe der Verpackung.

#### 2.1.2 Erwartungen an Lebensmittelverpackungen

„Die Fitness- und Gesundheitswelle fördert den Verzehr pflanzlicher Lebensmittel, aber oftmals fehlt bei Berufstätigen die Zeit zur Zubereitung eines Salates oder Singles wollen Obst und Gemüse nicht in großen Portionen kaufen. Bedarfsgerechte Convenience-Angebote kommen den Verbrauchern daher entgegen“ [9].

So werden mittlerweile im Lebensmitteleinzelhandel in vielen Obst- und Gemüseabteilungen Einzelportionen mit frisch zugeschnittenem Obst und Gemüse angeboten. Werden diese in einer Schale mit durchsichtiger Stretchfolie verkauft, beträgt die Haltbarkeit im Gemüsefach (4 – 5 °C) nur 1 bis 3 Tage. Mit einer Schutzgasatmosphäre hingegen, die frei von Sauerstoff ist oder nur sehr wenig Sauerstoff enthält, kann die Haltbarkeit auf ca. 6 Tage erhöht werden. Dieses Beispiel zeigt, wie die Wünsche der Verbraucher sich auf Hersteller und Handel auswirken. Die erwähnten Verpackungen schaffen mehr Flexibilität für alle, die mit dem verpackten Nahrungsmittel zu tun haben.

Historisch betrachtet, hat die Art der Verpackung von Lebensmitteln „mit dem Wechsel vom Bedienungsgeschäft zum Supermarkt einen dramatischen Wandel erfahren. Großbinde sind weitgehend verschwunden, ebenso auch die Dosierung und das Abpacken von Hand. (..) Die Portionsverpackung ist eine zwangsläufige Folge geänderter Distributionsformen, aber auch

eine Folge der immer kleiner werdenden Verbrauchergruppen (Alleinerziehende, Singles, ältere Menschen)“ [4, S. 3]. Ökologisch denkende Verbraucher achten auch auf den sparsamen Einsatz von Verpackungsmaterial.

Aber nicht nur der Endverbraucher stellt seine Anforderungen an die Lebensmittelverpackung. Auch Handel und Hersteller haben Interessenschwerpunkte, damit ihr jeweiliger Abnehmer die Produkte weiterhin anfordert und der Warenweiterverkauf gewinnbringend funktioniert – unter Einhaltung lebensmittelhygienischer Vorgaben. Eine Übersicht bietet die folgende Abbildung. Hier wird auch deutlich, dass Interessenschwerpunkte völlig unterschiedlich gelagert sein können. Während der Verbraucher möglichst hohe Lebensmittelqualität in möglichst bequem handhabbarer Verpackung zu Niedrigpreisen erwartet, besteht die Herausforderung für den Handel darin, einen möglichst großen Durchsatz möglichst frischer Ware zu erzielen. Der Hersteller hingegen trägt die primäre Verantwortung für die einwandfreie hygienische Lebensmittelverpackung und für den problemlosen Vorgang des Verpackens.

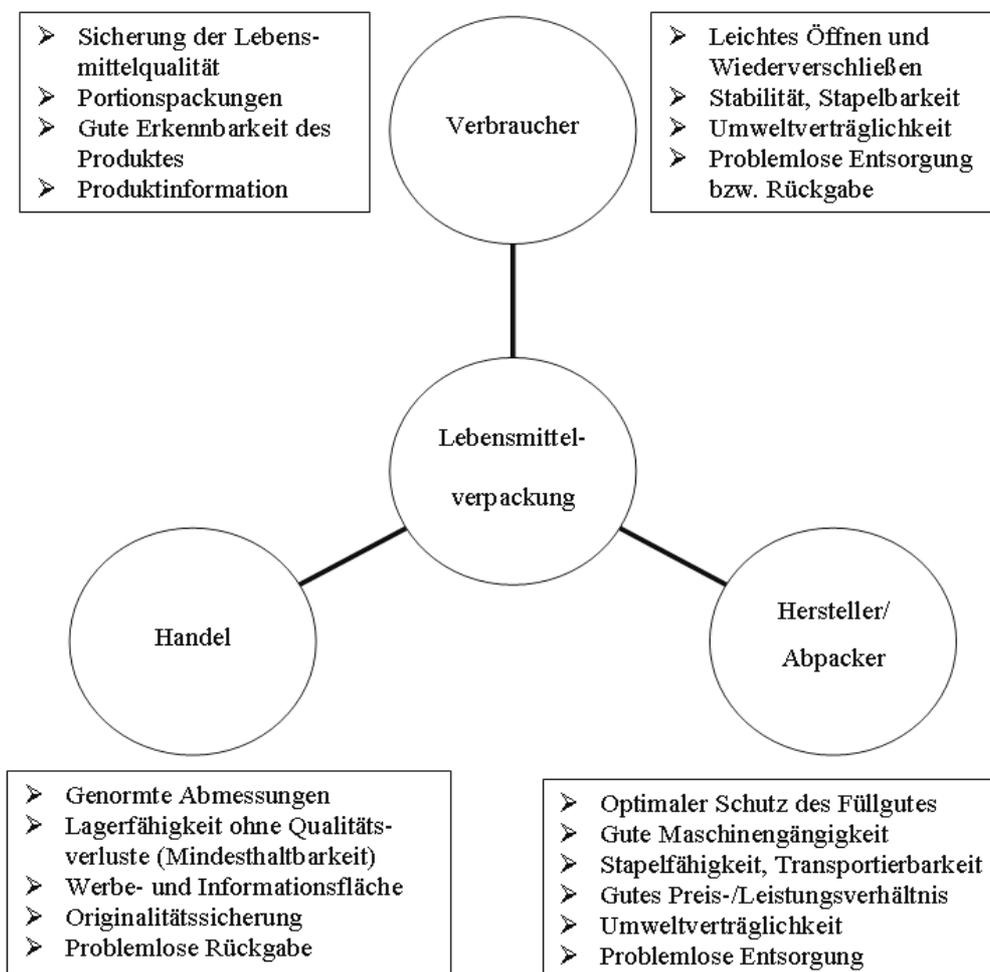


Abbildung 1: Interessenschwerpunkte verschiedener Bereiche des Verpackungswesens (nach [4, S. 3-5])

Im Zeitalter der Selbstbedienung in Supermärkten müssen die Waren sich selbst dem Verbraucher anpreisen. Dies liegt ganz besonders im Interesse des Handels. Außerdem muss die Lagerfähigkeit in einem ausreichenden Ausmaß gegeben sein, damit das flexible Bereithalten der Waren möglich ist. Letztlich muss der Hersteller alle unterschiedlichen Anforderungen beachten, wozu von der Marktseite her das Verhalten des Endverbrauchers gehört. Der Hersteller von Lebensmittelverpackungen kann sich auf dem Markt besser behaupten, wenn er innovationsbereit ist und immer wieder neue preisgünstige Verpackungslösungen für sich verändernde Anforderungen anbietet. Eine nostalgisch oder sozial motivierte Rückkehr zu

früheren Formen der Käuferbedienung mit dem Verkauf loser, unverpackter Waren hätte hingegen eine Steigerung der Verbraucherpreise zur Folge [4, S. 3]. Bei allen ökonomischen Überlegungen sollte man jedoch „nicht vergessen, dass richtiges Verpacken eine lebensnotwendige Bedingung für eine vorausschauende Vorratspolitik und Versorgung der Bevölkerung ist“ [4, S. 2].

### **2.1.3 Lebensmittelrecht**

In Deutschland gilt für den Verkehr mit Lebensmitteln seit dem 1.8.2005 das Lebensmittel- und Futtermittelgesetzbuch (LFGB) als Rechtsvorschrift, welche dem Schutz der Verbraucher dienen soll [10, XII, XIII, S. 49]. Im Gesetzestext ist festgelegt, was man unter Lebensmitteln zu verstehen hat. Danach gehören zu den Lebensmitteln Getränke, Kaugummi und Wasser nebst allen zur Bearbeitung absichtlich zugesetzten Stoffen. Tabak ist hingegen nicht als Lebensmittel definiert [10, S. 49 f., 13 f.]. Das Verpacken von Lebensmitteln wird als eine Form des „Behandelns“ eingestuft [10, S. 51].

Die Fertigpackungsverordnung (FPackV) enthält Vorschriften über die verbindliche Standardisierung von Fertigpackungen. Die Definition der „Fertigpackung“ ist im Eichgesetz verankert [10, S. 137–166, XX, XXI].

Die Lebensmittel-Kennzeichnungsverordnung (LMKV) bezieht sich in ihrem Anwendungsbereich auf Fertigpackungen.

Zu den vorgeschriebenen Kennzeichnungselementen gehören:

- das Verzeichnis der Zutaten (substanzbezogene Kennzeichnung)
- die Verkehrsbezeichnung (Produktname, Identifizierung eines Lebensmittels)
- das Mindesthaltbarkeitsdatum (Ausnahmen: frisches Obst, Gemüse, alkoholische Getränke mit einem Alkoholgehalt von mindestens 10 Vol.-%)
- das Verbrauchsdatum (bei in mikrobiologischer Hinsicht sehr leicht verderblichen Lebensmitteln) [10, S. 111 f., 117-119], [11, S. 39].

Für Hackfleisch und tiefgefrorene Fleischerzeugnisse müssen Warnhinweise gegeben werden, wie z. B. „nach dem Auftauen sofort verbrauchen“ oder bei anderen Erzeugnissen „nach dem Öffnen kühl aufbewahren“ [11, S. 36 f.].

„Für Verpackungsgesichtspunkte besonders angemessen ist eine Einteilung der Lebensmittel nach ihrer Haltbarkeit“ [11, S. 38]. Der Begriff „leicht verderbliche Lebensmittel“ ist in der Lebensmittelhygiene-Verordnung (LMHV) näher bestimmt [10, S. 364]. Zu diesen gehören Milchprodukte, frische Backwaren, Frischfleisch, Geflügel, Fisch, frisches Obst und Gemüse. „Ihre Haltbarkeit liegt zwischen 2 und 30 Tagen. Alle Produkte dieser Gruppe müssen kühl (0 bis 7 °C) oder tiefgekühlt (-12 bis – 20 °C) aufbewahrt und durch entsprechende Verpackung vor Wechselwirkung mit der Umgebung geschützt werden“ [11, S. 38].

## **2.2 Funktionen von Verpackungsmaterialien**

### **2.2.1 Übersicht über mögliche Gefährdungen und eingesetzte Materialien**

An Qualität und Haltbarkeit von Lebensmitteln werden heute sehr hohe Anforderungen gestellt. Lebensmittelverpackungen müssen besonders der Empfindlichkeit von bereits zubereiteten Lebensmitteln gerecht werden, handelt es sich doch um Substanzen, die leicht einem enzymatischen Abbau zugänglich sind [3, S. 3]. Wie lebenswichtig es für die Bevölkerung ist, Nahrungsmittel sachgerecht zu lagern, zeigt folgende Feststellung: „In den so genannten Entwicklungsländern rechnet man während Lagerung und Transport mit einem Verlust von 50 % der Lebensmittel, der mit entsprechender Verpackung minimiert werden

könnte. In Westeuropa liegen die Verluste an Nahrungsmitteln nur zwischen 1 und 2 % [4, S. 2].

Neben den Ansprüchen an mechanische Stabilität sowie dem Schutz vor Fremdgerüchen, Licht und Mikroorganismen muss die Verpackung am Lebensmittel den Gehalt an Wasserdampf, Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Aromasubstanzen möglichst konstant halten. Während z. B. Kekse durch das Eindringen von Wasserdampf an Qualität verlieren, besteht bei Brot die Gefahr des Wasserdampf-Verlustes und damit der Austrocknung. Einen Überblick über die Gefährdungen zeigt Abb. 2.

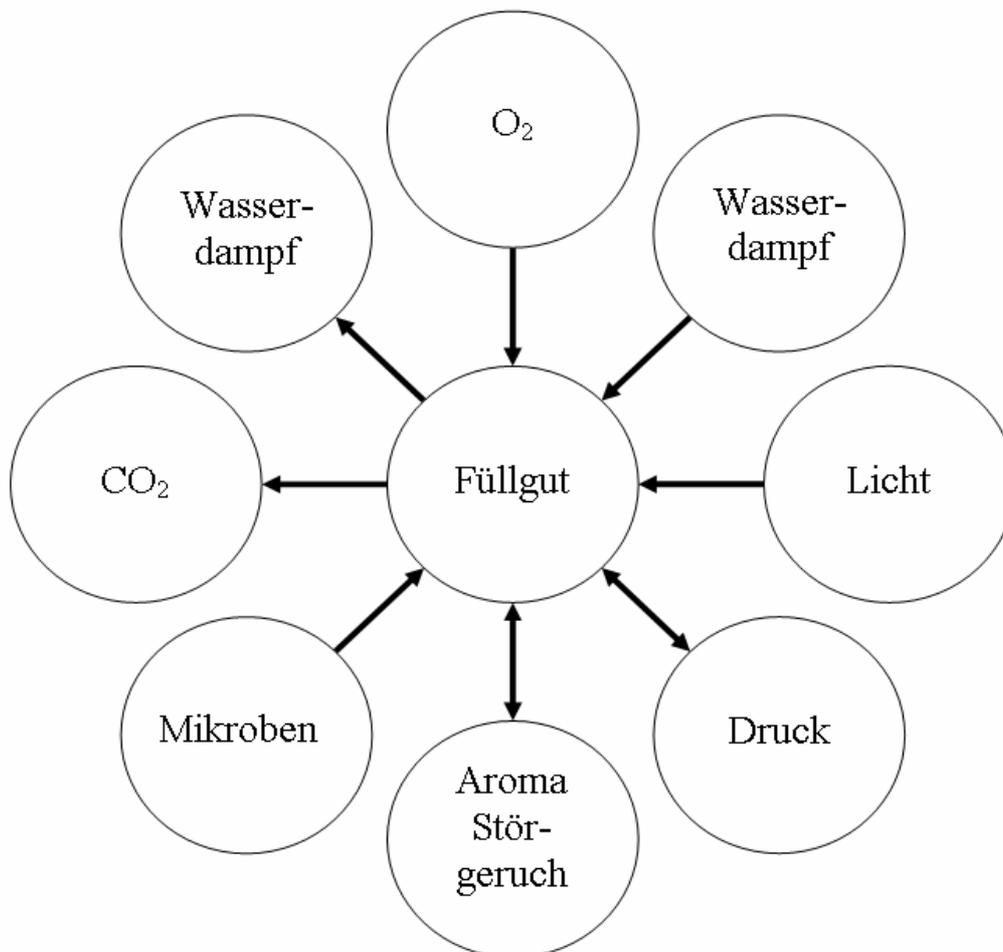


Abbildung 2: Gesamtheit der Belastungen, die dem Füllgut schaden können

Wie Tab. 1 zeigt, führt unkontrollierter Ein- oder Austritt bestimmter Substanzen zu Reaktionen, welche die vorzeitige Veränderung oder Zerstörung des Füllgutes zur Folge haben:

Tabelle 1: Mögliche Veränderungen am Füllgut bei fehlender Barriere [4, S. 6, 9], [11, S. 374], [12, S. 523 f.]

Gefährdung durch unkontrollierte Vorgänge	Veränderungen im Füllgut
Sauerstoffeintritt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Oxidation von Fetten („Ranzigkeit“)</li> <li>▪ Vitaminabbau</li> <li>▪ Aromazerstörung</li> </ul>
Wasserdampfeintritt	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verlust der Knusprigkeit</li> <li>▪ Verklumpen hygroskopischer Produkte</li> <li>▪ Wachstum von Mikroorganismen</li> </ul>
Wasserdampfverlust	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Austrocknen</li> <li>▪ Ausfällung löslicher Produkte</li> <li>▪ Veränderung von Emulsionen („Fettränder“)</li> </ul>
Kohlenstoffdioxidverlust	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Veränderung von Getränken</li> <li>▪ Änderung der Schutzgasatmosphäre</li> </ul>
Lichteintritt, UV-Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verstärkung und Beschleunigung der Oxidationsvorgänge („Fotooxidation“)</li> <li>▪ Umsetzung von Methionin zu Methional (Entstehung des „Lichtgeschmacks“)</li> </ul>

Es stellt sich nun die Frage, wie die Schutzfunktion für Lebensmittel erfüllt werden kann und welche Materialien dafür zum Einsatz kommen. Die vielfältigen Ansprüche mit unterschiedlichen Gewichtungen machen deutlich, dass es „die Lebensmittelverpackung“ schlechthin nicht geben kann. Vielmehr sind jeweils spezielle Kombinationen von unterschiedlichen Verpackungsmaterialien erforderlich. Eine Übersicht zum Materialeinsatz bei Verkaufsverpackungen in Deutschland bietet Abb. 3.

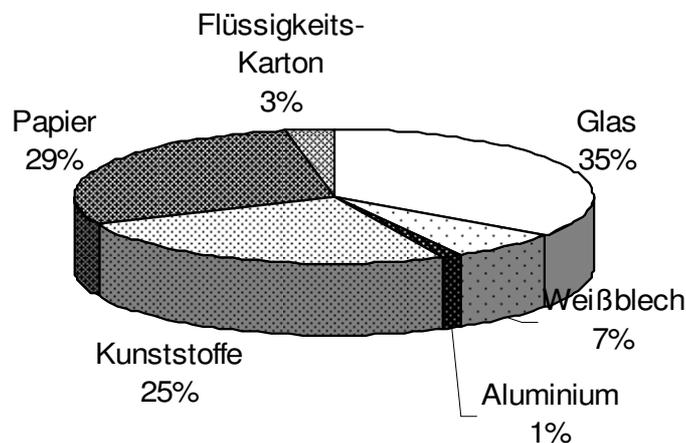


Abbildung 3: Errechnete Massenanteile einzelner Materialien an Verkaufsverpackungen für private Endverbraucher, 2006 [13]

Das Kreisdiagramm in Abb. 3 zeigt, dass rund 90 % der Masse an Verpackungen auf Glas, Papier und Kunststoffe entfallen, wodurch der geringe Anteil an Metallen besonders deutlich wird. Bei den Kunststoffen findet man die größte Vielfalt und die meisten Kombinationsmöglichkeiten.

Eine exemplarische Übersicht über die Anwendung der in Abb. 3 erwähnten Materialien im Lebensmittelbereich zeigt Tab. 2.

Tabelle 2: Beispiele für die Anwendung von Packstoffen

<b>Material</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>
Glas	Mehrweg-Flaschen für Mineralwasser, Milchflaschen, Joghurtgläser
Weißblech	Getränkedosen, Konservendosen, Schraubdeckel für Milchflaschen und Joghurtgläser
Aluminium	Getränkedosen, Menüscherben, als Monofolie (Schokoladenverpackung), als lackierte und mit Kunststoff kaschierte, formstabile Folie (Joghurtdeckel), Schraubdeckel für Glasflaschen, Bestandteil von Folien im Verbund mit Kunststoffen (Verpackung von Erdnüssen oder Kartoffelchips), Bestandteil von Folien im Verbund mit Papier (Butterwickler, Kaugummifolie), Bestandteil von Kartonverpackungen aseptisch verpackter Getränke (H-Milch)
Papier	Beutel für trockenes Füllgut (Zucker, Mehl), Karton-Außenverpackung für Kunststoff-Beutel (Cornflakes, Kochbeutel), geformte Pappe (Eier, Obst), Umhüllung von Joghurtbechern, Bestandteil von Flachbeuteln im Verbund mit Kunststoff und Aluminium (Fertigsuppen), Bestandteil von Getränke-Verpackungen
Flüssigkeits-Karton	Karton im Verbund mit Kunststoff (Frischmilch), im Verbund mit Kunststoff und Aluminium (H-Milch, Fruchtsaft)

<b>Kunststoffe</b>	
Polyethylenterephthalat (PET)	Flasche (Mineralwasser, Coca-Cola), Obstschale, mikrowellenfeste Schalen
Polyethylen geringer Dichte (PE-LD)	Beutel oder Schrumpffolie für tief gefrorene Lebensmittel, im Verbund mit anderen Kunststoffen stets in Kontakt zum Füllgut: Schlauchbeutel, Tiefziehschale, Deckfolie bei (Käseverpackungen), Verbunde mit Karton (Milch)
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	Beutel (Cornflakes, Kochbeutel), Schraubdeckel für Getränkeflaschen
Polypropylen (PP)	Obstschale, Becher (Joghurt), Schraubdeckel für Getränkeflaschen, Beutel (Nudeln), auch im Verbund mit Polyethylen (Kokosflocken)
Ethylvinylacetat (EVAC)	Dichtungsscheibe in Kunststoff-Schraubdeckeln für PET-Getränkeflaschen
Polyamid (PA 6)	Im Verbund mit Polyethylen: Schlauchbeutel (Käse)
Polystyrol (PS)	Obstschale, Becher (Joghurt), Tiefziehschale im Verbund mit Polyethylen
Polycarbonat (PC)	Mehrweg-Milchflaschen
Polyvinylchlorid (PVC)	Dünne Stretch-Folien über Schale, Dichtungsmasse (Plastisol) in Metall-Schraubdeckeln auf Glasbehältern (Joghurt). Dicke PVC-Folien wurden zunehmend durch Polypropylen (PP) verdrängt [11, S. 164].
Ethylvinylalkohol (EVOH)	Barrierschicht in Verbunden: Tiefziehschale (Schnittkäse)
Polyvinylidenchlorid (PVDC)	Barrierefunktion: Beschichtung von regenerierter Cellulose (Cellophan)

Im Folgenden werden die Funktionen der Verpackungen im Einzelnen erläutert.

## 2.2.2 Sauerstoff-Barriere

Die Gefahr der Schädigung durch Sauerstoff bezieht sich auf viele Substanzklassen. Besonders gefährdet aber sind Fette mit ungesättigten Fettsäureresten. Hier sind ganz besonders zwei Mechanismen von großer Bedeutung:

1. die Autoxidation (Kettenreaktion), welche auch als Dunkelreaktion ablaufen kann,
2. die Fotooxidation über Sensibilisatoren, bei der Sauerstoff nur bei Lichteinwirkung gebunden wird [12, S. 195], [14].

Nach dem ersten Mechanismus können Fette bereits durch atmosphärischen Sauerstoff (Triplet-Sauerstoff) oxidiert werden. Es handelt sich um einen radikalischen Mechanismus, welcher autokatalytisch abläuft [15, S. 82]. Besonders bei den ungesättigten Fettsäuren findet bereits im Dunkeln der Start einer Kettenreaktion statt. Die Reaktion läuft so lange ab, bis der Sauerstoff verbraucht ist. Letztlich entstehen flüchtige Verbindungen, die bereits in geringen Mengen geschmacklich wahrnehmbar sind. Ihre Entstehung ist verantwortlich für das Ranzigwerden fetthaltiger Lebensmittel [4, S. 13 f.]. Durch Licht wird diese Autoxidation beschleunigt [14].

Die zweite Form der Oxidation von Fettsäuren wird als „Fotooxidation über Sensibilisatoren“ bezeichnet. Als Sensibilisatoren wirken z. B. Chlorophyll aus Pflanzenteilen oder Riboflavin (Vitamin B<sub>2</sub>) aus Milch. Schon durch geringe Mengen einfallenden Lichtes kann ein Sensibilisator angeregt werden. Dieser angeregte Sensibilisator überträgt seine Energie auf ein Sauerstoff-Molekül im Grundzustand (Triplet-Sauerstoff). Dadurch geht das Sauerstoff-Molekül in den ersten angeregten Zustand über (Singulett-Sauerstoff), bei weiterer Energiezufuhr in den zweiten angeregten Zustand (Abb. 4). Singulett-Sauerstoff hat ein starkes Reaktionsbestreben.

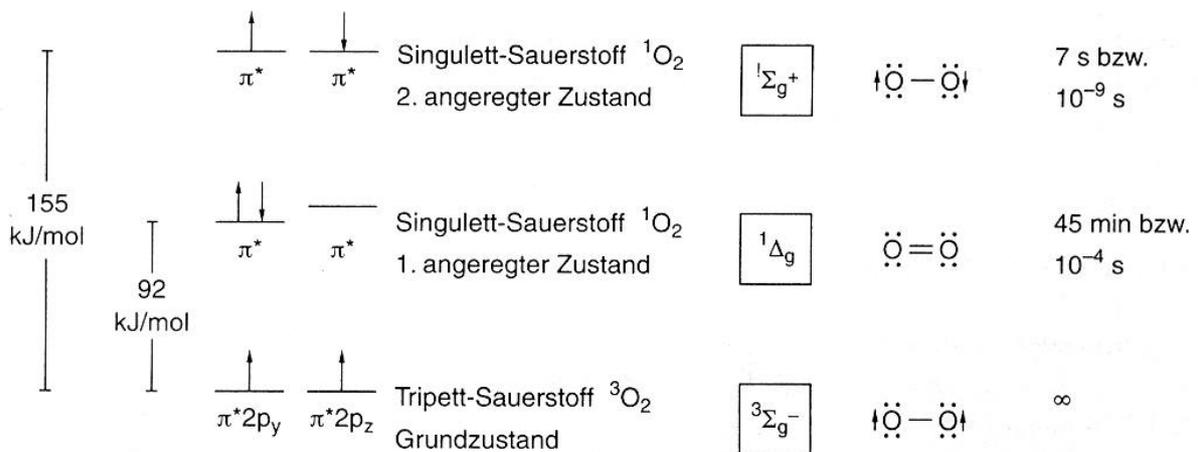


Abbildung 4: Lebensdauer und Energiegehalt von Grund- und Anregungszustand des Sauerstoffs [16, S. 209]

Ungesättigte Fettsäuren sind durch Singulett-Sauerstoff besonders gefährdet. Dieser kann direkt mit den Doppelbindungen der Fettsäuren über eine Cycloaddition reagieren, wobei Hydroperoxide entstehen.



Abbildung 5: Reaktion von Singulett-Sauerstoff mit einer Doppelbindung [17, S. 47]

Aus diesen bilden sich flüchtige Zersetzungsprodukte (Ranzigwerden). Diese Oxidationen können durch bestimmte Nahrungsmittelbestandteile unterdrückt werden: durch Antioxidantien. Hier ist zuerst die Ascorbinsäure (Vitamin C) zu nennen, welche eine reduzierende Wirkung besitzt. Das fettlösliche Vitamin E (Tocopherole) bindet Radikale und unterbricht damit die Autoxidation [12, S. 193 f.].

Nachfolgend sollen weitere gefährdete Substanzklassen genannt werden. Unter den Aminosäuren beispielsweise findet man Sauerstoffempfindlichkeit bei Methionin, unter den Aromastoffen bei den ätherischen Ölen und unter den Vitaminen bei der bereits erwähnten Ascorbinsäure. Sauerstoffempfindlich sind außerdem bei den Pflanzen – neben Chlorophyll – Farbstoffe wie Carotinoide, Flavonoide und Anthocyane. In Fleisch ist es hauptsächlich der Muskel Farbstoff Myoglobin. Somit wird verständlich, dass beispielsweise Leberwurst sowie Frucht- und Gemüsesäfte als sauerstoffempfindliche Lebensmittel eingestuft werden müssen [12, S. 178-180].

Zu viel Sauerstoff kann neben der oxidativen Schädigung empfindlicher Lebensmittel den aeroben Stoffwechsel verschiedener Mikroorganismen fördern, andererseits aber auch die Veratmung lebender pflanzlicher Zellsubstanz. Zu wenig Sauerstoff hingegen kann Mikroorganismen mit anaerobem Stoffwechsel fördern [12, S. 177]. Dabei besteht die Gefahr, dass sich Toxinbildner wie Clostridien vermehren. Fakultativ anaerobe und mikroaerophile Mikroorganismen schalten auf Gärung um, wie z.B. Laktobazillen [12, S. 278-281]. Die Gärungsprodukte erzeugen störende Fehlgerüche [12, S. 426].

Um diese Probleme zu vermeiden, können einerseits zur Erhöhung der Lagerbeständigkeit Vakuum-Verpackungen eingesetzt werden. Ein anderer Lösungsweg ist die Verwendung von Schutzgasverpackungen, bei denen ein Teil der Luft durch indifferente Gase ausgetauscht wird. Während Stickstoff völlig inert ist, bewirkt Kohlenstoffdioxid durch die Reaktion mit Wasser eine geringe Absenkung des pH-Wertes. Beide Gase hemmen das Wachstum aerober Mikroorganismen, wobei Kohlenstoffdioxid auch Anaerobier hemmt. Für Fleisch und Fleischwaren, wie Wurst und gekochten Aufschnitt haben sich z. B. Gemische aus Stickstoff und Kohlenstoffdioxid unterschiedlicher Konzentrationsverhältnisse bewährt. Für das Verpacken von Gemüse und Salat eignen sich Mischungen von 5 % Sauerstoff, 5 % Kohlenstoffdioxid und 90 % Stickstoff. Allgemein ist die Haltbarkeit unter Schutzgas bei 3-4 °C stets etwa doppelt so lang wie bei Lagerung unter Luft [11, S. 39, 42 f.].

### 2.2.3 Vergleich der Sauerstoffdurchlässigkeit unterschiedlicher Folien

Zur Permeation von Gasen durch eine Schicht kommt es, wenn zwischen beiden Seiten ein Partialdruckunterschied des permeierenden Stoffes besteht. Der Durchgang von Gasen durch eine Folie lässt sich in mehrere Phasen einteilen. Wie Abb. 6 zeigt, stellt die eigentliche Diffusion des Permeanten durch die Wand des Packstoffes nur einen Teil des gesamten Permeationsvorganges dar. Das Anhaften, das Eindringen und die Freisetzung des Permeanten sind ebenfalls von Bedeutung.

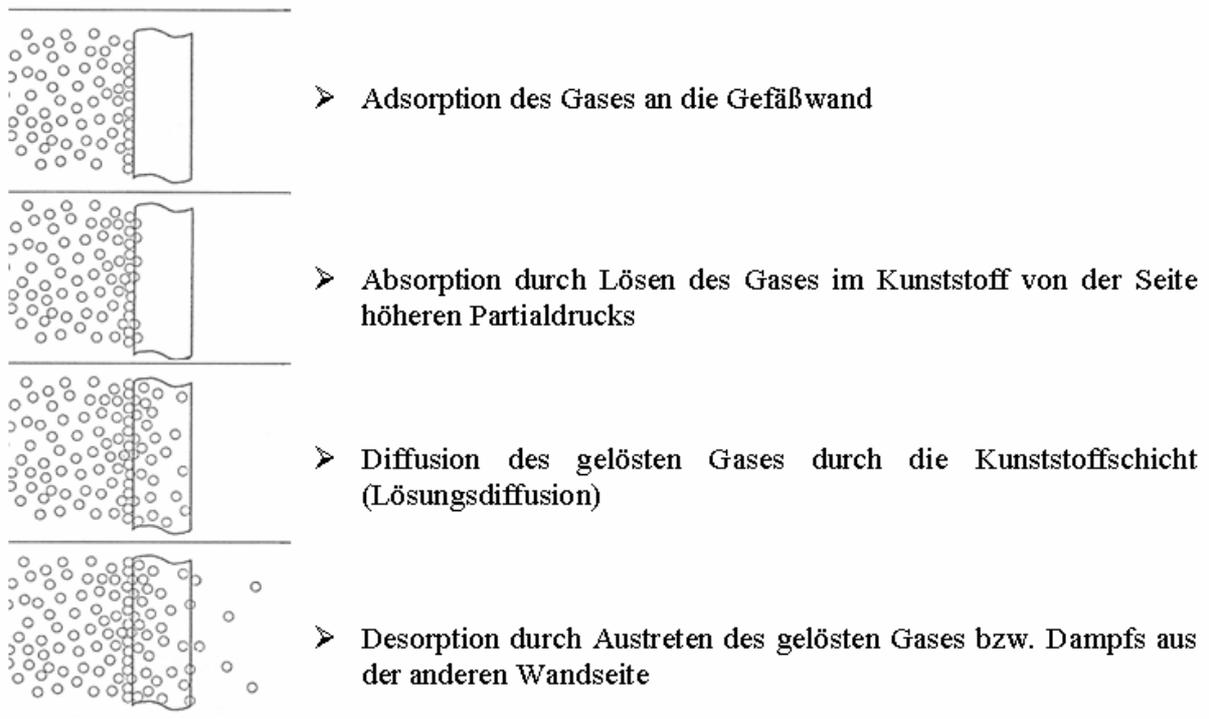


Abbildung 6: Stufen der Permeation [11, S. 370]

Zum besseren Vergleich der Materialien hinsichtlich ihrer Sauerstoffdurchlässigkeit ist eine bestimmte Stoffgröße (P) erforderlich. „P ist die Permeationskonstante, die angibt, wieviel  $\text{cm}^3$  eines Gases bzw. g Wasserdampf bei einem Partialdruckgefälle von 1 bar von Seite zu Seite einer Fläche von  $1 \text{ m}^2$  mit einer Dicke von  $1 \mu\text{m}$  in 1 Tag (bei  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $85 \%$  rel. Luftfeuchte für Wasserdampf) durchtreten“ [11, S. 372].

Daher erhält P, auf eine  $100 \mu\text{m}$  dicke Folie bezogen, die Einheit  $P = \frac{\text{cm}^3 \times 100 \mu\text{m}}{\text{m}^2 \times d \times \text{bar}}$ . Verschiedene Kunststoffe zeigen völlig unterschiedliche Durchlässigkeiten für Sauerstoff (Tab. 3).

Tabelle 3: Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Kunststoffe bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $0 \%$  rel. Feuchte [18, S. 136 f.], [4, S. 12]

Kunststoffolie mit $100 \mu\text{m}$ Dicke	Sauerstoffdurchlässigkeit in $\text{cm}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$
Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)	1350
Polystyrol (PS)	1000
Polypropylen (PP)	628
Polycarbonat (PC)	579
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	505
Polyvinylchlorid (PVC)	19,1
Polyethylenterephthalat (PET)	8,6
Polyamid (PA 6)	5,6
Polyvinylidenchlorid (PVDC)	1,4
Ethylvinylalkohol (EVOH)	0,1 (65 % rel. F.)

Aus Tab. 3 geht hervor, dass die Sauerstoffdurchlässigkeit von Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) weitaus höher ist als die von Ethylvinylalkohol (EVOH) und

Polyvinylidenchlorid (PVDC). Neben den ausgezeichneten Barrieren Ethylvinylalkohol (EVOH) und Polyvinylidenchlorid (PVDC) zeigt auch Polyamid (PA 6) noch eine recht gute Sperrwirkung. Allerdings nimmt die Wirkung von EVOH als Sauerstoffbarriere mit zunehmender relativer Feuchte ab, was z. B. bei Nahrungsmittellieferungen in tropische Regionen beachtet werden muss. EVOH muss also stets auf beiden Seiten von wasserdampfdurchlässigen Folien bedeckt sein, wenn seine Sperrwirkung gegen Sauerstoff optimal zur Geltung kommen soll, z.B. in der Kombination Polyethylenterephthalat / Ethylvinylalkohol / Polyethylen (PET/EVOH/PE). Auch das in seiner O<sub>2</sub>-Barriere-Wirkung günstige Polyamid (PA 6) zeigt einen Anstieg der O<sub>2</sub>-Durchlässigkeit bei zunehmender rel. Feuchtigkeit [11, S. 375].

Auf welche strukturellen Eigenschaften der verschiedenen Packstoffe sind die unterschiedlichen Sauerstoffdurchlässigkeiten zurückzuführen? „Bei bestimmten Kunststofftypen steigt die Permeabilität mit abnehmender Kristallinität und Packungsdichte. Deshalb sind meist vorwiegend amorphe Kunststoffe für Gase und Dämpfe durchlässiger als vorwiegend kristalline Kunststoffe. Die Packungsdichte bestimmt die durch Platzwechselforgänge stattfindende Diffusion, daneben aber auch die Löslichkeit des wandernden Stoffs im Kunststoff“ [11, S. 372]. Zur Veranschaulichung sollen dazu zunächst die beiden Polyethylentypen aus der vorhergehenden Tabelle 3 miteinander verglichen werden. Man stellt fest, dass Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD) eine mehr als doppelt so hohe Sauerstoffdurchlässigkeit aufweist wie Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Beide Kunststoffe sind zwar teilkristallin (kristalline Bereiche sind von einer amorphen Matrix umgeben), Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) hat jedoch einen höheren Kristallinitätsgrad [18, S. 15], [19, S. 84, 94]. Daher zeigt PE-HD auch eine geringere Sauerstoffdurchlässigkeit. Dies wird in der folgenden Tabelle 4 deutlich. Wie lässt sich aber die weitaus geringere Durchlässigkeit für das ebenfalls teilkristalline Polyamid (PA 6) erklären, welches häufig als Barriere eingesetzt wird? Hier spielt die Polarität eine entscheidende Rolle. Nach AHLHAUS „ist die Permeabilität vom Typ des Kunststoffs, seiner Polarität und den entsprechenden Wechselwirkungen mit dem Gas abhängig“ [11, S. 372]. Das unpolare Sauerstoffmolekül kann also leichter durch das unpolare Polyethylen (PE) diffundieren als durch das polare Polyamid (PA).

Tabelle 4: Abhängigkeit der Sauerstoffdurchlässigkeit von der Dichte und der Polarität am Beispiel von PE und PA [11, S. 78], [19, S. 94], [18, S. 15]

<b>Kunststoff</b>	<b>PE-LD</b>	<b>PE-HD</b>	<b>PA 6</b>
Kristallinitätsgrad in %	teilkristallin (40 %)	teilkristallin (70 %)	teilkristallin (40 %)
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	0,92	0,95	1,14
Polaritätsstufe 1<5	1	1	5
Sauerstoffdurchlässigkeit in cm <sup>3</sup> / (m <sup>2</sup> · d · bar)	1350	505	5,6

Die Sauerstoffdurchlässigkeit kann aber auch durch eine Metallschicht (Aluminium) stark herabgesetzt werden, wie die folgende Tab. 5 zeigt.

Tabelle 5: Beeinflussung der Sauerstoffdurchlässigkeit unterschiedlicher Materialien durch Metallisierung [18, S. 165].

Materialien gleicher Schichtdicke	Sauerstoffdurchlässigkeit in $\text{cm}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{d} \cdot \text{bar})$ bei 85 % rel. Feuchte	
	ohne Metallisierung	mit Metallisierung
Poplypropylen, biaxial orientiert (BOPP)	1900	150
Polyethylenterephthalat (PET)	90	0,7

Auch der gegen Sauerstoffzutritt und Aromaverlust besonders empfindliche Röstkaffee wird unter Schutzgasatmosphäre mit einer Sperrschichtfolie z. B. der Art Polyethylenterephthalat/Aluminium/Polyethylen (PET/Al/PE) versehen, eventuell mit Entgasungsventil für Kohlenstoffdioxid [11, S. 50]. Auch bei einem 1-Liter-Getränkarton mit der Schichtung Polyethylen/Karton/Polyethylen/Aluminium/Polyethylen (PE/Karton/PE/Al/PE) zeigt die Aluminiumschicht Wirkung: Für den Sauerstoffdurchgang durch die gesamte Oberfläche dieser Verpackung werden Werte von nur 3 bis 4  $\text{cm}^3 \text{O}_2 / \text{Jahr}$  angegeben – bezogen auf Luft als Umgebung bei 23 °C [12, S. 232 f.].

## 2.2.4 Die Rolle des Sauerstoffs bei der Verpackung von Frischfleisch

Nahrungsmittel tierischer Herkunft sind besonders empfindlich und stellen hohe Ansprüche an die Verpackungsmaterialien. Einen ersten wichtigen Hinweis über den Zustand des in einer Verpackung zum Kauf angebotenen Frischfleisches liefert die Fleischfarbe. Nur Frischfleisch mit hellroter Oberflächenfarbe wird von der Kundschaft akzeptiert. Die Fleischfarbe wird durch den Myoglobingehalt des Fleisches bestimmt. Myoglobin ist der Muskelfarbstoff von Frischfleisch. Aus Myoglobin entsteht Oxymyoglobin, wenn Sauerstoff angelagert wird. Beide Verbindungen besitzen ein zweiwertiges Eisen-Ion (Abb. 7).

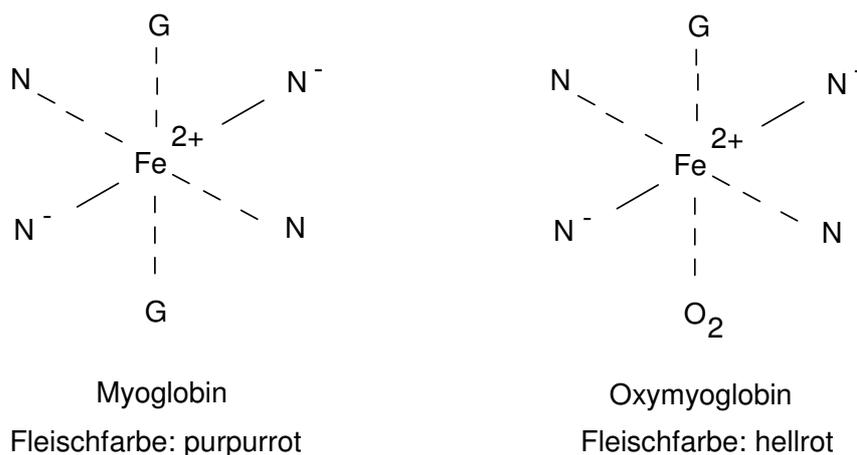


Abbildung 7: Ladungs- und Bindungszustände zweier Varianten des Häm-Pigments Myoglobin (N steht für Pyrrol-N, G für Globin) [15, S. 297]

- Das hellrote oxygenierte Myoglobin (Oxymyoglobin) ist diejenige Variante, welche für den Verkauf – z. B. von Rindfleisch – von der Kundschaft gewünscht wird. Daher wird Frischfleisch durchweg mit hellroter Oberflächenfarbe angeboten. Da aber das gewünschte Oxymyoglobin nur in sauerstoffreicher Umgebung stabil ist, müssen für die

Frischfleischverpackungen, die für den kurzfristigen Verbrauch bestimmt sind, Folien verwendet werden, die für Sauerstoff durchlässig sind, um die Bildung von Oxymyoglobin auch in der Packung zu ermöglichen. Hierbei handelt es sich um dünne Folien aus PE oder Weich-PVC, die als Schrumpffolien eingesetzt werden und eine Oxymyoglobinbildung zulassen. Maximal für einen Zeitraum von zwei bis drei Tagen kann Frischfleisch in dieser Art der Verpackung vertrieben werden [11, S. 47].

- Das purpurrote Desoxymyoglobin (Myoglobin) entsteht unter weitgehend sauerstofffreien Bedingungen. Diese herrschen bei der Frischfleisch-Reifung. Dazu verwendet man „Sperrschicht-Folien für Sauerstoff im Vakuumbutel aus PA/PE- oder PET/PE-Folien. Bei der Öffnung der Verpackung bewirkt der Sauerstoff die erwünschte Nachrötung“ [11, S. 46]. „Bei frischem Muskelfleisch ist ein Übergang von Oxymyoglobin zu Desoxymyoglobin und umgekehrt möglich, je nachdem ob Sauerstoff zugelassen oder entfernt wird. Wird Fleisch z. B. aus einer Vakuumpackung für die Fleischreifung entnommen, so rötet die Oberfläche binnen weniger als einer halben Stunde auf“ [12, S. 200 f., S. 411-413]. Das für die Fleischreifung vakuumverpackte Frischfleisch hat eine recht lange Haltbarkeit, bei Rindfleisch bis zu 10 Tagen bei 4 °C. Da das durch den Schutz dieser Verpackung dunkelrote Fleisch im Verkauf nicht akzeptiert wird, wird diese Verpackung hauptsächlich für die Belieferung von Läden und damit auch als Transportverpackung gewählt [12, S. 414 f.].

Will man jedoch die gewünschte hellrote Oxymyoglobinfarbe von Frischfleisch innerhalb der Verpackung auch für eine etwas längere Verkaufsfrist, etwa von 5 bis 10 Tagen gewährleisten, dann muss diese Verpackung eine Schutzgasatmosphäre bekommen, welche Sauerstoff enthält. Zum Erhalt der Schutzgasatmosphäre muss die Verpackung gasdicht sein, weshalb Sperrschichtfolien verwendet werden. Eine derartige Schutzgasatmosphäre besteht z. B. zu 70 bis 80 % aus Sauerstoff und zu 30 bis 20 % aus Kohlenstoffdioxid, wodurch auch der mikrobielle Verderb verzögert wird [11, S. 46–48]. Die Fleischportionen werden dazu in relativ stabile Kunststoffschalen eingelegt. Unter Einhaltung der Schutzgasatmosphäre werden die Schalen mit einer Deckfolie dicht versiegelt. Eine typische Materialkombination für die Schale ist z. B. der Verbund Polyethylenterephthalat/Polyethylen (PET/PE), den man auch als Material für die Deckfolie findet. Für Schalen kann auch Polypropylen (PP) verwendet werden [20]. Wenn „weißes Fleisch“ (Schwein, Kalb, Lamm) unter einer Schutzgasatmosphäre verpackt werden soll, kann auf Sauerstoff verzichtet werden. Man benutzt dann eine Mischung aus Stickstoff und Kohlenstoffdioxid für die Schutzgasverpackung [12, S. 413].

### **2.2.5 Transparenz und Lichtschutz**

Die Transparenz von Verpackungsmaterialien spielt eine wichtige Rolle bei der Präsentation des zum Kauf angebotenen Nahrungsmittels. Bereits Folien mit 90 % Transparenz erscheinen dem Auge glasklar. Das früher häufig verwendete Polyvinylchlorid (PVC) wurde hauptsächlich durch Polystyrol (PS), Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET) verdrängt [11, S. 151]. Besonders das biaxial orientierte Polypropylen (BOPP), eine in beide Dimensionen verstreckte PP-Variante ist eine glasklare hochfeste Verbindung [11, S. 91]. BOPP-Folien haben mit 90 % den bedeutendsten Anteil an der Produktion der PP-Folien. Sie werden zur Verpackung von Gebäck und Gemüse verwendet [18, S. 112].

Die Transparenz von Packstoffen hat jedoch zwei Seiten. Während sie einerseits eine wichtige Verkaufsfunktion erfüllt und damit erwünscht ist, kann sie andererseits auch unerwünscht sein, nämlich dann, wenn sie unkontrollierten Lichteinfall zulässt und damit zur Zerstörung des Lebensmittels beiträgt.

### 2.2.5.1 Lichtgefährdete Lebensmittel und ihre Bestandteile

Durch Licht, häufig gemeinsam mit Sauerstoff gefährdet sind die folgenden Verbindungen:

- Fette, besonders solche mit ungesättigten Fettsäuren
- Einige Aminosäuren, z. B. Methionin
- Eine Reihe von Vitaminen, z.B. Vitamin A, B<sub>2</sub> und C
- Farbstoffe wie Chlorophyll, Carotin, Myoglobin

Die Folgen einer Lichtschädigung können sensorische Veränderungen (Lichtgeschmack, Ranzigkeit) sowie Vitaminverlust und Farbfehler sein.

Lichtgefährdete Lebensmittel sind:

- Milch und Milchprodukte
- Speiseöle und Fette sowie fetthaltige Nahrungsmittel
- Fruchtsäfte, Wein, Bier
- Trockensuppen mit Gemüseanteil
- Tiefgekühlte Lebensmittel
- Frischfleisch.

Um diese Schädigungen durch Licht gezielt zu vermeiden, muss bekannt sein, welcher Nahrungsmittelanteil besonders lichtempfindlich ist und welche Spektralbereiche dies betrifft [12, S. 505 f.]. Die Gefahr einer Schädigung ist nicht nur auf das energiereiche UV-Licht beschränkt, sondern reicht sogar bis in den grünen Spektralanteil des Lichtes hinein. So ist Oxy-myoglobin im Frischfleisch noch durch Licht der Wellenlänge von 540 nm gefährdet.

Wenn beispielsweise Milch über längere Zeit dem Licht ausgesetzt ist, kommt es zu Qualitätseinbußen. Verantwortlich dafür ist die sog. Fotooxidation, ein lichtabhängiger Oxidationsprozess. Als Sensibilisator wirkt hier das in der Milch enthaltene Vitamin B<sub>2</sub> (Riboflavin). Es ist an der Umwandlung der schwefelhaltigen Aminosäure Methionin zum Aldehyd Methional beteiligt, welches den Lichtgeschmack verursacht [12, S. 519, 523 f.]. Schließlich muss auch der lichtbedingte Abbau von Vitamin B<sub>2</sub> selbst berücksichtigt werden. Welchen Einfluss die Art der Verpackung auf diesen Vorgang hat, wird im folgenden Diagramm deutlich (Abb. 8).

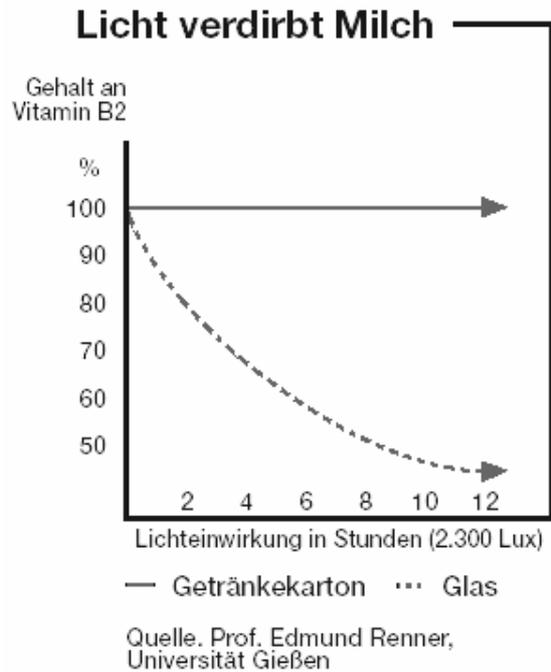


Abbildung 8: Haltbarkeit von Vitamin B<sub>2</sub> in Verpackungen mit unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeit (verändert nach [21, S. 7])

Man erkennt deutlich, dass im Getränkekarton Vitamin B<sub>2</sub> geschützt wird, während Weißglas als Verpackung nicht geeignet ist, da es für Vitamin B<sub>2</sub> keinen Lichtschutz bietet. Soll dieser Gefährdungsbereich für längere Zeit ausgeschlossen werden, so muss in jedem Fall ein Packmittel gewählt werden, welches für die Absorptionsbereiche von Riboflavin ( $\leq 460$  nm) lichtundurchlässig ist [12, S. 524]. Wie Abb. 9 zeigt, eignet sich dazu außer Karton auch Braunglas [12, S. 527]. Dessen Lichtdurchlässigkeit nimmt erst oberhalb von 450 nm deutlich zu, während sie beim Getränkekarton eine durchgehend sehr niedrig ist. Auch Polycarbonatflaschen werden aus diesem Grunde in brauner Version angeboten.

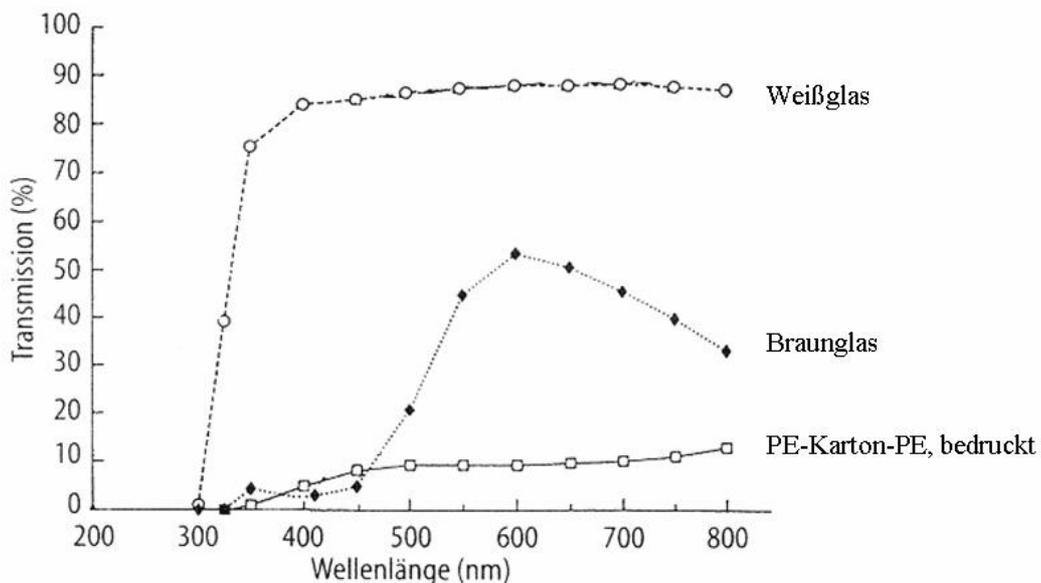


Abbildung 9: Maximale Lichtdurchlässigkeit der Wandflächen verschiedener Joghurtbehälter in Abhängigkeit von der Wellenlänge (verändert nach [12, S. 515])

Auch in weißen Beuteln zeigt Frischmilch ohne Lichtschutzschicht schon nach 2 Tagen Lichtgeschmack und einen fast vollständigen Verlust des Ascorbinsäuregehaltes. Wird hingegen ein dreischichtiger PE-Beutel verwendet (weiß/schwarz/weiß), so treten diese Phänomene nach dieser Zeit nicht auf [12, S. 516]. Einen vollständigen Licht- und ausreichenden Sauerstoffschutz erhält man durch die Verwendung von Verbunden aus Karton/Al/PE [12, S. 525]. In Joghurtbechern wird häufig als weißes Pigment Titandioxid verwendet. Es ist als Lebensmittelfarbstoff E 171 zugelassen.

Schließlich muss noch die Gefährdung des Packstoffes selbst durch das Licht berücksichtigt werden. Bei Polyvinylidenchlorid-Schichten (PVDC) beispielsweise kann es zu einem Vergilben und einem Verlust der Dichtigkeit kommen. Diese unerwünschten Veränderungen sind auf eine partielle Depolymerisation zurückzuführen [4, S. 10]. Moleküle, die ähnlich aufgebaut sind wie Vitamin E können als Radikalfänger z. B. in PE-Folien eingebaut werden. Somit dienen sie der „Lichtstabilisierung“ des Verpackungsmaterials selbst [18, S. 147], [12, S. 194].

### 2.2.6 Wasserdampf-Barriere

Weich-Backwaren, wie Brotsorten mit bis zu 45 % Wasser neigen zum Vertrocknen. Andererseits müssen Hart-Backwaren, wie Kekse oder Kräcker, aber besonders Getreideprodukte gegen Wasser geschützt werden. Bei tiefgefrorenem Fleisch werden zum Schutz vor dem Austrocknen (Gefrierbrand) wasserdampfdichte Folien eingesetzt [11, S. 44, 46]. Werden Emulsionen in ihrem Gleichgewicht gestört, kann es zur Bildung von Fetträndern kommen, die durch Kristallisierungen entstehen. Der Verlust von Feuchtigkeit kann zum Ausfallen löslicher Produkte führen [11, S. 373 f.]. Es stellt sich somit die Frage, welche Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedene Kunststoffe zeigen. Die Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) gibt an, welche Masse an Wasserdampf bei definiertem Luftfeuchtegefälle und definierter

Temperatur durch 1 m<sup>2</sup> Folienfläche pro Tag tritt. Die Einheit wird angegeben in  $\frac{g}{m^2 \times d}$

[18, S. 80]. Einen Überblick über Wasserdampfdurchlässigkeit gibt die folgende Tab. 6:

Tabelle 6: Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Kunststoffe bei 20 °C und einem Gefälle der rel. Feuchte 85 % - 0 % [18, S. 129, 194], [4, S. 16]

Kunststoffolie mit 100 µm Dicke	Wasserdampfdurchlässigkeit in g / (m <sup>2</sup> · d)
Polycarbonat (PC)	15
Polystyrol (PS)	10,3
Polyamid (PA 6)	9
Ethylvinylalkohol (EVOH)	2
Polyvinylchlorid (PVC)	1,63
Polyethylenterephthalat (PET)	1,58
Polyethylen geringer Dichte (PE-LD)	0,768
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	0,224
Polypropylen (PP)	0,2
Polyvinylidenchlorid (PVDC)	0,08

Eine hohe Durchlässigkeit zeigen Polycarbonat (PC), Polystyrol (PS) und Polyamid (PA 6). Polyethylenterephthalat (PET) zeigt etwa nur ein Zehntel der Durchlässigkeit von Polycarbonat (PC). Als gute Barriere gegen Wasserdampf erweisen sich die Polyolefine. Übertroffen werden sie in dieser Sperrwirkung nur durch Polyvinylidenchlorid (PVDC). Der Grund für die

Sperrwirkung der Polyolefine gegenüber dem Dipol-Molekül Wasser liegt an ihrem unpolaren Charakter. Polyvinylidenchlorid (PVDC) weist mit ca. 1,69 g/cm<sup>3</sup> eine sehr hohe Dichte auf [11, S. 78].

Möchte man ein Produkt gegen Sauerstoff und Wasserdampf gleichzeitig schützen, so empfiehlt sich eine Kombination der jeweils geeigneten Sperrschichten. Betrachtet man in der folgenden Abb. 10 die Wirkung von Polyethylen (PE-LD) als Wasserdampf-Barriere und die Wirkung von Polyamid (PA 6) als Sauerstoff-Barriere, so sieht man, dass sie nur in Kombination für beide Permeanten wirksam sind. Das unpolare Polyethylen (PE-LD) und das polare Polyamid (PA 6) müssen allerdings durch einen Haftvermittler zusammengehalten werden. Diese Aufgabe übernimmt hier ein Ionomer. Hierbei handelt es sich um thermoplastische Ethylen/Acrylsäure-Copolymerisate, welche Metallsalze der Acrylsäure enthalten, wodurch Ionenbindungen wirksam werden [11, S. 90]. Auch die hohe Wasserdampfdurchlässigkeit von Ethylvinylalkohol (EVOH) wird durch die Kombination mit Polyethylen (PE-LD) stark vermindert.

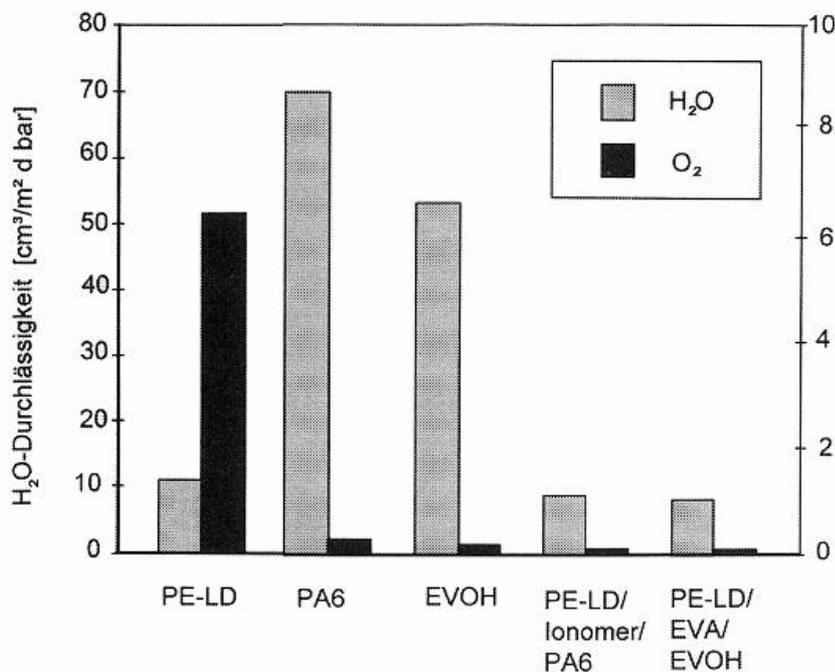


Abbildung 10: Durchlässigkeiten für Wasserdampf und Sauerstoff für Einschichtfolien mit 20 µm und Mehrschichtfolien mit 70 µm Dicke bei 23 °C und 75 % rel. Feuchte (verändert nach [11, S. 46])

Als effektive Alternative zu Sperrschichten wie Ethylvinylalkohol (EVOH) oder Polyvinylidenchlorid (PVDC) kann auch Aluminium verwendet werden. Tab. 7 zeigt, in welchem Umfang die Wasserdampfdurchlässigkeit dadurch vermindert wird.

Tabelle 7: Beeinflussung der Wasserdampfdurchlässigkeit unterschiedlicher Materialien durch Metallisierung [18, S. 165].

Folien gleicher Schichtdicke	Wasserdampfdurchlässigkeit in $\text{g} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$ bei 85 % rel. Luftfeuchte	
	ohne Metallisierung	mit Metallisierung
Polypropylen, biaxial orientiert (BOPP)	7	0
Polyethylenterephthalat (PET)	40	0,6

Die Lagerfähigkeit wird also durch Aluminiumverbunde erhöht. Metallisierte Folien werden deshalb bei Snacks, Nüssen und Gebäck eingesetzt, um deren Aroma und Frische zu schützen [18, S. 165]. Bei Frischgemüse hingegen ist eine hohe Wasserdampfdurchlässigkeit erwünscht, weshalb man sogar perforierte Folien verwendet [18, S. 79]. Auch PVC-Folien, wie sie zur Verpackung von Karotten über Kunststoffschalen gespannt werden, haben eine mittlere Durchlässigkeit für Sauerstoff und Wasserdampf, welche etwa den Werten von PET entspricht [11, S. 374]. Die PVC-Folie liegt aufgrund des zugesetzten Weichmachers mit guter Haftung an der Schale an. Außerdem vermindert der in der Folie enthaltene Weichmacher den Grad der Kristallinität und setzt die Sperrwirkung des Kunststoffes herab.

### 2.2.7 Kohlenstoffdioxid-Barriere

Eine  $\text{CO}_2$ -Barriere kann außer für die Aufrechterhaltung einer Schutzgasatmosphäre auch für die Aufbewahrung kohlenstoffhaltiger Getränke nötig sein.

Für Glasflaschen, die Fülldrücke zwischen 4 und 6 bar aufweisen, liegt die Schwachstelle der Dichtigkeit nur an der Dichtungsmasse im Verschluss. Für Dichtungseinlagen in Kronenkorken verwendet man Lineares Polyethylen geringer Dichte (LLDPE), für Aluminium-Schraubverschlüsse auch Weich-PVC. Kunststoffschraubverschlüsse aus (Polyethylen) PE oder (Polypropylen) PP können Dichtungsmassen auf PE-Basis enthalten [22]. Außer Weich-PVC wird auch Dichtungsmaterial auf der Basis von Ethylvinylacetat (EVA) eingesetzt [3, S. 36], [12, S. 232].

Bei Flaschen aus Polyethylenterephthalat (PET) kann  $\text{CO}_2$  auch durch die Wandung diffundieren, was besonders bei dünnwandigen Flaschen geschieht. Abb. 11 weist auf eine gewisse Durchlässigkeit bei Polyethylenterephthalat (PET) hin. Hier kann eine Polyamid-Schicht (PA), die zwischen zwei PET-Schichten eingebaut wird, als  $\text{CO}_2$ -Sperrschicht dienen [11, S. 51]. Als Barrierschicht hat sich auch Siliciumoxid ( $\text{SiO}_x$ ) bewährt, welches mit Hilfe einer Plasmaschichtung aufgetragen werden kann [18, S. 165-168].

Eine so gut wie vollständige Undurchlässigkeit für  $\text{CO}_2$  zeigen Getränkedosen aus Weißblech oder Aluminium (Fülldruck 6,2 bar). Der Falz der Getränkedosen enthält ein Compound (Synthese-Kautschuk) [23]. Nachteilig bei Getränkedosen ist allerdings das Fehlen einer Einrichtung zur Wiederverschließbarkeit.

Nachfolgend sind einige ausgewählte Kunststoffe nach ihrer Durchlässigkeit gegenüber Kohlenstoffdioxid aufgeführt. Die Abkürzungen aus Abb. 11 bedeuten: PE-LD = Polyethylen niedriger Dichte, PC = Polycarbonat, PP = Polypropylen, PE-HD = Polyethylen hoher Dichte, PET = Polyethylenterephthalat, PVC = Polyvinylchlorid, PA = Polyamid.

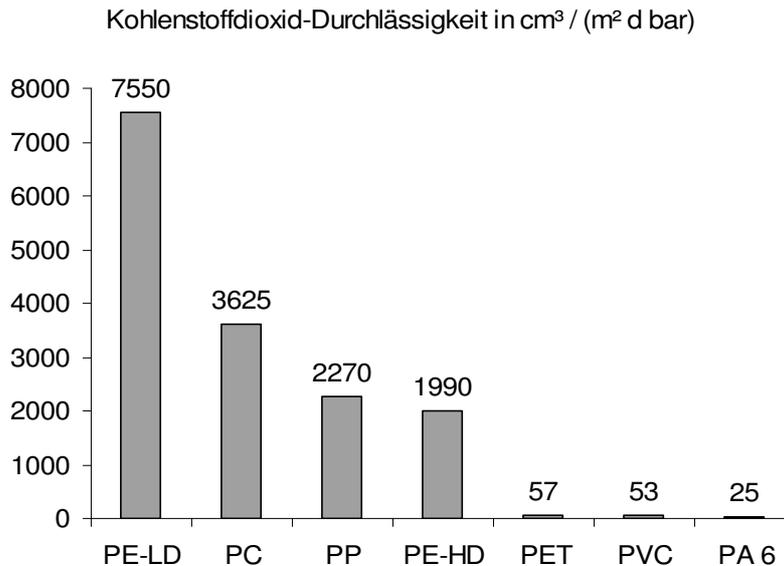


Abbildung 11: Durchlässigkeit verschiedener Kunststofffolien (100  $\mu\text{m}$ ) für Kohlenstoffdioxid bei 20 °C und 0 % rel. Feuchte [4, S. 19], [19, S. 298]

Man kann Abb. 11 entnehmen, dass die Durchlässigkeit bei Polyethylen geringer Dichte (PE-LD) am höchsten ist, gefolgt von Polycarbonat (PC). Hingegen gehört Polyethylenterephthalat (PET) zusammen mit Polyamid (PA 6) und Polyvinylchlorid (PVC) zu den Kunststoffen, welche relativ gut als Barriere für Kohlenstoffdioxid geeignet sind. Deren Durchlässigkeit beträgt etwa ein Hundertstel der Werte von Polyethylen geringer Dichte (PE-LD) und Polycarbonat (PC). Hier wird besonders deutlich, dass Polycarbonat (PC) als Flaschenmaterial für kohlenstoffdioxidhaltige Getränke völlig ungeeignet wäre. Bei Käseverpackungen spielt die Durchlässigkeit für Kohlenstoffdioxid eine Rolle, da dieses Gas beim Reifen gewisser Käsesorten entsteht [11, S. 97], [4, S. 257-259].

### 2.2.8 Verhinderung von Wechselwirkungen zwischen Packstoff und Füllgut

Stoffübergänge zwischen Packstoff und Füllgut sind unerwünscht. Anteile des Packstoffes können in das Füllgut diffundieren, welches dadurch einen Qualitätsverlust erleidet bzw. geschädigt wird. Derartige Substanzen können Restmonomere, Oligomere oder Additive des Verpackungstoffes sein. Diese Austauschvorgänge bezeichnet man als „Migration“. Umgekehrt können auch Anteile des Füllguts in das Verpackungsmaterial diffundieren [4, S. 28].

- Ein bekanntes Beispiel für die Gefahr der Migration im Lebensmittelbereich findet man beim Einsatz von Polyvinylchlorid (PVC), und zwar als Dichtungsmasse für Schraubdeckel sowie als Dehnfolie [12, S. 210]. Die erwünschte Elastizität dieser Materialien wird durch Zusetzen von Weichmachern erreicht. Problematisch allerdings ist die mögliche Diffusion dieser Weichmacher, z. B. von Phthalaten in fetthaltiges Füllgut.
- Bei PET-Getränkeflaschen wird versucht, den Anteil an Acetaldehyd, welcher bei Herstellung und Verarbeitung von PET anfällt, möglichst gering zu halten [11, S. 51]. Es besteht das Risiko, dass Acetaldehyd aus der Behälterwand in das Getränk diffundiert.
- Bei Recyclingkunststoffen wurde ein siebenmal höheres Migrationspotential im Vergleich zur Neuware gefunden. Somit wäre ein Einbau z. B. von rezykliertem PET nur als eine durch Coextrusion hergestellte Mittelschicht denkbar [12, S. 501].
- Glasflaschen hingegen können als inert eingestuft werden.

### 2.2.9 Thermische Belastbarkeit von Kunststoffen

Verpackungskunststoffe, die durch die Anwendung im Haushalt an die Grenzen ihrer thermischen Belastbarkeit kommen, dürfen weder zerstört werden noch dürfen sie das Füllgut schädigen. Dies sind nicht nur Gefrierbeutel und Menüschalen zum Tiefgefrieren, sondern auch Menüschalen für den Einsatz im Umluftherd, Schalen und Folien für den Einsatz in der Mikrowelle, Kochbeutel sowie sterilisierbare und heiß befüllbare Flaschen. Für die entsprechenden Kunststoffe werden in Abb. 12 die Grenzwerte für den Dauergebrauch angegeben. Die größte Spannweite der thermischen Belastbarkeit zeigt Polycarbonat (PC). Dieser Kunststoff ermöglicht Heißdampfsterilisieren und Heißabfüllung, ist also vom hygienischen Standpunkt aus als Verpackungsmaterial für Milch gut geeignet. Auch Polypropylen (PP) zeigt eine recht gute Hitzebeständigkeit, wodurch der Einsatz als Menüschale möglich wird. Als besonders kältestabil erweist sich hingegen Polyethylen (PE). Es wird häufig als Verpackungsmaterial für Tiefkühlkost eingesetzt.

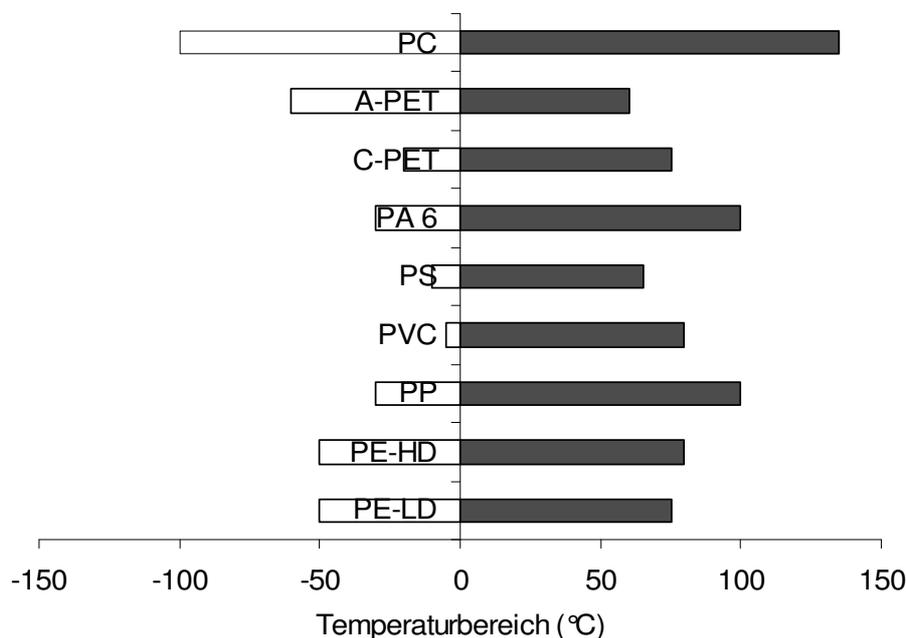


Abbildung 12: Temperaturgrenzen für den Dauergebrauch verschiedener Kunststoffe (nach [11, S. 78])  
(PC = Polycarbonat, A-PET = Polyethylenterephthalat, amorph, C-PET = Polyethylen-terephthalat, kristallin, PA 6 = Polyamid, PS = Polystyrol, PVC = Polyvinylchlorid, PP = Polypropylen, PE-HD = Polyethylen hoher Dichte, PE-LD = Polyethylen niedriger Dichte)

Den Einsatzbereichen genannter Kunststoffe sind aus Gründen der Stabilität Grenzen gezogen. Beispielsweise kann man erkennen, dass eine PET-Flasche für ein Sterilisieren mit Wasserdampf bei 120 °C nicht geeignet ist. Auch der geringe Temperaturspielraum von PS wird deutlich. Die folgende Tab. 8 zeigt Kunststoffe, die mit ihrem Eigenschaftsprofil thermische Anforderungen zur Behandlung von Lebensmitteln erfüllen.

Tabelle 8: Beispiele für die Anwendung thermisch belastbarer Kunststoffe als Verpackungsmaterial [24, S. 54], [12, S. 399 f.], [19, S. 373], [11, S. 42, 44, 78, 116 f.]

<b>Material</b>	<b>Verwendbarkeit</b>
Polyethylen (PE)	PE-LD als Tiefkühlverpackung, PE-HD als Kochbeutel (Kurzzeitbelastbarkeit 120 °C) und für Tiefgefrieren geeignet
Polypropylen (PP)	Als hitzebeständige Menüschiene geeignet, Tiefkühltauglichkeit jedoch nur als Mischpolymerisat PP/PE
Polyamid (PA 6)	In PA/PE-Verbundfolien für Tiefkühlgemüse und „boil-in-the-bag-Fertiggerichte“, als Kochbeutel im PE-Verbund
Polyethylenterephthalat (PET)	Als Menüschiene aus hochkristallinem C-PET kältefest und mikrowellentauglich (-40 °C bis +240 °C), als Kochbeutel im PE-Verbund
Polycarbonat (PC)	Sterilisierbar bei 120 °C, kochfest / Heißabfüllung möglich

Einsatz und Entwicklung thermisch stabiler Kunststoffe für den Bereich der Lebensmittelverpackungen lassen sich auf zwei wichtige Anwendungs- bzw. Vermarktungskonzepte zusammenfassen. Einerseits orientieren sie sich am Convenience-Trend, andererseits haben sie die Substitution des Packstoffes Glas als Ziel.

## 2.3 Technologische und ökologische Aspekte

### 2.3.1 Herstellung von Verbundfolien

„Durch den Aufbau von Verbundfolien gelingt die Kombination verschiedener Eigenschaften der Einzelfolien zu einem Eigenschaftsprofil, das dem jeweiligen Verwendungszweck optimal angepasst ist.“ [18, S. 29], [25]. In derartigen Kombinationen sind es meist die Olefine (PE bzw. PP), welche langfristigen Kontakt zum Füllgut haben können [26]. PE-LD wird gegenüber Lebensmitteln als „inert“ eingestuft [4, S. 76]. Zur Herstellung von Verbundfolien werden drei Verfahren genannt [18, S. 29]: Coextrusion, Kaschierung und Extrusionsbeschichtung.

Bei der Coextrusion werden zwei oder mehr thermoplastische Kunststoffe über Extruder verarbeitet. Die geschmolzenen Kunststoffe werden zu Schichten kombiniert. Auch Haftvermittler können in diese Schichtung mit einbezogen werden. Verbunde mit bis zu 7 Schichten können so hergestellt werden. „Die Coextrusion wird heute weltweit von allen namhaften Herstellern von Verbundfolien eingesetzt.“ Durch ein Minimum an Materialeinsatz wird ein Maximum an Wirkung erzielt [18, S. 58-60]. Sie wird angewandt für Flachfolien und Schlauchfolien. Als Beispiel sind Verpackungen für Käse, Fleisch und Wurst zu nennen [11, S. 118]. Ein Schema eines derartigen Verbundes wird in der folgenden Abb. 13 dargestellt.

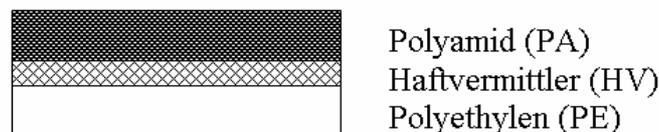


Abbildung 13: Aufbau einer coextrudierten Verbundfolie mit Haftvermittler

Dieser Verbund benötigt einen Haftvermittler (HV), da die unpolaren PE- und die polaren PA-Schichten schlecht aufeinander haften. Als Haftvermittler dienen z. B. Ionomere oder EVA-Copolymere [11, S. 97].

Kaschieren, auch Laminieren genannt, bedeutet das vollflächige Verbinden von mindestens zwei Packstoffen mit Hilfe eines Klebers [4, S. 107], [18, S. 155]. Dieses Verfahren eignet sich zur Verbindung von Pappe, Papier oder Aluminiumfolien mit Kunststofffolien. Beispielsweise kommen 2-Komponentenkleber zur Anwendung. Besonders wichtig für den Verpackungssektor sind die Schmelzklebstoffe [11, S. 223]. Als Schmelzklebstoffe werden meist Ethylen-Vinylacetat-Copolymere (EVA) verwendet. Nach dem Abkühlen erhält man eine feste Verbindung der Materialien. Als Beispiel ist die Kaffeeverpackung zu nennen [4, S. 243]. Das Schema eines derartigen Verbundes ist in der folgenden Abb. 14 dargestellt.

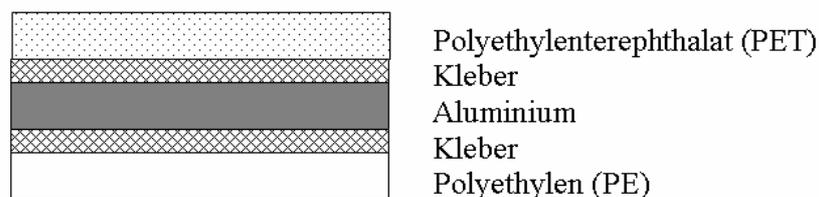


Abbildung 14: Aufbau einer durch Kaschieren hergestellten Verbundfolie

Beim Extrusionsbeschichten (Extrusionskaschieren) werden Folien ohne Verwendung eines Klebemittels zusammengefügt. Dabei wird die Schmelze eines thermoplastischen Kunststoffes auf eine Folie aufgebracht, wodurch eine Zweischichtfolie entsteht. „Bringt man die Schmelze eines Thermoplasts durch Extrusion zwischen zwei Folien, dann werden diese beiden Folien miteinander verbunden; man erhält eine 3-Schicht-Verbundfolie“ [18, S. 156]. Mit diesem Verfahren können nicht nur Kunststofffolien (PET, PP, PA) beschichtet werden, also mit einer „Siegelschicht“ versehen werden, sondern auch Aluminiumfolien, Aluminiumverbunde oder Papier. Es handelt sich vorwiegend um Polyethylene, Ionomere oder Ethylen-Vinylacetat-Copolymere [18, S. 157]. Ein typisches Beispiel ist der Getränkekarton mit seinen Polyethylen-Schichten. Querschnitte derartiger Verbunde sind in nachfolgender Abb. 15 dargestellt.

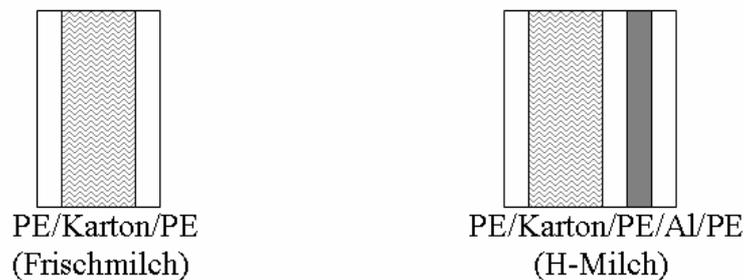


Abbildung 15: Schichtenaufbau zweier Sorten von Getränkekartons

Der Karton wird auf beiden Seiten mit flüssigem PE beschichtet, und das PE verbindet alle Lagen samt Aluminium miteinander, so dass keine Kleber notwendig sind [27], [28].

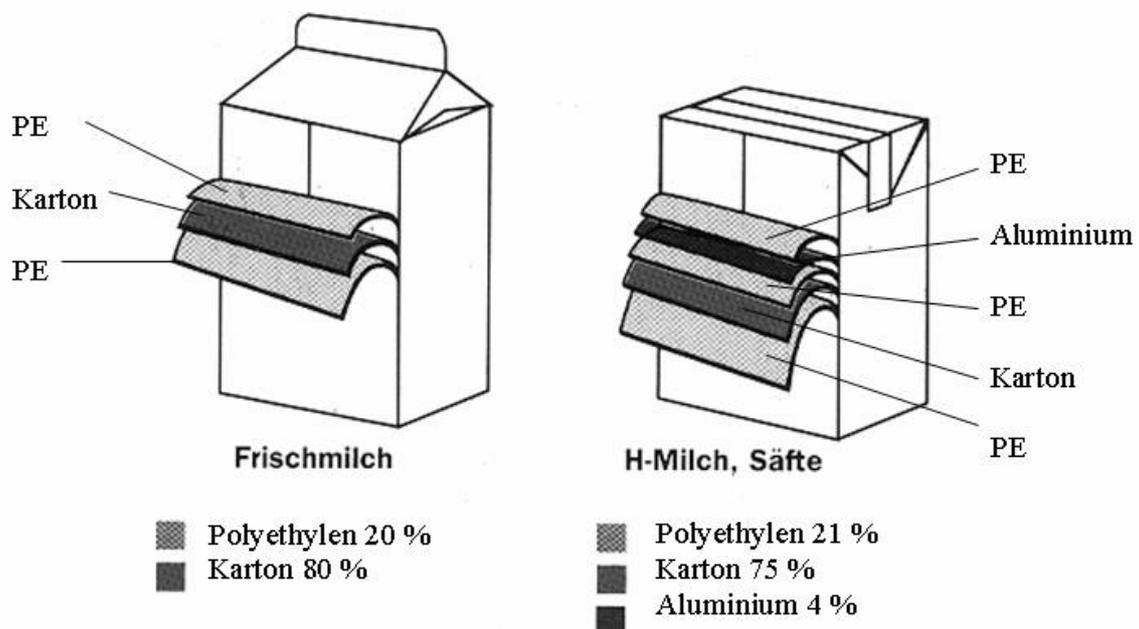


Abbildung 16: Giebelverpackung und Blockverpackung mit hervorgehobener Schichtung [29]

Um eine Barriere gegen Sauerstoff zu erhalten, kann auch noch eine andere Form des Beschichtens von Kunststoffen gewählt werden. Es ist das Bedampfen mit Aluminium, welches im Hochvakuum erfolgt. Hierdurch wird auch die Funktion des Lichtschutzes erfüllt [18, S. 163-165], [28].

Außer dem Metallisieren ist auch das Keramisieren möglich. Bei dieser Beschichtung mit  $\text{SiO}_x$  im Hochvakuum entsteht eine transparente Barriere gegen Sauerstoff. Die Barrierefunktion ist besonders hoch, wenn  $x$  einen Wert von 1,4 bis 1,8 hat. Im Gegensatz zu Aluminium ist diese Schicht für die Mikrowelle geeignet [11, S. 234]. Diese Beschichtung ist auch als Barriere bei PET-Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke geplant.

## 2.3.2 Umweltbelastungen durch Verpackungen

### 2.3.2.1 Ökologische Bewertung von Verpackungsmaterialien

Neben der funktionellen und ökonomischen Bedeutung von Verpackungen muss auch die Umweltverträglichkeit dieser weltweit in zunehmendem Maße verwendeten Materialien betrachtet werden. Ziel ist nicht nur die Vermeidung unansehnlicher Müllberge, sondern auch die stoffliche oder energetische Verwertung von Verpackungsabfall. „Um Packstoffe und Verpackungen auf ihre Umweltverträglichkeit prüfen zu können, bedarf es einheitlicher Methoden, deren Ergebnisse miteinander verglichen werden können. (...) Es wird die Untersuchung des gesamten ‘Lebensweges’ einer Verpackung gefordert, von der Gewinnung ihrer Rohstoffe bis zu ihrer endgültigen Beseitigung und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt“ [4, S. 34]. Dies geschieht mittels Ökobilanzen. Das nachfolgende Schema (Abb. 17) verdeutlicht, dass der Aufenthalt der Verpackung beim Verbraucher nur eine Station von mehreren ist.

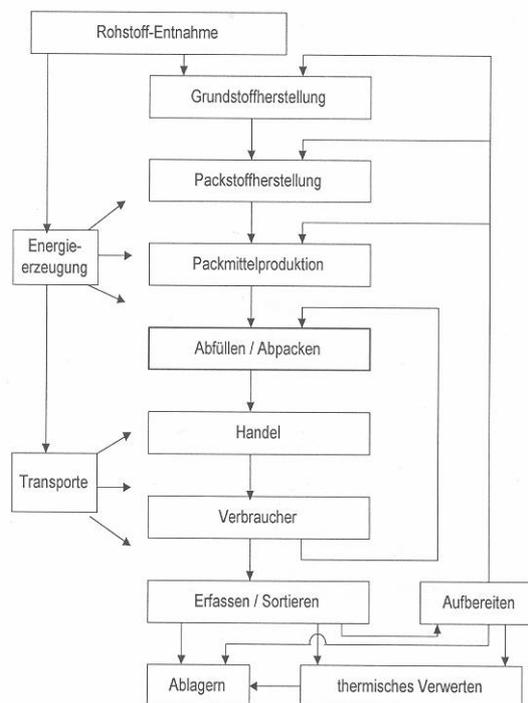


Abbildung 17: Verpackungslebensweg [11, S. 439]

Die Ökobilanz ist ein Instrument zur Erfassung und Bewertung von Umweltbelastungen. Am Beispiel des Getränkekartons müssten innerhalb der „Sachbilanz“ – möglichst quantitativ – alle Umweltbelastungen erfasst werden, welche durch den „Lebensweg“ der drei Materialien Papier, Aluminium und Polyethylen hervorgerufen werden [11, S. 433]. Da beim Milchkarton

eine Wiederbefüllung und damit ein Mehrwegsystem nicht in Frage kommt, müssen andere Formen der Verwertung berücksichtigt werden. Eine Studie des Umweltbundesamtes (Ökobilanz für Getränkeverpackungen II) belegte schon im Jahre 2002, dass der Papieranteil von Getränkekartons der Faserrückgewinnung zugeführt werden kann, während Polyethylen und Aluminium in der Zementindustrie verwertet werden [30, Abschnitt 2.2.2.8, S. 79].

Es drängt sich nun die Frage auf, ob ein gängiges Packmittel wie die Mehrweg-Glasflasche dem Getränkekarton nicht überlegen ist. Der Vergleich der „Wirkbilanzen“ zeigt, dass die zu erwartenden Umweltbelastungen (Treibhauseffekt, Ressourcenbeanspruchung, Versauerung, Eutrophierung, Landverbrauch) sich insgesamt etwa die Waage halten [31]. Der Getränkekarton, eine Einwegverpackung, wird „als „ökologisch vorteilhaft“ beurteilt und damit den Mehrweg-Systemen gleichgestellt [32], [30, Abschnitt 4.5.1., S. 233]. Betrachtungen dieser Art lassen sich auch für die Packmittel Glas contra PET durchführen [33].

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein funktionell gezielter und sparsamer Materialeinsatz in jedem Falle ökologisch vorteilhaft ist. Die Verringerung von Verpackungsabfällen ist auch das Ziel der Verpackungsverordnung, welche nachfolgend vereinfacht beschrieben wird [34].

### **2.3.2.2 Verpackungsverordnung**

Nach der Verpackungsverordnung (VO über die Vermeidung von Verpackungsabfällen vom 12. 6. 1991) sollen Verpackungen aus umweltverträglichen und die stoffliche Verwertung nicht belastenden Materialien hergestellt werden und so beschaffen sein, dass sie möglichst wieder verwendet werden können (Mehrwegverpackungen). Für verschiedene Verpackungstoffe werden konkrete Wiederverwertungsquoten angegeben. Neben dem vorrangigen Recycling lässt die Verordnung aber auch eine energetische Verwertung zu, also eine Verbrennung und gezielte Nutzung der anfallenden Wärme. Um eine generelle Rücknahmeverpflichtung für den Handel zu vermeiden, wurde das Unternehmen „Duales System Deutschland GmbH“ (Abkürzung DSD) aufgebaut [35, S. 436].

Der Träger dieses neben der öffentlichen Abfallentsorgung zweiten Entsorgungssystems für Verkaufsverpackungen wurde vom Handel und von der Verpackungsindustrie aufgebaut. Gesetzliche Grundlage ist die Verpackungs-VO vom 12.06.1991, die die Hersteller und Vertreiber von Verkaufsverpackungen zu einer flächendeckenden Entsorgung beim Endverbraucher verpflichtet, wenn der Handel eine generelle Rücknahmeverpflichtung vermeiden möchte.

Die DSD vergibt nach Vorlage einer Verwertungsgarantie der Verpackungshersteller Lizenzen gegen Entgelte, die nach Verpackungsart und Größe gestaffelt sind. Verpackungen mit solchen Lizenzen sind am Grünen Punkt erkennbar. Die Unternehmen geben die dadurch entstandenen Kosten an die Verbraucher weiter. In den meisten Städten und Gemeinden werden Verpackungsmaterialien mit dem grünen Punkt in „gelben Tonnen“ oder „gelben Säcken“ gesammelt. Die DSD holt die sortierten Abfälle ab und leitet sie an die Entsorgungsunternehmen weiter, die nach Art und Reinheitsgrad der Abfälle pro abgenommener Tonne einen Zuschuss der DSD erhalten [36. S. 395 f.].

Die folgenden Abbildungen zeigen den Kunststofftypencode, wie er in der Verpackungsverordnung vorgelegt wird sowie dessen Anwendung bei einer Tiefziehschale. Auch deren Bestandteile sollten so ausgewählt sein, dass ein Recycling möglichst problemlos möglich ist. Am Beispiel der PP-Schale in Abb. 19 wird dargestellt, welche Stoffe nach internationalen Empfehlungen verwendet werden sollen – und welche nicht. Es wird deutlich gemacht, dass Polyvinylchlorid (PVC), organische Lösungsmittel sowie Schwermetalle nicht benutzt werden sollen. Je geringer die Anzahl verschiedener Materialien in einem Packmittel ist, desto einfacher ist die Recyclierbarkeit. Polyvinylchlorid (PVC) allerdings wird kaum noch verwendet. Es wurde durch Polypropylen (PP) weitgehend vom Markt verdrängt [11, S. 164].

	Polyethylenterephthalat (PET)		Polypropylen (PP)
	Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)		Polystyrol (PS)
	Polyvinylchlorid (PVC)		Sonstige einschließlich Verbunde
	Polyethylen niedriger Dichte (PE-LD)		

Abbildung 18: Kunststofftypencode

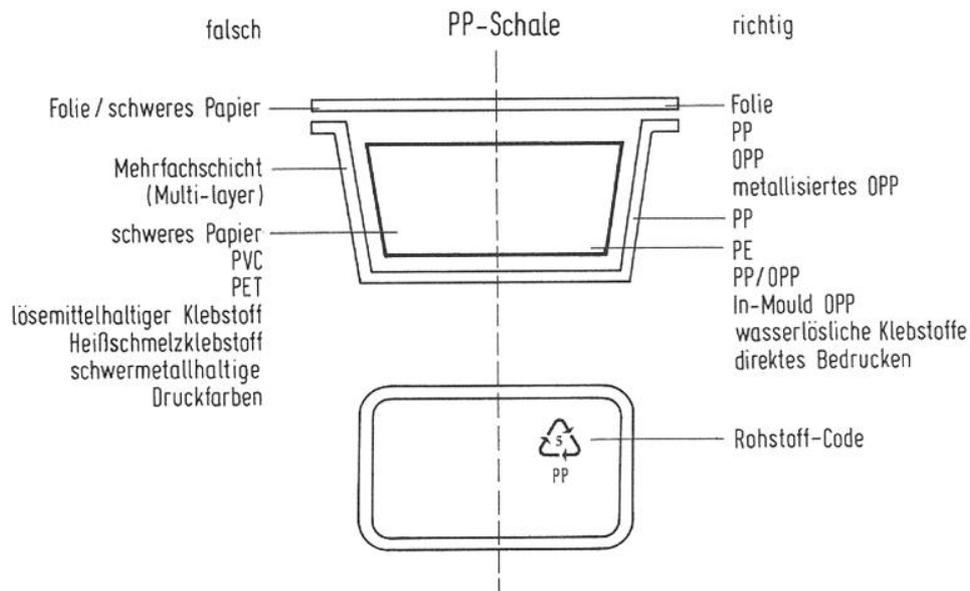


Abbildung 19: Recyclinggerechte Gestaltung einer Polypropylen -Schale [11, S. 165]

(PVC: Polyvinylchlorid, PET: Polyethylenterephthalat, PP: Polypropylen, OPP: orientiertes (gerecktes) Polypropylen, PE: Polyethylen)

Durch den Kunststofftypencode (Abb. 18) wird die Auswahl der Kunststoffe zu einer möglichen Wiederverwertung eindeutig möglich. Auch der Verbraucher hat damit die Möglichkeit, sich ein Bild darüber zu machen, aus welchen Materialien die von ihm gekauften Verpackungen bestehen.

### 3 Didaktisch-methodischer Kommentar – Begründung zur Behandlung des Themas im Chemieunterricht

Es stellt sich die Frage, welche Bedeutung die einzelnen Schwerpunkte der Sachstruktur im Rahmen der didaktisch-methodischen Bewertung haben können. Dazu wird in diesem Kapitel der Aufsatz von W. KLAFKI mit dem Titel „Die bildungstheoretische Didaktik im Rahmen kritisch-konstruktiver Erziehungswissenschaft“ mit der Themenstellung der vorliegenden Arbeit in Beziehung gebracht [37].

Die Frage, warum es sinnvoll ist, das Thema „Lebensmittelverpackungen“ im Unterricht zu behandeln, lässt sich nicht nur mit Blick auf die Lehrpläne beantworten. Hier soll zunächst die Entscheidung über Unterrichtsinhalte im Lichte der Erziehungswissenschaft betrachtet werden.

KLAFKI stellt einen „Aufriss von Perspektiven der Unterrichtsplanung“ zusammen, welcher sieben „Fragedimensionen“ enthält. Dabei legt er besonderen Wert auf „eine Analyse der konkreten soziokulturell vermittelten Ausgangsbedingungen“ der Lerngruppe, der Lehrperson sowie der Unterrichtsbedingungen [37, S. 16 f.]. Die Fragedimensionen zu Unterrichtsinhalten weisen im Sinne einer didaktischen Analyse auf folgende Bereiche:

- Gegenwartsbedeutung
- Vermutete Zukunftsbedeutung
- Exemplarische Bedeutung
- Thematische Struktur
- Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit
- Zugänglichkeit bzw. Darstellbarkeit
- Lehr-Lern-Prozessstruktur (Methodik)

#### 3.1 Gegenwartsbedeutung

Der Autor weist zunächst auf die Begründungsproblematik hin. Die Frage nach der „Gegenwartsbedeutung“ wird präzisiert als „Frage nach den von Kindern und Jugendlichen erfahrenen und praktizierten Sinnbeziehungen und Bedeutungssetzungen in ihrer Alltagswelt“ [37, S. 19]. Daraus ist die Frage abzuleiten, welche Bedeutung der betreffende Inhalt für die Schüler hat. Dies kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Schüler sind bereits Verbraucher und konsumieren werbewirksam eingepackte Lebensmittel wie Schokolade und Gebäck, die sie sich von ihrem Taschengeld selbst kaufen.
- Die Packmittel informieren über den Inhalt und können ansprechend gestaltet sein.
- Lebensmittelverpackungen dienen der Erhaltung der Nahrungsmittel und damit der Erhaltung der Gesundheit des Einzelnen.
- Verpackung tragen unserer Bequemlichkeit Rechnung: Es wird erwartet, dass sie sich leicht und schnell öffnen und wieder gut verschließen lassen.
- Wenn die Verpackung einmal geöffnet ist, kann der Inhalt ziemlich schnell verderben.
- Ausgediente Lebensmittelverpackungen dürfen nicht achtlos in die Umgebung geworfen werden. Sie gehören in dafür vorgesehene Sammelbehälter. Dadurch vermeidet man größere Umweltverschmutzungen.
- Ausgediente Lebensmittelverpackungen sind keineswegs völlig wertlos. Sie können recycelt oder wiederverwertet werden.

### **3.2 Vermutete Zukunftsbedeutung**

Auch die „vermutete Zukunftsbedeutung“ für Schülerinnen und Schüler verschiedener sozialer Herkunft lässt sich klar formulieren:

- Da die Zahl der Single-Haushalte zunehmen wird, kommen noch mehr einzeln abgepackte Fertiggerichte in den Handel.
- Die wachsende Weltbevölkerung muss mit Nahrungsmitteln versorgt werden. Dazu müssen Verpackungen genutzt werden, die eine noch längere Haltbarkeit der Lebensmittel ermöglichen.
- Rohstoffe werden knapp und müssen eingespart werden. Deshalb müssen Verpackungsmaterialien effektiver und sparsamer eingesetzt werden. Eingesammelte Verpackungen müssen recycelt werden.

KLAFKI fordert in diesem Zusammenhang auch eine „Selbstreflexion“ des Lehrers, damit dieser sich seines eigenen Standpunktes im sozioökonomischen Kontext bewusst wird [37, S. 20].

### **3.3 Exemplarische Bedeutung**

Die „exemplarische Bedeutung“ bezieht sich auf allgemeine Zusammenhänge, die vom Autor in mehrere Ebenen unterteilt werden. [37, S. 21-25] Erreicht werden sollen „Kritik- und Urteilsfähigkeit“ der Jugendlichen, z. B. im Hinblick auf den technischen Fortschritt. Allgemeine Zielsetzungen lassen sich formulieren:

- Der Verbraucher soll kritisch die sinnvollste Lebensmittelverpackung auswählen – sowohl unter hygienischen als auch unter ökologischen Gesichtspunkten.
- Bequem handhabbare Fertigpackungen sollen als zeit- und arbeitssparende Produkte erkannt werden, die unsere Lebensqualität erhöhen.
- Die Notwendigkeit der Unterstützung der hungernden Weltbevölkerung mit Nahrungsmitteln, die jedem ein Anliegen sein sollte, muss in Zusammenhang mit angemessenen Lebensmittelverpackungen gesehen werden. Die Bekämpfung des Hungers ist gleichbedeutend mit dem Streben nach Gesundheit und Wahrung der Menschenwürde.
- Es soll erkannt werden, dass durch umweltzerstörende Folgen – auch der Verpackungsmittelherstellung – unsere Lebensqualität gefährdet wird.
- Hinweise auf die Herstellungstechnik und die damit verbundenen Forschungsanstrengungen sollen die Wertschätzung dieses Materials und der menschlichen Arbeitskraft fördern.
- Auch Lebensmittelverpackungen sind Ausdruck technischer Innovationsfreudigkeit einerseits und dem Zeitgeist entsprechender Kurzlebigkeit von Materialien andererseits.
- Die Wertschätzung der Umwelt und die Bereitschaft zu ihrem Schutz sollen verinnerlicht werden. Ein Interesse daran muss, wenn nötig, geweckt werden.
- Auch der Verpackungsmarkt bietet Arbeitsplätze im eigenen Land, für deren Erhalt man sich einsetzen sollte.

Im Diagramm der folgenden Abb. 20 ist aufgeführt, welche größeren Sinn- oder Sachzusammenhänge vom gewählten Inhalt erschlossen werden können.

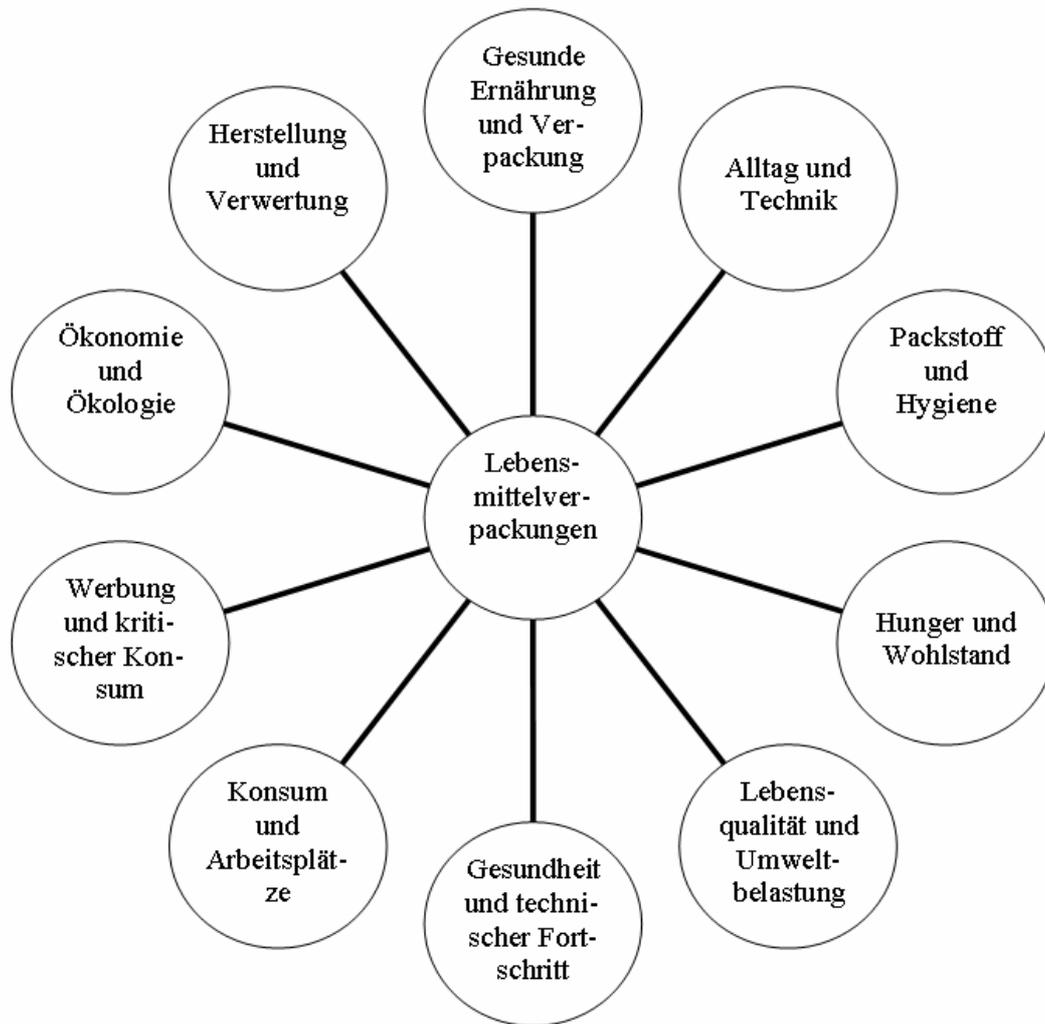


Abbildung 20: Beispiele für Erschließungsbereiche, die sich vom Thema „Lebensmittelverpackungen“ ableiten lassen

Der verwöhnte Verbraucher setzt ein hohes Qualitätsniveau im Nahrungsmittelbereich voraus. Aus dieser Sicht erscheint es befremdlich, auf die technischen Voraussetzungen hinzuweisen, die erfüllt sein müssen, um aus Erdöl einen passenden Kunststoff herzustellen, diesen wiederum zu einer funktionsfähigen Folie zu verarbeiten, welche schließlich unter hygienischen, ästhetischen und Convenience-Gesichtspunkten den Vorstellungen des Verbrauchers entspricht. Jugendliche sollen aber zu gut informierten und kompetenten Konsumenten erzogen werden. Dazu ist aber ein vielseitiges Hintergrundwissen unerlässlich, auch wenn es „nur“ exemplarisch vorhanden ist.

KLAFKI geht jedoch mit seinen Vorstellungen weit über die reine Erkenntnisgewinnung hinaus: Das Prinzip der „Selbstbestimmung“ und der „Solidarität“ soll nicht nur „Handlungsziel“ sein, sondern bereits in den Unterricht und seine Lernziele integriert werden [37, S. 21]. Im folgenden Kapitel werden die Lernziele näher erläutert.

### 3.4 Thematische Struktur

Die Lernziele lassen sich nicht nur aus fachwissenschaftlicher, sondern auch aus sozialer Perspektive einordnen:

Aus sozialer Perspektive kann von den Lernenden erwartet werden, dass sie...

- den Zusammenhang zwischen erwarteter Lebensmittelqualität und Wahl des geeigneten Verpackungsmaterials erläutern können,
- erkennen können, dass die wachsende Weltbevölkerung für ihre Ernährung eine effiziente Logistik der Nahrungsmittelverteilung benötigt, welche ohne geeignete Verpackung nicht möglich ist,
- Produkte nicht nur nach Inhalt, sondern auch nach ihrer Verpackung unter ökologischen Gesichtspunkten auswählen können,
- den Verbrauch von Ressourcen auch im Hinblick auf den Bedarf nachfolgender Generationen einschätzen können.

Aus fachwissenschaftlicher Perspektive kann von den Lernenden erwartet werden, dass sie...

- nach entsprechender Gewinnung von Erkenntnissen den Zusammenhang zwischen der Struktur des Materials und seiner Funktion erläutern können,
- Verpackungsmaterialien im Hinblick auf Rohstoff- und Energieverbrauch sowie auf Recycling und andere Verwertungsformen begründet einordnen können,
- Rohstoffverbrauch, Herstellungsverfahren und Verwertungsmöglichkeiten in ökologischen und energetischen Zusammenhängen einschätzen können,
- die Packstoffe in ihrer Vielfalt identifizieren und als „Chemikalien“ im Experimentalunterricht sinnvoll einsetzen können.

Das Thema „Verpackungen“ und die dazugehörigen Experimente haben konkrete Bezüge zu aktuellen Lehrplänen. In den folgenden Tabellen werden exemplarisch einige Experimente aufgeführt: Sie werden hier aus der Sicht der Anforderungen der Lehrpläne zweier unterschiedlicher Schultypen in Teilthemen zerlegt:

Tabelle 9: Versuche aus der Sicht des Lehrplanes Chemie (Gymnasialer Bildungsgang) [38, S. 6-52]

Versuch im Praktikum	Unterrichtsthema (Unterrichtsinhalt/Aufgaben)	Jahrgangsstufe
H-Milchkarton, Recycling	Trennverfahren für Stoffgemische	8.1
	Kohlenstoffchemie II: Technisch und biologisch wichtige Kohlenstoffverbindungen (Synthetische Makromoleküle, modifizierte Naturstoffe)	GK 12.2 LK 12.2
	Kohlenstoffchemie I: Kohlenstoffverbindungen und funktionelle Gruppen (Aromatische Kohlenwasserstoffe)	GK 12.1 LK 12.1
	Wahlthema Angewandte Chemie: Großtechnische Verfahren, Werkstoffe	GK/ LK 13.2
Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht	Säuren, Laugen, Salze, Protolysereaktionen	10.3
	Trennverfahren für Stoffgemische	8.1
	Wahlthema Komplexchemie	LK 13.2
	Wahlthema Angewandte Chemie: Großtechnische Verfahren, Werkstoffe	GK/ LK 13.2
	Redoxreaktionen: Großtechnische Elektrolysen, Metalle als Werkstoffe	11.1
	Stoffe – Strukturen – Eigenschaften: Saure, alkalische und neutrale Lösungen, pH-Wert, Universalindikator, Teilchenmodell, Dichte	8.1

Tabelle 10: Versuche aus der Sicht des Lehrplanes Chemie (Bildungsgang Realschule) [39, S. 6]

Versuch im Praktikum	Unterrichtsthema (Unterrichtsinhalt/Aufgaben)	Jahrgangsstufe
H-Milchkarton, Recycling	Stoffgemische und ihre Trennung	8.3
	Metalle und ihre Bedeutung	9.1
	Chemische Bindungen	9.4
	Elektrische Energie und chemische Prozesse	10.2
	Fossile Rohstoffe – wie lange noch?	10.3
Anfärben der Polyamidschicht eines PA/PE-Verbundes mit einem Lebensmittelfarbstoff	Stoffe und ihre Eigenschaften	8.2
	Stoffgemische und ihre Trennung	8.3
	Chemische Bindungen	9.4
	Fossile Rohstoffe – wie lange noch?	10.3
	Von Alkoholen, organischen Säuren und Seifen	10.4
Ablösen der Polyamidschicht eines PA/PE-Verbundes mit konzentrierter Salzsäure	Stoffe und ihre Eigenschaften	8.2
	Stoffgemische und ihre Trennung	8.3
	Säuren und Laugen	9.5
	Fossile Rohstoffe – wie lange noch?	10.3

### 3.5 Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit

Erworbenes Wissen muss überprüfbar sein, der Erfolg von Unterricht muss erwiesen werden. Hier entsteht ein Problem: Der Umgang mit Convenience-Produkten des Lebensmittelmarktes birgt auch eine gewisse „Ambivalenz“ in sich. Einerseits lädt die Werbung zum Konsumieren ein, andererseits sollen aus den Jugendlichen kritische Konsumenten werden, deren Wertebewusstsein nicht nur die Errungenschaften der sozialen Marktwirtschaft, sondern auch die Unversehrtheit der Umwelt und die Schonung der Ressourcen umfasst – möglichst unter globalen Gesichtspunkten. Angesichts der Vielfalt der thematischen Bezüge sollte die Überprüfbarkeit auf verschiedenen Ebenen stattfinden:

- Gewonnene Erkenntnisse und erworbenes Wissen lassen sich in Form eines schriftlichen Tests abfragen, Referate können gehalten werden. Auch ist an Präsentationsprüfungen zu denken.
- Jugendliche können im Rahmen eines Unterrichtsgesprächs oder einer einzelnen mündlichen Prüfung zu einfach strukturierten Portionsverpackungen befragt werden (Materialzusammensetzung, Funktion, Herstellung und Entsorgung aus ökologischer und ökonomischer Sicht).
- In Interviewform oder mit Fragebögen vor und nach der Unterrichtseinheit „Lebensmittelverpackungen“ kann die Änderung des ökologischen Bewusstseins der Jugendlichen, welche z. B. in einer Änderung des Konsumverhaltens zum Ausdruck kommen kann, überprüft werden.

Auch hier erscheint es sinnvoll, den Schülerinnen und Schülern Zeit zu geben, ihre Einstellung und ihr Verhalten zu reflektieren, immer im Hinblick auf ihre wachsende Kompetenz.

### 3.6 Zugänglichkeit bzw. Darstellbarkeit

Zugänglichkeit und Darstellbarkeit sind durch den Alltagsbezug sowie durch variabel handhabbare experimentelle Einstiegsmöglichkeiten gegeben. Der täglich erfahrene Bedarf an Nahrungsmitteln, Konsumgewohnheiten und der Einfluss der Werbung vermitteln den Jugendlichen eine ständige Nähe zu diesem Thema. Ein erster „Einstieg“ in dieses Thema hat also bereits im Alltag stattgefunden.

- Durch die Alltäglichkeit dieser Materialien kann der erste Schritt des Zugangs bereits als gegeben vorausgesetzt werden. Eine indirekte Hinführung zu diesem Thema ist nicht erforderlich.
- Manche Verpackungsmaterialien können durch ihre ansprechende und einprägsame Optik und Haptik auf Jugendliche zusätzlich motivationsfördernd wirken.
- Verpackungen sind in größeren Mengen kostenfrei bzw. preisgünstig erhältlich.
- Diese Materialien sind dank ihrer definierten Zusammensetzung für eine überschaubare und gleichzeitig vielfältige stoffliche Erschließung gut geeignet.
- Die experimentelle Zugänglichkeit verschiedener Packstoffe ist unterschiedlich. Dadurch sind dem Experiment als Mittel der Erkenntnisgewinnung Grenzen gesetzt, nicht zuletzt durch die Geräteausstattung der Schulen.
- Je nach Schulform und Jahrgangsstufe kann der Schwerpunkt experimenteller Ansätze stärker auf der Phänomen-Ebene oder auf der analytischen Ebene liegen. Auch die theoretische Erweiterung kann völlig flexibel gehandhabt werden.

Es stellt sich jetzt die Frage, wie diese wohlbekanntesten Materialien im Unterricht eingesetzt werden können und welchen Einfluss die Wahl des Themas und damit der Materialien auf die Unterrichtsplanung haben kann.

### 3.7 Lehr-Lern-Prozessstruktur (Methodik)

Methodische Strukturierungen zu diesem Thema lassen sich flexibel gestalten. Die gute Zugänglichkeit bzw. Darstellbarkeit dieses Themas erweisen sich als förderlich für die Möglichkeiten struktureller Vielfalt im Lehr-Lern-Prozess. Zur Frage der Strukturierung schreibt KLAFKI: „ ‚Methoden‘ können also selbst ‚Thema‘ des Unterrichts bzw. wichtige Momente des Unterrichtsthemas sein...“ [37, S. 25]. Die Vielfalt methodischer Möglichkeiten wird durch nachfolgende Punkte erläutert:

- Das Verpackungsmaterial kann problemlos als Medium für den Unterrichtseinstieg oder als Hilfe bei der Suche nach Problemlösungen dienen, z. B. beim Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahren.
- Das Material selbst kann Gegenstand experimenteller Untersuchungen sein, etwa mit dem Ziel der Strukturauflösung. Diese Untersuchungen lassen sich völlig flexibel – je nach Komplexitätsgrad und vorliegendem Material - als Demonstrationsversuch durch den Lehrer oder als Schülerversuch durchführen.
- Ausgehend von experimentellen Befunden kann mit Hilfe von Lehrbüchern, spezieller Fachliteratur sowie mit Datenblättern der weitere Zugang zu den weiterführenden Themen erarbeitet werden. Im Rahmen einer induktiven Methode können allgemeine Anforderungen an Verpackungsmaterialien formuliert werden.
- Im Rahmen einer deduktiven Methode können – von allgemeinen Anforderungen an Verpackungsmaterialien ausgehend – Schlüsse zur Art des zu verwendenden Materials formuliert werden.

- Der Besuch in einer Firma, die mit der Herstellung, Verarbeitung oder Recycling befasst ist, kann als Impuls dienen, um „nachvollziehend-verstehendes Lernen“ [37, S. 30] in Gang zu setzen.
- In Form von Schülerreferaten lassen sich Informationen vortragen, wobei sich Referenten anschließend der Befragung durch die Lerngruppe unterziehen.
- Fingierte kontrovers angelegte „Experten“-Diskussionsrunden regen zum Nachdenken an, etwa über Themen wie „Glas contra PET“, „Einweg contra Mehrweg“, „Pro und contra Getränkedose“, „Ökonomie und Ökologie - ein Widerspruch?“ usw.
- Das Thema lässt sich nicht nur in Anlehnung an den Lehrplan flexibel in den alltäglichen Fachunterricht integrieren, sondern auch im Rahmen des Wahlpflichtunterrichtes oder eines Projekttages anschaulich bearbeiten. Mögliche Themen könnten z.B. „Gesunde Ernährung und Umwelt“ oder „Ökologische Bewertung unserer Schulmilchverpackung“ lauten.

### 3.8 Zusammenfassung

Das Thema „Lebensmittelverpackungen“ führt, chemisch-fachwissenschaftlich betrachtet, zu einer Vielzahl an Materialien, welche im fachlichen Rahmen des experimentellen Chemieunterrichts direkt als „Chemikalien“ eingesetzt werden können. Ebenso können Funktionen der verschiedenen Materialien erprobt und ermittelt werden, besonders im Hinblick auf Lebensmittel und deren Behandlung.

„Lebensmittelverpackungen“ selbst können auch das Thema einer Unterrichtseinheit sein, beispielsweise im Wahlpflichtunterricht oder Unterrichtsgegenstand an einem Projekttag. Fächerübergreifende Ansätze bieten sich in Richtung Biologie, Physik, Politik und Wirtschaft sowie Kunst an. Außer der fachwissenschaftlichen Zielsetzung wird in den Lehrplänen auch die Erziehung der Jugendlichen zu mündigen Bürgern angestrebt. Kompetente Entscheidungsträger von morgen benötigen ein solides Fachwissen im Gesamtzusammenhang gesellschaftlicher Verantwortung, z. B. im Ernährungs-, Hygiene- und Umweltbereich.

KLAFKI unterzieht in Frage kommende Unterrichtsthemen einer didaktischen Analyse. Danach soll zunächst die Gegenwartsbedeutung eines Themas für die Schüler überprüft werden. Dies findet bereits seinen Ausdruck darin, dass Schüler Konsumenten sind, besonders im Bereich kleinerer Portionspackungen. Eine Zukunftsbedeutung des Themas ergibt sich aus dem Blick auf Single-Haushalte, Nahrungsmittel-Lieferungen im Zeitalter der Globalisierung sowie auf eine drohende Ressourcen-Knappheit. „Lebensmittelverpackungen“ erschließen somit exemplarisch als zentrales Thema Themenschwerpunkte aus den Bereichen Ernährung, Hygiene, Technologie, Rohstoffe, Umwelt, Vermarktung und Soziales. Neben der fachwissenschaftlichen Perspektive lassen sich auch soziale Perspektiven in diesem Thema erkennen: eine für alle Bürger erschwingliche Lebensmittelqualität, Vertrauen in die Hersteller und Vertrieber von Nahrungsmitteln, weltweite Distributionsmöglichkeiten für Nahrungsmittel sowie die Notwendigkeit der sinnvollen Verwertung von Verpackungsabfällen bzw. ihrer Vermeidung.

Die Alltagserfahrungen der Schüler bringen eine gute Zugänglichkeit mit sich. Eine gute Darstellbarkeit ist bereits durch das konkret einsetzbare Verpackungsmaterial gegeben. Das Thema lässt vielfältige methodische Strukturierungen zu. Der Wechsel zwischen konkreter und theoretischer Ebene lässt sich flexibel gestalten. Die Vielzahl der Erschließungsfelder eröffnet viele Einstiegs- und Verknüpfungsmöglichkeiten mit benachbarten Themen.

## 4 Derzeitiger Stand der fachdidaktischen Forschung unter besonderer Berücksichtigung des Themas „Lebensmittelverpackungen“

### 4.1 Die Krise des Chemieunterrichts: Ursachen und Lösungen

Nach Ansicht von FLINT (1998) ist beim Chemieunterricht seit den Siebzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts durchaus eine Veränderung festzustellen. Zunehmend wurde „erheblich mehr Wert auf Zusammenhänge, Methodenkompetenz und exemplarisches Vorgehen als auf Faktenwissen gelegt“ [40, S. 3]. Bei dieser Analyse bezieht sich FLINT auf eine Publikation von SCHEIBLE aus dem Jahre 1969 [41, S. 449 ff.]. Bereits damals wird ein im Laufe der Schuljahre immer stärker werdendes Nachlassen des Schülerinteresses am Fach Chemie beklagt, und ein Wechsel des bis dahin praktizierten Unterrichtsstiles wird angemahnt. Trotz großer Bemühungen seitens der Fachdidaktiker zeigen jedoch auch empirische Studien der Neunzigerjahre, dass die Akzeptanz des Chemieunterrichtes weiterhin ziemlich gering ist und dass der Schwund des Fachinteresses zwischen Anfangsunterricht und 10. Klasse weiterhin besteht. Dem entsprechend werden Chemie-Kurse in der Sekundarstufe nur selten gewählt. [40, S. 4 f.] „Ursache dafür mag eine nach anfänglicher Neugier einsetzende Enttäuschung darüber sein, dass die neu erworbenen Kenntnisse kaum dazu beitragen, Probleme im Alltag besser lösen und offene Fragen beantworten zu können“ [40, S. 5]. GRÄBER (1992) bestätigt, dass die nach Einschätzung der Schüler „fehlende Nähe des Chemieunterrichts zu ihrer Lebenswelt“ als Grund für die Abkehr gewertet werden muss. Einen weiteren Grund sieht er im „schlechten Image von Chemie und Technik“ [42, S. 270-273]. Entsprechend ist, wie HÄUßLER et al. (1998) feststellen bei Jugendlichen das Sachinteresse an den Naturwissenschaften allgemein weniger auf die wissenschaftliche Disziplin selbst gerichtet als vielmehr auf deren „Anwendung“ und „lebenspraktischen Nutzen“ [43, S. 120].

So wertet FLINT (1998) das Desinteresse von Lernenden am Fach Chemie als Ausdruck einer krisenhaften Situation. Zu deren Bewältigung fordert er die „möglichst häufige Verknüpfung mit dem Alltag und der Lebenswelt“, die „Einbeziehung von Schülervorstellungen“, „Rücksicht auf den geistigen Entwicklungsstand der Schülerinnen und Schüler“ sowie „Sorgfalt bei einem notwendigen Konzeptwechsel“ [40, S. 40]. FLINT selbst hält allerdings nichts davon, die bei Schülern unbeliebten Chemie-Themen auszuklammern oder zu verlagern. Er fordert vielmehr, „sich über eine alternative Vermittlung dieser Inhalte Gedanken zu machen“ [40, S. 5]. ROSSA (2005) nennt mehrere Konzeptionen, die seit 1990 erstellt wurden, um den Chemieunterricht zu verbessern. Dazu zählen Alltagsorientierung, Handlungsorientierung, Chemie im Kontext [44, S. 89-91].

Bei PFEIFER (2002) et al. findet man einen ausführlichen Überblick über folgende drei sehr bedeutende Konzeptionen:

- Alltagsorientierter Chemieunterricht nach JUST und WOEST (Bestimmung des Verlaufs durch das Alltagsthema, Schlüsselqualifikationen im sozialen Bereich, gelegentlicher Zugriff auf die Fachsystematik)
- Praxisorientierter Chemieunterricht nach LUTZ und PFEIFER (Wissenschaftsbezug, Erfahrungs- bzw. Anwendungsbezug, zentrale Rolle des Experiments)
- Chemie im Kontext nach PARCHMANN, RALLE und DEMUTH (Kontextorientierung, curriculare Vernetzung der Fachinhalte über Kontexte und Basiskonzepte, Methodenvielfalt/Lernzyklen) [45, S. 163 f.].

Die Bewertung der fachdidaktischen Literatur hinsichtlich des Themas „Lebensmittelverpackungen“ soll sich einerseits an der Realisierung dieser drei von PFEIFER et al. (2002) vorgestellten Konzeptionen messen lassen, andererseits an der Berücksichtigung der von GRÄBER

(1992), HÄUßLER (1998) und FLINT (1998) erwähnten Aspekte: Alltagsbezug, Schülerinteressen, Schülerexperimente und Förderung der Selbstständigkeit [45], [42], [43], [40].

## **4.2 Das Thema „Packstoffe“ in der methodisch-didaktischen Literatur**

### **4.2.1 Berücksichtigung des Alltagsbezuges**

FLINT (1998) weist allerdings auch sehr deutlich auf die Grenzen dieses Ansatzes hin. So dürfen die Alltagsphänomene nicht als „Lockvogel“ gesehen werden. Vielmehr sind für das Verstehen von Alltagsphänomenen fundierte chemische Kenntnisse nötig. [40, S. 5 f.] Eine eindringliche Warnung vor einer Übergewichtung des Alltagsbezuges auf Kosten der Fachsystematik findet man auch bei TAUSCH (2000). Er sieht Kontext und Fachsystematik als ein „komplementäres Paar“ an, weist aber gleichzeitig auf die hohen Anforderungen an die Lehrperson hin, welche diesen Weg der „didaktischen Integration“ praktiziert [46, S. 179-181]. Arbeiten mit besonderer Berücksichtigung des Alltagsbezugs zeigen unterschiedliche Schwerpunkte. Während bei JUST (1997) [47] das Phänomenologische im „Alltagsorientierten Chemieunterrichtes“ ein sehr starkes Gewicht bekommt, findet man bei SOMMER/PFEIFER (2002) eine höhere Wertschätzung fachlicher Grundlagen [48]. Dieser Ansatz des „Praxisorientierten Chemieunterrichtes“ stellt einerseits Bezüge zum Lehrplan her, andererseits werden Stoffeigenschaften erläutert, wobei die Alltagsbedeutung des Packstoffes Aluminium hervorgehoben wird. Auch fächerübergreifende thematische Überschneidungen werden zum Verständnis genutzt. Zum Thema „Aluminium“ stellt HAUPT (2002) das Unterrichtsmedium „Zeitungsartikel“ vor [49]. Schülern wird damit die alltägliche Nutzung von Aluminium-Verpackungen verdeutlicht. STÜBS/HELDT (1999) gehen beim Thema „Konservendose“ bewusst von einem im Alltag erworbenen Vorwissen der Schüler aus. Darauf aufbauend findet man anspruchsvolle Experimente zum Thema „Zinn-Ionen“ [50]. Hier kann man durchaus von einem „Alltagsbezug“ sprechen, keinesfalls von einer „Alltagsorientierung“. CHRISTIANSEN et al. (2003) zeigen in ihrem Konzept „Chemie im Kontext“ Plastikflaschen im Zusammenhang mit dem Problem „Abfall“ und der Lösung des Problems durch „Recycling“. Experimentiervorschriften zum Recycling von Kunststoffen ergänzen den Ansatz dieses Konzeptes auf praktischer Ebene [51]. Der Alltagsbezug spielt bei sämtlichen aufgeführten Arbeiten eine wichtige Rolle und dient als authentische und motivierende Komponente.

Eine Auflistung von Konzepten mit jeweils einer großen Zahl von Alltagsbereichen findet man bei JUST (1997). Verpackungen werden hier einerseits dem Konzept „Stoffe und Reinstoffe, Element / Verbindung“ zugeordnet (Müll, Recycling, Getränkeverpackungen), andererseits einem Konzept, welches sich mit Makromolekülen beschäftigt (Papier, Kunststoffe, Wachse, nachwachsende Rohstoffe für Verpackung und Papier, Recycling). Getränkedosen werden unter dem fachlichen Kernbereich „Materialverbund“ eingeordnet. JUST (1997) misst der Rolle von Alltagsthemen große Bedeutung bei. „Erwachsene oder Heranwachsende müssen es für ihren Alltag aber erst lernen, in Gegenständen auch den Stoffcharakter zu sehen. Ein Transfer dieser Aspekte aus dem Chemieunterricht ist aber nur mit vorheriger Übung möglich! Dazu eignen sich m. E. Alltagsbereiche im geöffneten alltagsorientierten Chemieunterricht wie „Getränke in verschiedenen Verpackungen“ (...). Sie scheinen für Schüler subjektiv bedeutsam zu sein“ [47].

Im Rahmen eines Basisartikels erwähnen SOMMER / PFEIFER (2002) zum Thema „Aluminium“ auch dessen Bedeutung als Verpackungsmaterial. Ferner findet man zu diesem metallischen Werkstoff eine Auflistung von Lehrplanschwerpunkten mit zugeordneten Konkretisierungen, dann eine Erörterung der „fachdidaktischer Leitlinien“, z. B. die „Leitlinie Stoff-Struktur-Eigenschaften“ oder die „Leitlinie Alltagsbezug“. Ein übersichtliches Diagramm zeigt „fächerübergreifende Bezüge der Aluminiumproduktion“. In einer gut

strukturierten Tabelle „Schritte zur nachhaltigen Entwicklung“ wird die Recyclingrate des Aluminiums aus Verpackungen angegeben. Schließlich wird das sehr günstige Gewicht-Leistungs-Verhältnis der 6 µm dicken Aluminiumfolie erläutert, welche zur Verpackung von Milch eingesetzt wird [48].

Ebenfalls in einem Basisartikel begründen GLIMM/SCHÄFER (2002) das Anliegen der Aluminiumindustrie, das Thema Aluminium „in die Klassenräume zu bringen“. Sie verweisen auf das breite Spektrum an Anwendungen und beziffern den Anteil des Verpackungsektors auf dem Aluminiummarkt mit 7 %. Ausdrücklich erwähnen sie die für Verpackungen unverzichtbaren Barriereigenschaften dieses Metalls sowie seine gute Verarbeitbarkeit zu Folien und zu Dosenmaterial. Am Beispiel der Trinkflasche werden die Vorteile des geringen Gewichts bei gleichzeitiger hoher mechanischer Stabilität erwähnt. Außerdem wird auf die Wiedergewinnung von Aluminium auch aus Verbunden hingewiesen, z. B. aus einer Kaffeetüte. [52].

HAUPT (2002) stellt zwei Zeitungsartikel vor, die sich mit den Eigenschaften des Aluminiums und seinen Anwendungsbereichen befassen. Zunächst wird die Eignung von Aluminiumverpackungen zum Einfrieren und Auftauen von Speisen und damit die Verwendung als Bratschale erwähnt. Diese unkomplizierte Einsetzbarkeit wird auf die gute Wärmeleitfähigkeit und die Unempfindlichkeit des Metalls gegen Temperaturschwankungen zurückgeführt. Neben diesen Convenience-Eigenschaften wird auch die Recyclebarkeit als Vorteil genannt. Der zweite Zeitungsartikel nennt die Getränkedose als Einsatzgebiet für das dritthäufigste Element der Erdkruste. Die Gewichtsersparnis wird als Vorteil genannt. Dabei wird erwähnt, dass Aluminium etwa drei Mal so teuer wie Stahl ist. Man findet außerdem Hinweise auf die Gewinnung von Aluminium. Den Zeitungstexten sind Arbeitsaufträge für Schüler angefügt [49].

Zum Thema „Weißblech“, der zweiten großen Gruppe der Metallverpackungen stellen STÜBS/HELDT (1999) ein Verfahren dar, mit dem die Konzentration der Zinnionen im Saft einer Ananas-Konservendose komplexometrisch bestimmt wird. Dabei weisen sie nach, dass der Zinnionen-Gehalt innerhalb von einer Woche nach dem Öffnen um mehr als das Dreißig- bis Vierzigfache ansteigt. Sie setzen das im Elternhaus erworbene Vorwissen der Schüler voraus, dass Lebensmittel aus unlackierten Weißblechdosen nach dem Öffnen sofort in nicht korrosionsanfällige Gefäße umgefüllt werden müssen, also in ein Glas-, Kunststoff- oder Porzellanengefäß. Als Ursache für die Entstehung von Zinn-Ionen wird auf übersichtliche Weise die Rolle des Sauerstoffs als Elektronenakzeptor erläutert. Diese Arbeit ist ein gelungenes Beispiel für einen themenübergreifenden Ansatz zwischen Verpackung und Nahrungsmittel [50].

CHRISTIANSEN / HUNTEMANN / SCHMIDT / PARCHMANN (2003) gehen in ihrer Konzeption „Chemie im Kontext“ davon aus, dass Kunststoffe eine hohe Alltagsrelevanz für Schülerinnen und Schüler haben. Sie erörtern das Problem der Entsorgung von Plastikmüll im Wechselspiel zwischen Kontext und Fachwissenschaft mit den Schwerpunkten unterschiedlicher Verwertungen von Kunststoffresten. Ein Foto aus Asien zeigt, dass auch PET-Flaschen zum Müllaufkommen beitragen. Man findet schließlich noch drei experimentelle Ansätze: zum Umschmelzen, zur rohstofflichen Nutzung durch biologischen Abbau von Joghurtbechern aus Polymilchsäure sowie zur rohstofflichen Nutzung als Reduktionsmittel für Metalloxide [51].

Von den aus dem Alltag bekannten Packmitteln werden in den zitierten Arbeiten genannt: Getränkeverpackungen (Getränkarton, Schlauchbeutel, Glasflasche, PET-Flasche, Getränkedose aus Aluminium und Weißblech), Joghurtbecher mit Aluminiumdeckel, Konservendose (innen verzinkt) mit Papierbanderole, Aluminiumfolie, Bratschale, Kaffeetüte, Blister, Weichmacher, Wachs.

#### 4.2.2 Berücksichtigung von Schülerinteressen

Zur Motivierung sollten nach den in der Literatur dargelegten Forschungsergebnissen die von den Jugendlichen bevorzugten Wissensbereiche einerseits und emotional-affektiv geprägte Lernsituationen andererseits berücksichtigt und genutzt werden. Nach HÄUßLER et al. (1998) sollten besonders für Mädchen Inhalte, bei denen sie an bisherige Erfahrungen anknüpfen können, häufiger als Ausgangspunkt dienen, also Themen wie Körperpflege, Ernährung, Kosmetik und Schmuck. Auch Themenbereiche aus der Kohlenstoffchemie finden bei Mädchen in der Sekundarstufe I großes Interesse. Dies spricht dafür, schon zu Beginn des Chemieunterrichtes die Kohlenstoffchemie stärker zu berücksichtigen. Bei beiden Geschlechtern gleich ist das Interesse an der Anwendung der Chemie mitsamt ihren Umweltrisiken. Diese Befunde sprechen dafür, die Chemie stärker in einen ganzheitlichen Zusammenhang mit der Lebenswelt zu bringen [43].

Das Thema „Lebensmittelverpackungen“ bzw. „Verpackungen“ wird zwar in vielen Befragungen zum Schülerinteresse zur Chemie des Alltags nicht explizit aufgeführt, jedoch in Einzelfällen bei Schülerumfragen als interessant erwähnt, wie man den Erhebungen von BARKE (1987), KLAETSCH/SCHMIDKUNZ (1994) und SCHMIDKUNZ / KLAETSCH (1995) entnehmen kann [2], [53], [54]. Mit einem „Alltagsorientierten Ansatz“ versucht WOEST (1997) den Abstand zwischen Fachwissenschaft und Schülerinteressen zu überbrücken. Er nennt Experimente mit Kunststoffen (Umschmelzen, Weichmacher, Nachweisreaktionen), die sich an den Alltagserfahrungen der Schüler orientieren sollen. Mit diesem ganzheitlichen Ansatz kommt er den Schülerinteressen entgegen. Dies gilt auch für den experimentellen Teil und die Planung und Auswertung durch die Schüler. KLAETSCH/SCHMIDKUNZ (1994) weisen ebenfalls bei Schülern ein großes Interesse am experimentellen Arbeiten nach [53]. Auch PIOSIK (1997) nennt ein großes Interesse von Lernenden an Gruppenarbeit und an Experimenten [55]. WANJEK/BARKE (1998) weisen bei einer Untersuchung in der Jahrgangsstufe 9 nach, dass sich besonders Mädchen für Chemikalien aus dem Alltag interessieren, welche im Chemieunterricht thematisiert werden. Diese Arbeit behandelt zwar nicht speziell das Thema „Lebensmittelverpackungen“, zeigt aber, mit welcher Begeisterung authentische Substanzen im Unterricht angenommen werden [56]. Nach BARKE (1987) wurden bei einer Befragung von Schülern zum Interesse an Themen aus Alltag und Umwelt auch „Verpackungen für Lebensmittel“ genannt [2].

KLAETSCH/SCHMIDKUNZ (1994) untersuchten die Einschätzung des Unterrichtsfaches Chemie bei Lernenden der 9. Jahrgangsstufe an einer Realschule. Auf die Frage, was man im Chemieunterricht lernen könne, wurden als Antworten verschiedene Einzelbegriffe genannt, wie Nahrungsmittel, Konservierungsstoffe und Verpackungen. In diesem Rahmen wurde auch die Unbeliebtheit der chemischen Symbolsprache deutlich, der Wunsch nach mehr Experimenten sowie nach einem ausgewogenen Theorie-Praxis-Verhältnis [53]. Umfragen unter Realschülern der 9. Jahrgangsstufe in NRW zu ihrer „Einschätzung des Unterrichtsfaches Chemie“ ergaben, dass nur 20 % der Befragten die Begriffe „Chemie und Alltag“ aufführten, als es um die Beantwortung der Frage ging, was man „im Chemieunterricht lernen“ könne. Dabei wurden „Verpackungen“ und „Konservierungsstoffe“ zusammen mit „Lebensmitteln“ der Chemie zugeordnet. Die Autoren SCHMIDKUNZ / KLAETSCH (1995) führen dieses Teilergebnis auf die Diskussionen in den Medien zurück. In ihrer Auswertung der Untersuchungsergebnisse kommen sie u. a. zu dem Schluss, dass das Interesse an Chemie bei den Schülerinnen und Schülern nach wie vor vorhanden ist [54].

WOEST (1997) verweist auf die Diskrepanz zwischen Schülerinteressen und der vorgefundenen Gestaltung des Chemieunterrichtes. Zur Lösung dieses Widerspruchs stellt er die Thematisierung von Alltagsbezügen und die Betonung schüleraktiver Lernmöglichkeiten vor. Aus dem Themenbereich „Organische Stoffe des Alltags“ führt er eine Reihe von Experimenten auf, die unter der Stoffgruppe der „Kunststoffe“ auch mit den in Packmitteln vorgefundenen Materialien durchzuführen wären: Downcycling (Umschmelzen), Wirkungsweise eines

Weichmachers (Diocetylphthalat), Identifikation verschiedener Kunststoffe (Nachweisschema) und rohstoffliches Recycling (unterschiedliche Löslichkeit in Xylol). Mit seinem alltagsorientierten Ansatz verweist er darauf, dass die üblichen Schulfächer sich nicht primär an der Struktur der Alltagserfahrungen orientieren. Die didaktische Aufbereitung wird an den Prinzipien der „Kontextualisierung“ ausgerichtet. Dabei sieht er Experimente als einen zentralen Bestandteil, innerhalb dessen die Schüler ihr Vorgehen selbst entscheiden können. Hilfestellungen durch den Lehrer hält er allerdings für erforderlich [57].

WANJEK/BARKE (1998) verweisen auf das starke Interesse von Jugendlichen an Alltags- und Umweltthemen im Chemieunterricht und dokumentieren eine Untersuchung darüber, „ob sich Motivation und Interesse steigern lassen, wenn man übliche Laborchemikalien durch Chemikalien ersetzt, die Schüler aus Küche und Haushalt kennen.“ Die Untersuchung wurde 1997 in fünf Klassen der Klassenstufe 9 einer Gesamtschule durchgeführt. Die Autoren geben als Ergebnis an, dass sich über 70 % der Mädchen und Jungen für den Einsatz von Chemikalien aus dem Alltag im Chemieunterricht interessieren. Aus einzelnen Ergebnissen ziehen sie außerdem den Schluss, „daß es gerade für die Mädchen eine große Rolle spielt, wenn im Unterricht Bezüge zur Lebenswelt hergestellt werden und diese im gesamten Unterricht Berücksichtigung finden“ [56]. Die Arbeiten, welche Schülerinteressen erforschen, stoßen meist auf den Wunsch der Lernenden nach gesamtheitlicher, anwendungsbezogener, schülerorientierter, praxisorientierter und fächerübergreifender Ausrichtung der Unterrichtsinhalte und ihrer Umsetzung im Unterricht.

### 4.2.3 Schülerexperimente

Nach HÄUßLER et al. (1998) sollte auf das Experiment im Chemieunterricht noch stärker Wert gelegt werden. Das Durchführen von Chemieversuchen wird von beiden Geschlechtern als besonders interessant empfunden, wohingegen die Planung und besonders die Auswertung von Versuchen auf deutlich weniger Interesse stoßen. Hingegen findet die Betrachtung von Gefahrenaspekten im Rahmen von chemischen Experimenten wiederum recht großes Interesse [43, S. 144].

Die Arbeiten welche sich mit dem Thema „Schülerexperimente“ befassen, unterscheiden sich deutlich hinsichtlich präziser Experimentieranleitungen, der Planungs- und Auswertungsphase sowie der Gewichtung ökologischer Fragestellungen. Zur näheren übersichtlichen Betrachtung empfiehlt es sich, die erwähnten Arbeiten nach den Stoffgruppen „Metalle“ und „Kunststoffe“ einzuteilen.

Zahlreiche Arbeiten beschäftigen sich mit Metallverpackungen bzw. Aluminiumanteilen von Verbunden. Mit dem Ansatz des „Mikrochemischen Experimentierens“ stellen ELMARSAFY / SCHWARZ (2002) elektrochemische Experimente vor, bei denen Getränkedosen zum Einsatz kommen. „Die meisten Materialien sind kostenlos und überall auf der Welt erhältlich. Getränkedosen, Tabletten-Behälter (Blister), Tetra Paks, Strohhalme (Spatel) liegen buchstäblich auf der Straße, andere finden sich im Haushalt oder bei Handwerkern“ [58]. Ebenfalls für das Gebiet der Elektrochemie, jedoch mit dem Konzept des „Heimexperiments“ stellen DE VRIES/MARTIN/PASCHMANN (2006) eine Reihe von Experimenten für die Sekundarstufe II zusammen, in denen z.B. Getränkedosen eingesetzt wurden, um galvanische Zellen herzustellen und Korrosionserscheinungen zu demonstrieren. In diesem kostensparenden Rahmen wurden Kunststoffdeckel von Joghurtbechern als Petrischale eingesetzt [59]. Im Rahmen eines projektorientierten unterrichtlichen Ansatzes wird bei der „Chemie der Dosenravioli“ nicht nur dem Nahrungsmittel, sondern auch dem Verpackungsmaterial selbst Aufmerksamkeit gewidmet. Dazu stellt das Autorenteam ALBRECHT/ESCHER/BADER (2002) Experimente zum Ligninnachweis der Papierbanderole vor sowie zum Nachweis von Zinn und Eisen aus Weißblech. Das galvanische Entzinnen wird als weiterführende experimentelle Möglichkeit zum Recycling von Weißblech erwähnt. Als Alternative zur Zinnschicht wird die

Innenbeschichtung von Konservendosen durch Lack genannt. Dass nicht jedes gut verarbeitbare Metall für die Verpackung von Lebensmitteln eingesetzt werden darf, zeigt eine abschließende historische Betrachtung, die einen Fall einer verhängnisvollen Bleivergiftung beleuchtet [60]. Ebenfalls mit Konservendosen befassen sich STÜBS/HELDT (1999) [50]. Sie stellen Experimente zur quantitativen Erfassung von Zinn-Ionen vor, welche aus Weißblech freigesetzt werden. PFEIFER/BRUCHNER (2002) präsentieren eine Auflistung von Experimenten zum Thema „Aluminium“. Experimentiervorschriften findet man beispielsweise zum Nachweis der Legierungsbestandteile im Deckel eines Joghurtbechers [61]. BADER/SGOFF (1994) stellen in einer Experimentiervorschrift dar, wie ein Getränkekarton für H-Milch in seine drei Bestandteile zerlegt werden kann. Mit Hilfe von Toluol wird aus dem Verbund Polyethylen heraus gelöst, wobei Karton und Aluminiumfolie voneinander getrennt werden und zurück bleiben [62].

Experimentieranleitungen zum Thema „Kunststoffe“ sind besonders deutlich vom Recycling-Gedanken geprägt. So beschreiben beispielsweise CHRISTIANSEN et al. (2003) drei experimentelle Ansätze: zum Umschmelzen, zur rohstofflichen Nutzung durch biologischen Abbau von Joghurtbechern aus Polymilchsäure sowie zur rohstofflichen Nutzung durch die Reduktion von Metalloxiden [51]. WAGNER (1999) stellt im Rahmen eines handlungsorientierten und alltagsbezogenen Konzeptes Polymilchsäure (PLA) als Alternative zu den gängigen Standardkunststoffen vor. Mit Blick auf naturnahe Kreisläufe wird als Anwendungsbeispiel für Lebensmittelverpackungen ein kompostierbarer Joghurtbecher erwähnt, welcher 1998 auf den Markt kam. Für den experimentellen Zugang findet man Versuchsvorschriften zur alkalischen Hydrolyse (auch im Vergleich zu PET), zur dünnschichtchromatographischen Untersuchung des Hydrolysats, zur Synthese von Polymilchsäure, zur Isolierung von Milchsäure aus PLA-Hydrolysat sowie zur Kompostierung [63]. HALLSTEIN (2000) erläutert in einem Überblick werkstoffliches, rohstoffliches und energetisches Recycling. Ausgangspunkt ist die Masse der anfallenden Plastikverpackungen. Durch Umschmelzen können die Abfälle werkstofflich recycelt werden, wobei auch die Pfandflaschen aus PET erwähnt werden. Zum rohstofflichen Recycling hingegen wird eine Experimentieranleitung mit Skizze angegeben [64]. Die Erarbeitung einer Betrachtung von Getränkeverpackungen im Sinne eines Kreisprozesses findet man bei BADER/ACS (1996). Sie stellen experimentelle Ansätze zum Recycling von PET-Getränkeflaschen vor. Ein übersichtliches Kreislauf-Schema erleichtert die Zuordnung der dargestellten Schülerversuche in den Kreisprozess [65].

Zusammenfassend betrachtet, findet man in neun Arbeiten präzise Experimentieranleitungen. Als verarbeitete fachliche Themen sind Redoxreaktion (Sauerstoff als Elektronenakzeptor, galvanische Zelle, Elektrolyse, Galvanisieren) Säure-Base-Reaktion, Komplexchemie, Kohlenstoffchemie (funktionelle Gruppen und Reaktionsmechanismen, Pyrolyse, Benzolderivate als selektive Lösungsmittel) zu nennen. Erwähnt werden zahlreiche Substanzen, am häufigsten Aluminium und Weißblech, Kunststoffe (PET, PLA, PE, PS), Weichmacher sowie Papier und Glas.

#### **4.2.4 Förderung der Selbstständigkeit**

Nach den Ergebnissen der OECD-Studie und TIMMS hält ROSSA (2005) die „klassische didaktische Trias von Fachrelevanz – Schülerrelevanz – Gesellschaftsrelevanz“ im Rahmen der „problemorientierten Unterrichtskonzeption“ für „nicht mehr ausreichend“. Die Zielsetzung des Unterrichts solle vielmehr ausgeweitet werden auf das Einüben „sozial erwünschter Verhaltensweisen“, auf „Methoden- und Medienkompetenz“ sowie auf die Anregung zum „eigenverantwortlichen Handeln in einer demokratischen Gesellschaft“ [44, S. 88-91].

WOEST/MARKS (1998) stellen eine Unterrichtseinheit zum Thema „Getränkedosen“ vor. Sie wollen damit erproben, wie die „Selbstlernfähigkeit“ der Schüler im Chemieunterricht zu entwickeln ist. Dazu müssen die Lernenden größere Freiräume zur Steuerung der eigenen

Lernprozesse erhalten. Dies wird im „Bremer Konzept“ des Wahldifferenzierten Chemieunterrichts angestrebt. Den Schülern wird dazu vielfältiges Lernmaterial in „Gruppenordnern“ angeboten. Die Materialien werden im Rahmen von Schülerexperimenten erforscht, wobei die Gebrauchseigenschaften von Weißblech- und Aluminiumdosen ermittelt werden. In der Auswertungsphase bearbeiten die Lernenden ihre eingangs selbst gewählten Fragestellungen zur Herstellung von Getränkedosen, zum Schutz des Metalls durch Verzinnen und Lackieren und zu den Eigenschaften der Dosen. Die Schlussbetrachtung zeigt, dass die Schüler das selbst gesteuerte zielorientierte Lernen als „lernwirksam“ empfanden. Das eigene aktive Gestalten verstärkte in der Phase der freien Gruppenarbeit auch das Engagement derjenigen Schüler, die sich im normalen Unterrichtsgeschehen wenig beteiligen. Die Lösung von der Fachsystematik bedeutet nach WOEST/MARKS (1998) jedoch nicht eine Aufgabe von chemischen Lerninhalten. Die Erprobung fand an in einer 10. Klasse des Wahlpflichtkurses „Naturwissenschaften“ an einer Bremer Gesamtschule statt [66].

Eine Arbeit, die sich sehr ausführlich mit „Getränkeverpackungen“ beschäftigt, geht auf PIOSIK (1997) zurück. Er stellt den Verlauf eines Projektunterrichtes der Sekundarstufe I zu diesem Thema vor. Zunächst werden Informationen über die Planung dieses Projektes gegeben. Die Schüler wurden in vier Gruppen eingeteilt, jeweils nach dem Thema des Verpackungsmaterials: Metall, Glas, Karton und Kunststoff. Die verschiedenen Packmittel dienen als Ausgangspunkt zur experimentellen Erschließung der Verpackungsmaterialien und ihrer Funktion, auch unter Einbeziehung des Themas „Getränke“, also von „Lebensmitteln“. Nach Ablauf der experimentellen Untersuchungen wurde eine Diskussion zwischen Lernenden und Lehrkräften durchgeführt, in der das Problem des Recyclings und der Umweltbelastung durch Verpackungen angesprochen wurde. Die Gruppenarbeit stieß bei den Lernenden auf großes Interesse, woran die chemischen Experimente einen entscheidenden Anteil hatten [55].

Ganzheitliche Ansätze beinhalten nicht nur Herstellung, Gebrauch und Funktion von Lebensmittelverpackungen, sondern auch die Frage der Entsorgung. Letztere beinhaltet eine Vielzahl ökologischer Themen, die dem verantwortungsvollen Bürger bei seinem Planen und Handeln bewusst sein sollten. Ein umweltbewusstes eigenverantwortliches Verhalten wird als Ausdruck von Selbstständigkeit gesehen. Zu Getränkeverpackungen werden von SCHLEINITZ (1998) und SALING (2007) Ökobilanzen erstellt [67], [68].

### **4.3 Zusammenfassende Bewertung der vorliegenden fachdidaktischen Literatur**

Wie eingangs erwähnt, setzt sich nur eine relativ geringe und damit sehr überschaubare Zahl an fachdidaktischen Publikationen gezielt mit dem Thema „Lebensmittelverpackungen“ auseinander. In der nachfolgenden Tabelle 11 sind in chronologischer Reihenfolge diese Arbeiten aufgeführt unter stichwortartiger Angabe von Inhalt, experimenteller Gestaltung und Hinweis zur pädagogischen Zielsetzung.

Tabelle 11: Fachdidaktische Arbeiten zum Thema „Lebensmittelverpackungen“, Übersicht

<b>Autoren (Jahr)</b>	<b>Stichwort / Thema (Beispiele für Packmittel)</b>	<b>Experimente</b>	<b>Didaktik/Methodik</b>
BARKE (1987) [2]	Ermittlung von Schülerinteressen (Verpackung für Lebensmittel)	Keine Angabe	Alltagsbezug, Schülerinteressen
BADER/SGOFF (1994) [62]	Recycling von Getränkekartons (Polyethylen, Aluminium)	Toluol als Lösungsmittel für Polyethylen	Analyse eines Verbundes, Recycling aller Bestandteile
KLAETSCH/SCHMIDKUNZ (1994) [53]	Lernmöglichkeiten im Chemieunterricht, Verhältnis Experimente/ Theorie (Verpackungen)	Keine Angabe	Schülerbefragung in 9. Klasse, Realschule, Interessenforschung
SCHMIDKUNZ/KLAETSCH (1995) [54]	Chemie im Alltag, Lernmöglichkeiten im Chemieunterricht, (Verpackungen)	Keine Angabe	Schülerbefragung in 9. Klasse, Realschule, Interessenforschung
BADER/ ACS (1996) [65]	Recycling von Getränkeflaschen (PET-Getränkeflasche)	Umesterung, alkalische Hydrolyse, Isolierung von Terephthalsäure, Polykondensation	Kreislauf, experimentelle Ansätze
JUST (1997) [47]	Vorstellung von Konzepten: Element/ Verbindung usw. (Getränkeverpackungen)	Keine Angabe	Alltagsorientierung
PIOSIK (1997) [55]	Projektunterricht Getränkeverpackungen, Funktion der Materialien (Metall, Glas, Karton, Kunststoff)	Auflistung zahlreicher Experimente	Projektunterricht der Sek. I, Selbstständigkeit bei Planung und Auswertung, Einüben von Diskussionen, Motivation durch Experimentieren
WOEST (1997) [57]	Diskrepanz Schülerinteressen / Chemieunterricht (Weichmacher)	Auflistung: Kunststoffe, Weichmacher, Recycling	Alltagsorientierung, Kontextualisierung
SCHLEINITZ (1998) [67]	Funktion von Verpackungen, Ökobilanzen (Frischmilch, Mehrwegflasche, Schlauchbeutel)	Keine Angabe	Alltagsbezug, gesamtheitliches Denken, Ökologie
WANJEK/BARKE (1998) [56]	Substitution von Laborchemikalien durch Substanzen aus Küche und Haushalt	Keine Angabe	Alltagsbezug, Schülerinteressen, Motivationsförderung

<b>Autoren (Jahr)</b>	<b>Stichwort / Thema (Beispiele für Packmittel)</b>	<b>Experimente</b>	<b>Didaktik/Methodik</b>
WOEST/ MARKS (1998) [66]	Alltagsprodukt Getränkedosen (Weißblech, Aluminium, Verzinnen, Lackieren)	Auflistung: Magnettest, Wirkung von sauren und alkalischen Lösungen, Schmelzen	Alltagsorientierung, Projektarbeit, Gruppenarbeit, Selbstlernfähigkeit, 10. Klasse Wahlpflicht Nawi, GS Bremen
STÜBS/ HELDT (1999) [50]	Freisetzung von Zinn-Ionen aus Weißblech (Ananas-Konservendose)	Komplexometrische Bestimmung	Fächerübergreifender Ansatz, Einbeziehung des Vorwissens der Schüler, quantitatives Arbeiten
WAGNER (1999) [63]	Biologisch abbaubare Wertstoffe (Joghurtbecher, Folien, Getränkebecher, Vergleich mit Standardkunststoffen PS, PET und PE)	Hydrolyse von PET, DC des Hydrolysats von PLA, Synthese von PLA, Isolierung von Milchsäure, Kompostierung von PLA	Handlungsorientierung, Alltagsbezug, fächerübergreifender Ansatz, Denken in naturnahen Kreisläufen
HALLSTEIN (2000) [64]	Kunststoffrecycling, Umschmelzen von Plastikmüll (Pfandflaschen aus PET)	Rohstoffliches Recycling (Pyrolyse)	Veranschaulichung und Problematisierung des Rohstoffrecyclings, Diskussion, Übersicht
ALBRECHT et al. (2002) [60]	Chemie der Dosenravioli (Konservendose, Papierbanderole, Weißblech, Zinnschicht, Lack)	Ligninnachweis, Nachweise von Eisen und Zinn, Hinweis auf galvanisches Entzinnen	Projektorientiert, fächerübergreifend, historischer Aspekt
EL MARSIFY/ SCHWARZ (2002) [58]	Elektrochemie (Getränkedose, Blister, Tetra Pak)	Galvanische Zelle Elektrolyse	Mikrochemisches Experimentieren, Substitution von Chemikalien durch Abfälle
GLIMM/ SCHÄFER (2002) [52]	Informationen über Aluminium: Barrierfunktion, Verarbeitbarkeit (Kaffeetüte, Trinkflasche)	Keine Angabe	Plädoyer für Aluminium
HAUPT (2002) [49]	Aluminium in Zeitungsberichten: Vorteilhafte Eigenschaften des Metalls (Getränkedosen, Bratschalen aus Aluminium)	Keine Angabe	Unterrichtsmaterial mit Aufgabenstellungen
PFEIFER/ BRUCHNER (2002) [61]	Aluminium (Joghurtbecherdeckel)	Legierungsbestandteile Joghurtdeckel	Bestandsaufnahme von Experimenten

<b>Autoren (Jahr)</b>	<b>Stichwort / Thema (Beispiele für Packmittel)</b>	<b>Experimente</b>	<b>Didaktik/Methodik</b>
SOMMER/ PFEIFER (2002) [48]	Aluminium als Verpackungsmaterial: Stoff-Struktur-Eigenschaften (Milchverpackung)	Keine Angabe	Alltagsorientiert, fächerübergreifend
CHRISTIANSEN et al. (2003) [51]	Problem der Entsorgung von Plastikmüll (PET-Flaschen, Joghurtbecher aus Polymilchsäure)	Umschmelzen, biologischer Abbau von PLA, Reduktion von Metalloxiden	Alltagsrelevanz, gesamtheitliches Denken
DE VRIES et al. (2006) [59]	Stoffe aus dem Haushalt (Getränkedosen, Kunststoffdeckel von Joghurtbechern)	Auflistung zahlreicher Experimente	Heimexperimente (Sek. II), Projektarbeit, Förderung der Motivation, Substitution
SALING (2007) [68]	Ökoeffizienz-Analyse (Mineralwasser-Verpackungen Glas, PET)	Keine Angabe	Planspiel, Nachdenken über ökologische Fragestellungen

Besondere Beachtung findet in den bereits vorhandenen fachdidaktischen Arbeiten die Frage der Abfallverwertung. Dies gilt für den experimentellen Zugang zu den Materialien und die ökologische Bewertung entstehender Umweltbelastungen gleichermaßen.

Allerdings liegt eine größere Anzahl an Veröffentlichungen über die Technologie und über die Reaktionsmechanismen der Herstellung von Metallen und Kunststoffen vor – im allgemeinen Sinne, also ohne Bezug zu Verpackungen. Nur wenig Erwähnung findet in den Arbeiten die Materialvielfalt der Packstoffe, wenn es um die Zeitspanne des Gebrauchs geht.

Das Konzept des „Alltagsorientierten Chemieunterrichts“ zeigt die deutlichsten Bezüge zu Verpackungsmaterialien. Der „Praxisorientierte Chemieunterricht“ greift ein Beispiel eines Packmittels auf und beruft sich auf die Verknüpfung zwischen Alltagsbezug, Fachwissenschaft und Erkenntnisgewinnung durch Experimente. „Chemie im Kontext“ bietet Anknüpfungspunkte durch sein „Struktur-Eigenschaften“-Konzept, welches bisher zum Bereich „Verpackungen“ kaum angewendet wurde.

Im Überblick lässt sich feststellen, dass völlig unterschiedliche Konzeptionen vorliegen, wobei das Konzept der „Alltagsorientierung“ die meisten kreativen Freiräume für die Lernenden offen lässt. „Praxisorientierter Chemieunterricht“ und „Chemie im Kontext“ erscheinen besser geeignet, sich mit den Erfordernissen des Lehrplanes vereinbaren zu lassen. Insgesamt betrachtet, trägt jede Arbeit ihren Teil zu den Themen „Alltag“, „Schülerinteressen“, „Schülerexperimente“ und „Selbstständigkeit“ bei. Damit weisen die Arbeiten wichtige Wege zur Motivation und damit zur Verbesserung des Chemieunterrichts auf. Außerdem findet man Methoden wie Projektunterricht, Heimexperiment, Mikrochemische Versuche, Gruppenarbeit.

Inhaltlich-stofflich betrachtet, dominieren Metalle und einige Kunststoffe wie PET. Die Diskrepanz zwischen Fachsystematik und Alltagsbezug bleibt in den meisten Arbeiten bestehen. Fragestellungen des Recyclings erfahren eine hohe Beachtung, der Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften wird eher selten erwähnt. Viele Aufsätze, die sich mit Experimenten befassen, geben keine Experimentieranleitung an.

Auch die im nachfolgenden Kapitel vorgestellte Schulbuchliteratur bezieht sich hauptsächlich auf die Abfallproblematik und nur wenig auf die Funktion von Verpackungen. Nicht in allen Schulbüchern finden sich Experimentieranleitungen.

#### 4.4 „Lebensmittelverpackungen“ als Thema in ausgewählten Schulbüchern

Allgemein ist davon auszugehen, dass das Einbeziehen eines Themas in ein Schulbuch den Abschluss einer Diskussion auf fachdidaktischer Grundlage dokumentiert, welche zur Aufnahme dieses Themas in den Lernzielkatalog geführt hat. Somit erscheint es gerechtfertigt, exemplarisch einige Chemielehrbücher dahingehend zu überprüfen, inwiefern sie dem Thema „Lebensmittelverpackungen“ Beachtung schenken.

Für die Sekundarstufe I findet man im Schulbuch Elemente Chemie I, Ausgabe A (Klett Verlag, 1995) Hinweise auf Aluminium als Verpackung für Kaugummi. Dazu wird eine Aufgabe zur Berechnung der Stoffmenge gestellt [69, S. 115]. In einem ersten Hinweis zur Verwendung von Kunststoffen kann man einer Tabelle entnehmen, dass Einkaufstaschen aus Polyethylen und Joghurtbecher aus Polystyrol bestehen [69, S. 344]. Weiterhin werden Kunststoffe für Verpackungen nur noch im Zusammenhang mit dem Müllaufkommen erwähnt („Kunststoffe als Abfall“). So findet man in einem Kreisdiagramm Prozentangaben zum Anteil der Kunststoffe und der Verpackungsverbunde im Hausmüll [69, S. 350]. Ferner wird auf die Verpackungsverordnung und das Duale System verwiesen, verbunden mit dem Appell, zur Müllvermeidung das Mehrwegsystem zu nutzen. Die Recyclingsymbole mit den entsprechenden Nummern sind in einem Informationsfeld aufgelistet. In einer Experimentieranleitung soll in einem Modellversuch zum werkstofflichen Recycling nachgewiesen werden, dass ein Joghurtbecher aus einem thermoplastischen Kunststoff besteht [69, S. 351].

Im Lehrbuch „Chemie heute“ (S I – Gesamtband, Schroedel-Verlag) findet man eine Abbildung zur Verwendung von bunt bedruckten Aluminiumfolien zur Verpackung von Schokoladeprodukten [70, S. 98]. Auch auf die Anwendung und Herstellung von Styropor als Verpackungsmaterial wird eingegangen [70, S. 362]. Unter dem Kapitel „Kunststoffe sind Wertstoffe“ wird die Abfall-Problematik ausführlich behandelt. Man findet hier die Recycling-Nummern und eine kurze Beschreibung des Dualen Systems Deutschland. In einem Fließschema wird die Sortierung und Aufbereitung von Verpackungsabfällen in der sog. „SORTEC 3.0-Anlage“ in Hannover skizziert. Hier werden die gängigen Verpackungsmaterialien genannt: Verbundmaterialien, Papier, Holz, Polyethylen, Weißblech, Getränkekartons, Polyethylenterephthalat, Aluminium, Polyvinylchlorid, Polystyrol. Aufgabenstellungen findet man zum Dualen System Deutschland [70, S. 365].

Das Lehrwerk „Chemie 8/9“ für Hessen, Sekundarstufe I aus dem Cornelsen-Verlag weist lediglich in einer Abbildung auf die Verwendung von Aluminium hin [71, S. 27]. Im Folgeband „Chemie 10“ befindet sich eine Aufgabenstellung zu Aluminium-Getränkedosen im Hinblick auf die Umweltverschmutzung [72, S. 356], die Aufzählung von Anwendungsbereichen für Aluminium als Folien, Kapseln, Tuben, Dosen, Fässer und Verschlüsse [72, S. 357], zu den Kunststoffen einen plakativen Hinweis auf die Umweltbelastung durch anfallenden Verpackungsmüll [72, S. 285], zu „Haushaltsverpackungen“ und „Obst/Gemüse (frisch)“ die Angabe von Einsparpotentialen [72, S. 386] sowie die Nennung der vier Kunststoffarten Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol und Polyvinylchlorid unter allgemeinem Hinweis auf die Spezifität ihrer Eigenschaften vor Hintergrund „Recycling“, wobei auch der Joghurtbecher erwähnt wird [72, S. 386]. In einem kleinen Kapitel „Aus Umwelt und Technik: Kunststoffverpackungen – geht’s nicht auch ohne?“ wird zunächst kurz die Notwendigkeit von Lebensmittelverpackungen aus der Sicht der Schutz-, Transport- sowie Informationsfunktion sowie der lebensmittelrechtlichen Bestimmungen erläutert. Als Möglichkeit einer „umweltfreundlichen Entsorgung“ wird auf „Mehrwegverpackungen“ aus Glas oder Kunststoff verwiesen. Manchen „Einwegverpackungen“ wird ein vorläufiges Existenzrecht zugesprochen, solange sie unverzichtbar erscheinen, wie z.B. die „Gebinde“ für Bonbons, Schokoladenriegel und Kleingebäck, aber auch die Verpackung für Margarine. Die Licht- und Sauerstoffempfindlichkeit dieses Lebensmittels wird ausdrücklich erwähnt, wie auch der „Zeitraum der Mindesthaltbarkeit“ und die Verhinderung des „Qualitätsverlustes“ [72, S.

387]. Unter einem weiteren Kapitel „Aus Umwelt und Technik: Ausgangsstoffe für die Glasherstellung“ wird in der Tabelle „Drei wichtige Glassorten“ darauf verwiesen, dass Getränkeflaschen und Konservengläser aus „Kalknatronglas“ bestehen [72, S. 390].

Für die Sekundarstufe II findet man im Schulbuch „Elemente Chemie II“, Gesamtband, (Ernst Klett Verlag, Stuttgart, 2000) recht detaillierte Hinweise auf Verpackungskunststoffe. Unter dem Kapitel „Kunststoffe im Alltag“ wird aufgezeigt, dass der Bereich Verpackung mit etwas mehr als einem Viertel den größten Anteil der verschiedenen Anwendungsgebiete ausmacht. Die „Massenkunststoffe“ Polyethylen, Polypropylen, Polystyrol und Polyvinylchlorid werden genannt [73, S. 392]. Mit Blick auf Schutzfunktionen und optimale Transportierbarkeit bei möglichst geringem Gewicht wird auf die Folie als effektivste Form der Verpackung verwiesen. Dabei wird die Notwendigkeit erwähnt, dass Folien verschiedener Materialien wegen ihrer jeweils unterschiedlichen Eigenschaftsprofile gegebenenfalls kombiniert werden müssen, um ein erwünschtes Verwendungsspektrum zu gewährleisten. Dazu wird als Herstellungsmethode das „Kaschieren (Verkleben)“ und das „Polymerisieren“ eines anderen Kunststoffes „auf vorhandene Folien“ genannt. Als Anwendungsbeispiel einer derartigen „Verbundfolie“ wird der „Getränkekarton“ mit seinen Bestandteilen aufgeführt und in einer übersichtlichen Grafik mit seinen Schichten dargestellt. Als Anwendungsbereich wird dazu die Verpackung von Fruchtsäften, Milch, Wasser oder Wein genannt. Außerdem wird die Migration fettlöslicher Weichmacher aus Weich-PVC-Folien in das verpackte Lebensmittel problematisiert. Auf der gleichen Seite finden sich drei Aufgabenstellungen zu Flaschenverschlüssen aus Weißblech (Kronkorken) mit ihrer Dichtungseinlage, zu Eigenschaften und Herstellung von PVC-Folien in Durchdruckverpackungen sowie zur Gewichtseinsparung und Funktionsvielfalt von Kunststoffen in Packmitteln [73, S. 393]. Schließlich wird unter dem Kapitel „Verwertung von Kunststoffabfall“ wiederum der Anteil der Verpackungen angegeben. In einer Experimentiervorschrift sollen die Kunststoffe Polypropylen und Polystyrol, welche zur Verpackung von Joghurt oder Quark dienen, auf ihre thermische Belastbarkeit hin überprüft werden. Eine nachfolgende Aufgabe bezieht sich auf eine Trennungsmöglichkeit dieser beiden Kunststoffe, welche auf einer unterschiedlichen Formstabilität beim Erwärmen beruht [73, S. 398]. Letztlich werden in diesem Kapitel abbaubare thermoplastische Kunststoffe auf Cellulose- bzw. Kohlenhydratbasis als Verpackungsmaterialien erwähnt [73, S. 399].

Im Lehrbuch „Chemie heute“ (Sekundarbereich II, Schroedel, Hannover 1998) findet man in dem Exkurs „Wertvolles Aluminium“ wird auf den Einsatz als Verpackungsmaterial hingewiesen. Als Packmittel werden Tuben, Flaschenverschlüsse, Deckel für Joghurtbecher, Getränkedosen und Fruchtsaftbehälter erwähnt [74, S. 174]. In dem Exkurs „Alu-Dosen: ex und hopp?“ wird der Anteil der Aluminiumdosen am gesamten Dosenverbrauch in Deutschland angegeben. In diesem Rahmen wird auf den drastischen Unterschied im Energieaufwand zwischen Primär- und Sekundär-Aluminium hingewiesen [74, S. 174]. Als Verpackungsmaterial wird geschäumtes Polystyrol erwähnt [74, S. 307]. Innerhalb einer Pressenotiz „Weichmacher in Verpackungsfolien“ (Hannover, Sept. 1992) wird ein Untersuchungsergebnis der „Stiftung Warentest“ zur Migration von Weichmachern aus Weich-PVC-Folien in Käse aufgeführt. Als weichmacherfreie Alternativen werden die Verpackungsmaterialien Polyethylen und Polypropylen erwähnt [74, S. 309]. Schließlich findet man noch Experimentiervorschriften, bei denen Joghurtbecher, und andere Plastikverpackungen zum Einsatz kommen. Untersucht werden hier Bruchfestigkeit, Dichte, Brennbarkeit, Schmelzbereich und Verhalten in Aceton [74, S. 312]. Im Rahmen eines „Exkurses“ findet man unter der Überschrift „Der Grüne Punkt – eine runde Sache?“ eine kurze Information über die Verpackungsverordnung. In einer Tabelle werden übersichtlich die verschiedenen Packstoffe aufgeführt mit genauen Angaben über den Verpackungsverbrauch sowie über die jeweiligen Erfassungs- und Verwertungsquoten [74, S. 401].

Das Lehrwerk „Chemie im Kontext - Sekundarstufe II“ (Cornelsen Verlag, Berlin, 2006) weist bereits im Inhaltsverzeichnis das Stichwort „Verpackung“ auf. Unter dem Kapitel „Kunststoffe unter der Lupe“ werden zunächst in einem Bild Verpackungen aus Polyethylenterephthalat dargestellt, worauf im umgebenden Text jedoch nicht ausdrücklich eingegangen wird. Das Knistern einer Müsliverpackung wird in seiner angestrebten Funktionalität erläutert, nämlich „um die Knusprigkeit des Inhalts zu signalisieren“. Für diesen Verpackungszweck wird eine steifere Folie gewählt, welche aber leicht einreißt. Außerdem findet man eine Liste von zehn gängigen Kunststoffen mit ihren Abkürzungen, von denen sieben in Lebensmittelverpackungen vorkommen. Im umgebenden Text wird als Grund für die Vielfalt der Kunststoff-Eigenschaften die Unterschiedlichkeit der chemischen Strukturen ihrer Moleküle genannt [75, S. 100]. Es wird in einem Informationsfeld auch auf die Herstellungsverfahren von thermoplastischen Kunststoffen eingegangen. Man erfährt, dass Verpackungsfolien durch Folienblasen hergestellt werden, Jogurtbecher hingegen durch Formpressen oder Tiefziehen. In einer der Aufgabenstellungen wird eine Erklärung für das Verhalten von Polystyrol beim Erwärmen erwartet [75, S. 101]. Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich mit der Abfallproblematik. Im Kapitel „Vom Nutzen zur Sorge“ wird erwähnt, dass Lebensmittelverpackungen einen beträchtlichen Teil des anfallenden Mülls ausmachen, wobei die pro Jahr anfallende Masse an Verpackungsabfällen mit 82 kg pro Kopf angegeben wird. Zur Reduzierung des Müllaufkommens wird auf Mehrwegpfandsysteme und effektive Kreislaufprozesse bei Einwegpfandsystemen verwiesen [75, S. 116]. In einer Informationstabelle wird anfallender Müll aus Verpackungsmaterial nach abnehmender Masse aufgelistet: Papier, Glas, Kunststoff, Weißblech, Getränkekarton, Aluminium. Dazu wird jeweils die Verwertungsquote genannt. Ein Foto zeigt eindrucksvoll, welche neu hergestellten Produkte aus einem Getränkekarton entstehen können, wobei darauf im umgebenden Text kein Bezug genommen wird. In einem Informationsfeld werden sechs recycelfähige Kunststoffe in englischer Bezeichnung mit Abkürzung genannt. Die Aufgaben in diesem Kapitel beschäftigen sich mit dem ökologischen Nutzen von Mehrwegpfandsystemen sowie mit verschiedenen Kunststoffsorten und den Additiven in ihnen [75, S. 117]. Im Kapitel „Ein Haufen Plastik – was nun?“ wird auf die Vielfalt der unterschiedlichen Verpackungskunststoffe hingewiesen, die außerdem meist nicht sortenrein vorliegen. Als Trennmethode der verschiedenen Komponenten werden Sieben, Windsichten, Magnet und Nahinfrarotspektroskopie kurz erläutert [75, S. 118]. Es wird ferner das Sortierverfahren „Sortec 3.1“ skizziert, mit dem bisher aus dem Kunststoffstrom PET und Getränkekartons abgetrennt wurden. Eine Aufgabenstellung bezieht sich auf die Auswertung des Nahinfrarotspektrums von Polyethylenterephthalat [75, S. 119]. Schließlich wird in einem Informationsfeld darauf hingewiesen, dass Kunststoffabfall und Heizöl etwa den gleichen Energieinhalt pro kg haben, wobei innerhalb der Kunststoffe wiederum Polyvinylchlorid nur einen etwa halb so hohen Heizwert hat wie z. B. Polypropylen [75, S. 121]. Das Buch weist übergeordnete Kapitel auf, welche sich nicht nur streng mit einer Stoffklasse beschäftigen, sondern auch andere Substanzklassen zulassen – auch im Zusammenhang mit anderen Themen. So gibt es neben den technisch-wirtschaftlich ausgerichteten Kapiteln „Steinzeit – Eisenzeit – Plastikzeit“ und „Müll wird wertvoll“ auch noch Kapitel zu „Basiskonzepten“, wie z.B. dem „Struktur-Eigenschaften-Konzept“. Zu diesem Bereich zählt auch das Kapitel „Struktur und Eigenschaften von makromolekularen Stoffen“ mit den Stoffklassen Polysaccharide, Kunststoffe, Glas [75].

Eine sehr eingehende Beschäftigung speziell mit dem Thema bietet das Heft „Projekt Naturwissenschaften – Verpackung“ mit 32 Seiten aus dem Klett Verlag. Hier werden fast alle Aspekte zu den Lebensmittelverpackungen aufgeführt. Es eignet sich für den Projektunterricht [76].

Auch das Heft „Arbeitsblätter Chemie im Alltag“ aus dem Klett Verlag bietet Ansätze zum Thema. Es werden z.B. Kapitel mit Experimenten angeboten, wie „Herstellung einer essbaren Folie aus Stärke“ oder „Glas – ein altbewährter Werkstoff“. Diese Themenbereiche

erscheinen für den Projektunterricht geeignet, obwohl sie eng begrenzt sind und damit Überschneidungen der Themen fehlen. Es ist aber vorstellbar, mehrere Themen zu kombinieren oder zu erweitern [77].

Zusammenfassend zeigt sich, dass auch in den ausgewählten Schulbüchern der thematische Schwerpunkt auf der Herstellung der Packstoffe einerseits und der ökologischen Bewertung der Verpackungsabfälle andererseits liegt, wobei die experimentellen Ansätze sich teils auf Nachweisreaktionen, teils auf das Recycling von Kunststoffen beschränken.

## 5 Konsequenzen für die eigene Arbeit

In dieser Arbeit wurde bisher gezeigt, dass das Thema „Lebensmittelverpackungen“ im Sinne der „didaktischen Analyse“ nach KLAFKI umfassend für den Unterricht geeignet und sinnvoll ist. Ferner zeigt eine Bestandsaufnahme der fachdidaktischen Literatur aus dem Zeitraum von 1987 bis 2007, dass die Schwerpunkte dieses Themas meist sehr deutlich auf dem Bereich der ökologischen Bewertung und auf der Frage nach den Möglichkeiten des Recyclings lagen. Dies gilt auch für einige ausgewählte Schulbücher.

Was jedoch bisher fehlte, war eine umfassende Zusammenstellung der Zugangsmöglichkeiten für die experimentelle Schulchemie zu diesem Thema, und zwar unter analytischen sowie funktionellen Gesichtspunkten der Packstoffe für Lebensmittel. Auch wurde die Frage bisher nicht beantwortet, welche Erkenntnisse über Sachverhalte und Gesetzmäßigkeiten der Chemie sich über Experimente mit Lebensmittelverpackungen erschließen lassen.

Zunächst war es nahe liegend, eine möglichst große Zahl an Lebensmittelverpackungen experimentell zu überprüfen. Diese Experimente wurden mit dem Ziel durchgeführt, das Verpackungsmaterial zu analysieren und seine Funktionen nachzuvollziehen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit war es erforderlich, die erstellten Experimentiervorschriften sowohl nach stofflichen als auch nach funktionellen Gesichtspunkten zu ordnen. Die eigene Entwicklung sowie die Überprüfung und Revision bereits bestehender derartiger Experimentiervorschriften hatten jeweils mit Blick auf die Einsetzbarkeit im Unterricht zu geschehen. Die Durchführbarkeit der Experimente sowie ein geringer Zeitaufwand waren zu beachten. Außerdem war der Einsatz einiger Chemikalien aus gesundheitlichen Gründen zu überprüfen und gegebenenfalls neu zu bewerten. Ferner war der Lehrplanbezug der Experimente zu berücksichtigen. Unter dem Gesichtspunkt der Analyse und der Begründung für den Einsatz bestimmter Stoffe als Verpackungsmaterial erschien es sinnvoll, die verschiedenen Substanzklassen nach dem Struktur-Eigenschaften-Konzept sorgfältig miteinander zu vergleichen. Zur Implementierung des Themas im Chemieunterricht war es notwendig, Stundenentwürfe mit unterschiedlichen Unterrichtsverfahren zu verschiedenen Themen zu erstellen. Verschiedene Operationalisierungsmöglichkeiten waren zu entwickeln, auch die Formulierung von Themen für Referate sowie die Aufgabenstellungen für schriftliche Lernkontrollen.

Im folgenden Kapitel wird unter besonderer Berücksichtigung des Kontextbezuges übersichtlich dargestellt, aus welchen Materialien ausgewählte Lebensmittelverpackungen bestehen und welcher experimentelle Zugang zu diesen Materialien jeweils erarbeitet wurde.

## 6 Übersicht zu experimentell erschließbaren Teilen von Lebensmittelverpackungen und ihren Funktionen

Nach Sichtung bereits vorhandener methodisch-didaktischer Literatur zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ sollte in einer breit angelegten Untersuchung die experimentelle Zugänglichkeit von Packstoffen für Lebensmittel zu ermittelt werden. Hierbei sollte auch auf bereits vorliegende Arbeiten zurückgegriffen und diese revidiert und optimiert werden. Teile der Ergebnisse wurden publiziert [25], [28], [33], [78].<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Die Untersuchung einer Verbundfolie aus Polyamid und Polyethylen [25]  
Die Ermittlung der Dicke von Aluminiumschichten [28]  
Die Erfassung der Durchlässigkeit für Kohlenstoffdioxid bei PET-Flaschen [33]  
Die quantitative Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien [78]

Einführend wird in einer Übersicht (6.1 - 6.9) die experimentelle Zugänglichkeit unterschiedlicher Verpackungen für Lebensmittel knapp dargestellt.

## 6.1 Verpackungen für Milch und Joghurt

Als Milchverpackungen dienen Getränkekartons, Glasflaschen sowie Polycarbonat-Flaschen. Hierzu können die folgenden Schülerexperimente durchgeführt werden:

- Der Getränkekarton lässt sich mit sehr geringen Mengen an Toluol als selektivem Lösungsmittel für Polyethylen in Karton und Aluminiumfolie zerlegen, wobei eine Rückgewinnung von Polyethylen möglich ist.
- Aus dem Karton lassen sich nach saurer Hydrolyse der Cellulose Zucker nachweisen.
- Der qualitative Nachweis der Aluminiumschicht gelingt über eine Tüpfelprobe mit Alizarin S.
- Nach der Reaktion der Aluminiumfolie mit Salzsäure wird die Stoffmenge der entstandenen Aluminium-Ionen titrimetrisch bestimmt. Daraus lässt sich die Schichtdicke der eingesetzten Aluminiumfolie ermitteln.
- Eine halbquantitative Bestimmung der Aluminium-Schichtdicke ist auch auf volumetrischem Wege möglich.

Eine Übersicht über die Bestandteile eines Getränkekartons für haltbare Milch bietet Abb. 21.

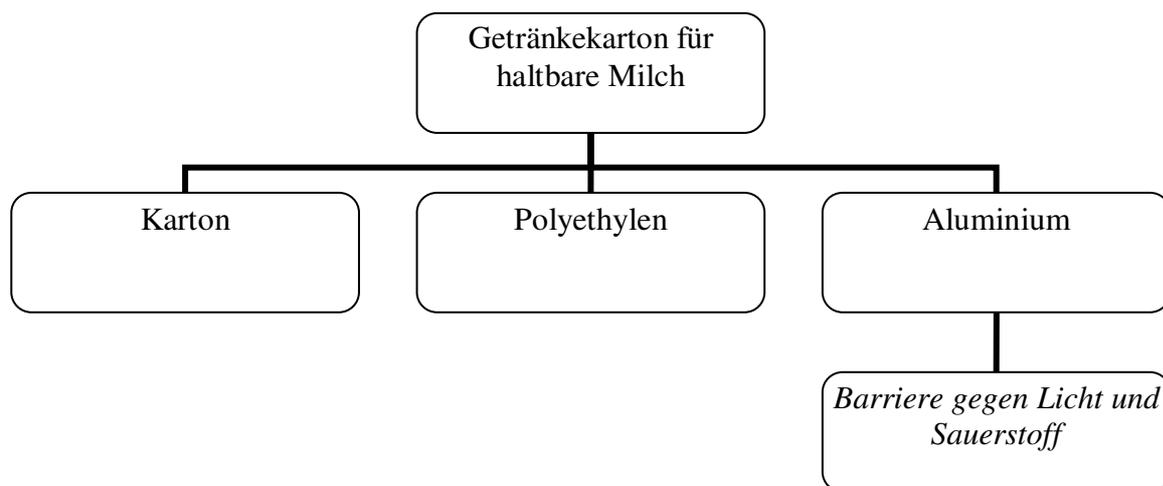


Abbildung 21: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen und Funktionen eines Getränkekartons

Auch Polycarbonat-Flaschen eignen sich als Gegenstand experimentellen Arbeitens:

- Der Nachweis von Polycarbonat gelingt mit Dimethylaminobenzaldehyd als Tüpfelprobe, wobei das giftige Methanol durch Ethanol als Lösungsmittel ersetzbar ist.
- Nach erfolgter alkalischer Hydrolyse lässt sich Bisphenol A nachweisen.

Die Untersuchung von Gläsern für Joghurt und Milch eröffnet experimentelle Zugänge auch zu den Weißblech-Nockenverschlüssen, die als Vakuumverschlüsse fungieren (Abb. 22).

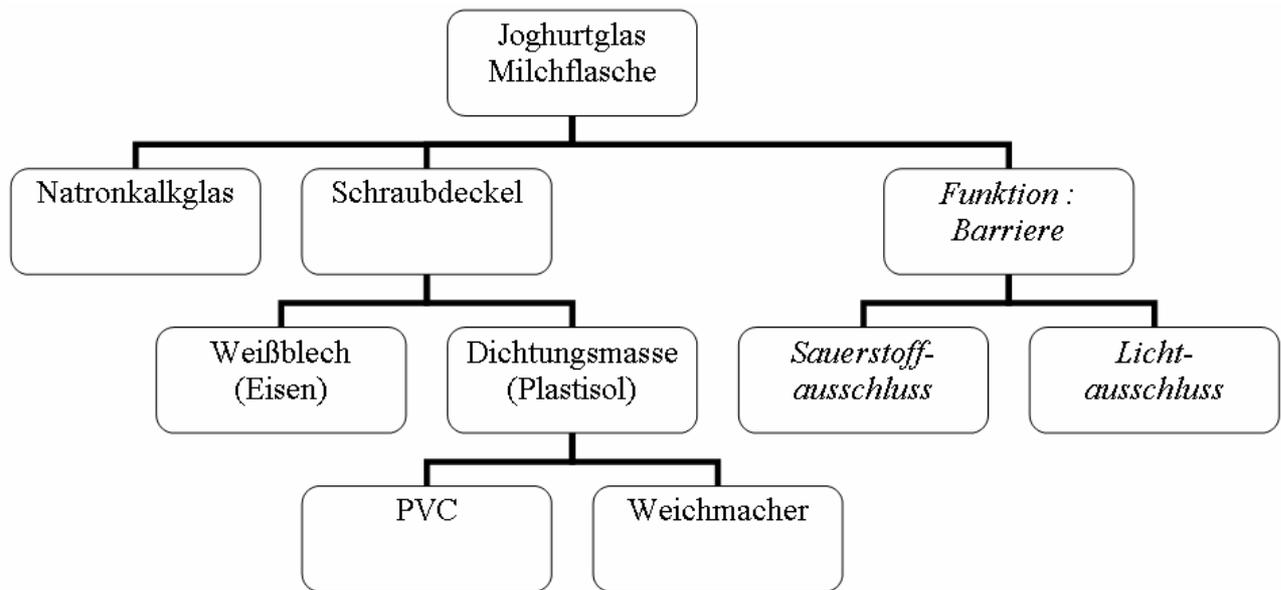


Abbildung 22: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen und Funktionen eines Milch- bzw. Joghurtglases

Zu den Glasbehältern und ihren weiteren Bestandteilen lassen sich folgende Experimente durchführen:

- Pulverisiertes Natriumkalkglas kann in wässriger Suspension durch seine alkalische Reaktion und durch Nachweis der elektrischen Leitfähigkeit von Borosilikatglas unterschieden werden.
- Auch die Schmelze von Glaspulver im AST-Element im Mikrowellenofen kann als Glasnachweis herangezogen werden.
- Die Funktion der Lichtbarriere bei Braunglas lässt sich deutlich dem gut lichtdurchlässigen Weißglas gegenüberstellen.
- Aus dem Weißblechdeckel werden Eisen-Ionen nach Zersetzung des Metalls in 18%-iger Salzsäure mit rotem Blutlaugensalz bzw. mit Thiocyanat-Lösung nachgewiesen.
- Bei der Untersuchung der Dichtungsmasse (Plastisol) erfolgt der Nachweis von PVC durch Beilstein-Probe und nach dem Schöniger-Verfahren.
- Isolierung und Nachweis des Weichmachers ergeben, dass in dieser Lebensmittelverpackung Phthalate eingesetzt werden.
- Die Dichtigkeit gegen Sauerstoff lässt sich mit Hilfe von reduziertem Methylenblau in einem mit Stickstoff oder Kohlenstoffdioxid gefüllten Joghurtglas nachweisen.

Zur Verpackung von Joghurt werden auch Kunststoffbecher aus Polypropylen oder Polystyrol verwendet. Manche Polystyrol-Becher sind zur Stabilisierung mit einem Karton umhüllt. Die folgende Abb. 23 zeigt die Vielfalt der Stoffe, die sich in diesem alltäglichen Packmittel befinden und nachgewiesen werden können.

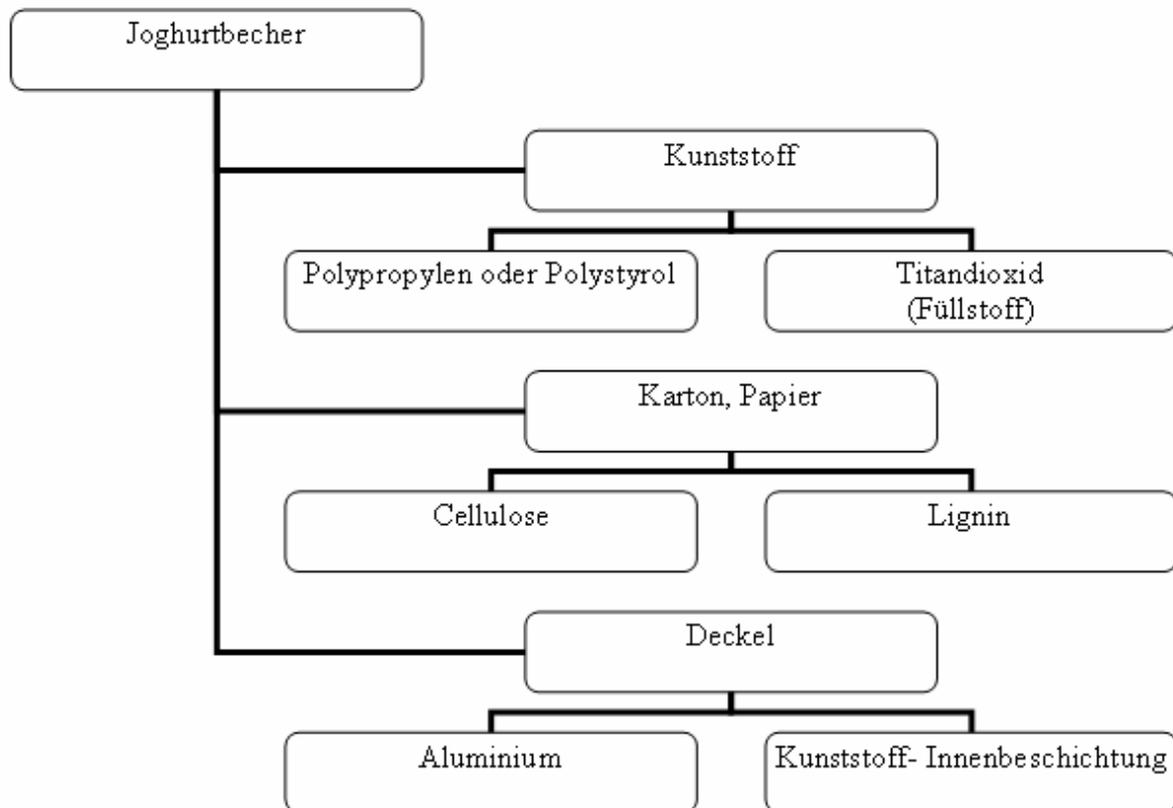


Abbildung 23: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen eines Joghurtbechers

Zu den in Abb. 23 dargestellten Materialien bieten sich folgende experimentelle Zugänge an:

- Die beiden Kunststoffe lassen sich anhand ihrer Dichte, ihrer Stabilität gegenüber Aceton, ihrer Hitzebeständigkeit sowie ihres Brennverhaltens eindeutig voneinander unterscheiden.
- Als weißes Pigment kann Titandioxid nachgewiesen werden.
- Der als stabilisierende Umhüllung verwendete Karton kann durch eine Tüpfel-Probe mit Molisch-Reagenz chemisch erschlossen werden.
- Im Deckel lässt sich mit Alizarin S in einer Tüpfelprobe Aluminium nachweisen.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit:

Zur Zerlegung des Getränkekartons (Abb. 21) lag bereits eine Experimentiervorschrift vor, welche optimiert werden sollte. Das Volumen des eingesetzten Lösungsmittels Toluol wurde deutlich verringert (V 2.7). Für die saure Hydrolyse des Kartonanteils wurde eine bestehende Vorschrift abgeändert, einhergehend mit einer Verringerung des Zeitbedarfs (V 2.8.2). Der Cellulosenachweis mit Molisch Reagenz wurde auf das Ausmaß der Tüpfelprobe reduziert (V 2.8.1).

Die exakte Ermittlung der Stoffmenge an Aluminium-Ionen wurde mit Hilfe der Rücktitration möglich, nachdem ein aluminiumhaltiges Folienstück bekannter Fläche mit Salzsäure reagiert hatte. Daraus ließ sich die Masse des Aluminiums errechnen, woraus sich die Dicke der Aluminiumfolie ableiten ließ. Die Entwicklung dieses Experimentes beruhte ausschließlich auf eigener Arbeit (V 1.3.3).

Auch die Entwicklung der Versuchsvorschrift zur Aluminium-Quantifizierung mit Hilfe der volumetrischen Bestimmung ist auf eigene Arbeit zurückzuführen. Jedoch musste bei dieser

im Prinzip bekannten Reaktion festgestellt werden, dass die quantitative Umsetzung der Aluminiumschicht mit Salzsäure und damit die Entstehung des entsprechenden Wasserstoff-Volumens mehrere Stunden in Anspruch nahm. Außerdem zeigte sich, dass dieses Verfahren nur für dickere Aluminiumschichten angewendet werden konnte, also auf keinen Fall für aufgedampfte Aluminiumschichten. Deshalb wurde dieses Verfahren als „halbquantitativ“ eingestuft (V 1.3.2).

Die Entwicklung der Experimente mit Natronkalkglas aus Joghurtgläsern und Milchflaschen (Abb. 22) beruhte auf der Modifizierung bestehender Experimentiervorschriften. Bei der Glasgrießsuspension konnten damit elektrische Leitfähigkeit sowie alkalische Reaktion nachgewiesen werden (V 3.2.1, V 3.2.2). Die Experimente zu unterschiedlichen Lichtdurchlässigkeiten von Weißglas und Braunglas wurden ebenfalls auf der Basis bekannter Experimentiervorschriften entwickelt (V 4.5).

Auf vollständig eigenen Arbeiten hingegen beruhte die Entwicklung eines Experiments, mit welchem der Sauerstoffausschluss eines dicht verschließbaren Joghurtglases nachgewiesen werden konnte (V 4.1.1).

Zur Unterscheidung der beiden in Frage kommenden Kunststoffes eines Joghurtbechers (Abb. 23) konnte auf bekannte Experimente zurückgegriffen werden (V 2.2, V 2.3, V 2.6), auch für den Nachweis von Titandioxid (V 2.13). Für den Nachweis von Kartonbestandteilen wurden Tüpfelproben auf der Basis bekannter Reaktionen entwickelt, wie sie auch für Getränkekartons anwendbar sind (V 2.7.1, V 2.8.1).

## 6.2 Getränkedosen

Getränkedosen sind zweiteilige Dosen, deren Deckel stets aus Aluminium besteht. Der tiefgezogene Becher hingegen kann wahlweise aus Aluminium oder Weißblech hergestellt sein und ist außen mit einem Polyester- oder Acrylat-Lack beschichtet. Die Innenbeschichtung besteht stets aus Epoxidharz (Abb. 24).

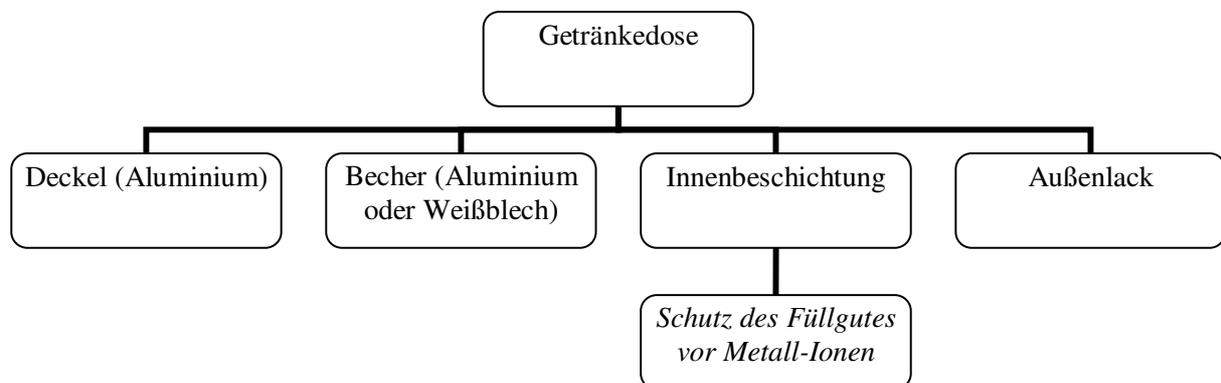


Abbildung 24: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen von Getränkedosen

Die Bestandteile von Getränkedosen lassen sich experimentell folgendermaßen erschließen:

- Die Innenbeschichtung lässt sich vollständig erhalten, wenn man das Metall mit Salzsäure reagieren lässt.
- Aus dem Epoxidharz der Innenbeschichtung kann Bisphenol A nachgewiesen werden.
- Hinweise zur Identifizierung des Außenlacks erhält man nur durch den positiven Verlauf der Formaldehyd-Probe, den Polyurethannachweis mit Nitrobenzoldiazoniumfluorborat sowie den Nachweis einer Dichte von mindestens  $1,6 \text{ g/cm}^3$ . Vieles spricht dafür, dass es sich bei diesem Duroplasten um Polyurethan handelt. Das vom Außenlack erstellte FTIR-Spektrum ist identisch mit dem Lack eines Kronenkorkens (z. B. Gerolsteiner).

- Die Metalle lassen sich nicht nur in Salzsäure, sondern auch durch anodische Oxidation auflösen. Mit Hilfe der Spannungsreihe lassen sich die Vorgänge bei der Elektrolyse erklären, wobei Dosenbleche beiderlei Materials wechselweise als Elektroden eingesetzt werden können.
- Aluminium-Ionen können mit Alizarin S nachgewiesen werden, Eisen(II)-Ionen hingegen mit Rotem Blutlaugensalz.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit:

Trennung und Nachweis der Materialschichten von Getränkedosen (Abb. 24) begannen mit der bekannten Zersetzung durch Salzsäure. Die übrig gebliebenen beiden Kunststoffschichten wurden mehreren Nachweisverfahren unterzogen, wobei der Nachweis von Epoxidharz eindeutig gelang (V 2.9).

Die Zersetzung des Metalls gelang auch durch anodische Oxidation. Bestehende experimentelle Vorschriften wurden zu Projektionsversuchen weiterentwickelt. Dabei konnten die an der Anode entstehenden Metall-Ionen mit wenigen Tropfen der Reagenz-Lösung nachgewiesen werden (V 1.4.1, V 1.4.3, V 1.6).

Aus dem Aluminiumdeckel gelang außerdem die Herstellung von Thénards Blau (V 1.2.2).

### 6.3 Konservendosen

Hier werden die Stoffe Eisen, Zinn, Epoxidharz und Papier erschlossen. Die stets am Füllgut liegende Zinn-Schicht hat ein positiveres Redoxpotential als Eisen und dient somit als Schutz. Die Entstehung von Zinn-Ionen und deren Diffusion in das Füllgut können nur stattfinden, wenn durch das Öffnen der Dose Sauerstoff eindringt. Zur Innenbeschichtung wird meist Epoxidharz verwendet. Das folgende Schema zeigt experimentell erschließbare Bestandteile der Konservendose (Abb. 25).

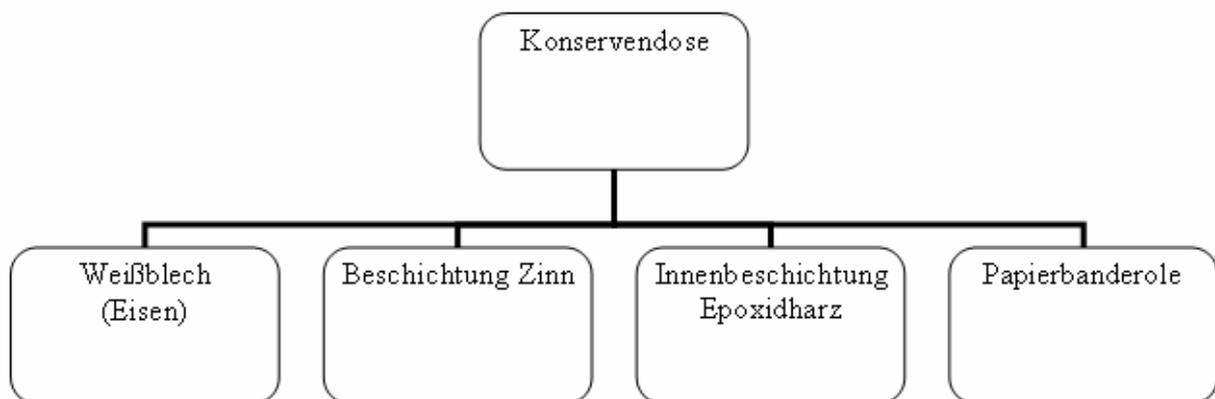


Abbildung 25: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen von Konservendosen

Die Materialien lassen sich folgendermaßen nachweisen:

- Nach Oxidation können zweiwertige Eisen- und Zinn-Ionen bei verschiedenen pH-Werten als Sulfide ausgefällt werden.
- Der Nachweis von Zinn erfolgt im Rahmen einer elektrolytischen Raffination, durch Leuchtprobe oder als Molybdänblau.
- Zum Nachweis von Eisen(II)-Ionen wird Rotes Blutlaugensalz verwendet.
- Nach erfolgter elektrolytischer Abscheidung kann die schützende Wirkung von Zinn gegenüber Eisen sichtbar gemacht werden.

- Der Anteil an Zinn in einer Konservendose lässt sich mit einem titrimetrischen Verfahren ermitteln.
- Die Papierbanderole kann mit Phloroglucin-Salzsäure auf Holzanteile überprüft werden. Zum Cellulose-Nachweis dient Molisch Reagenz.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit:

Es gelang, Zinn aus einer Weißblechdose (Abb. 25) elektrolytisch abzuscheiden. Dieses Experiment wurde im Rahmen eigener Arbeiten entwickelt. Eine entsprechende Experimentieranleitung wurde dazu verfasst (V 1.7.1). Bei einem dabei mit Zinn überzogenen Eisennagel konnte in einem der bekannten Lokalelement-Versuche die Schutzwirkung der abgeschiedenen Metallschicht demonstriert werden (V 1.7.1).

Beginnend mit der Reaktion des Weißblechs mit Säure wurde im Rahmen eigener Arbeiten eine Experimentiervorschrift entwickelt, wonach die Eisen- und Zinn-Ionen durch Sulfid-Fällung bei unterschiedlichen pH-Werten getrennt wurden (V 1.7.3).

#### **6.4 Aluminiumhaltige Verbunde**

Als Beispiel für derartige Verbunde wurde bereits der Getränkekarton für haltbare Milch erwähnt (Abb. 26). Auch Verpackungen für Kartoffelchips z.B. zeigen einen Aufbau aus mindestens einer Kunststoff-Folie und einer sehr dünnen aufgedampften Aluminiumschicht. Nach außen ist die Aluminiumschicht entweder durch eine Folie oder durch eine Lackschicht abgedeckt. Wickler mit Aluminiumfolie hingegen (z.B. Butterwickler) zeigen meist folgenden Aufbau: Lack, Aluminiumfolie, Kaschierwachs bzw. Kleber und Papier. Kaugummifolie trägt keine Lackschicht. Nachfolgend ist eine Auswahl an aluminiumhaltigen Verbunden mit ihren Bestandteilen und Funktionen dargestellt (Abb. 26).

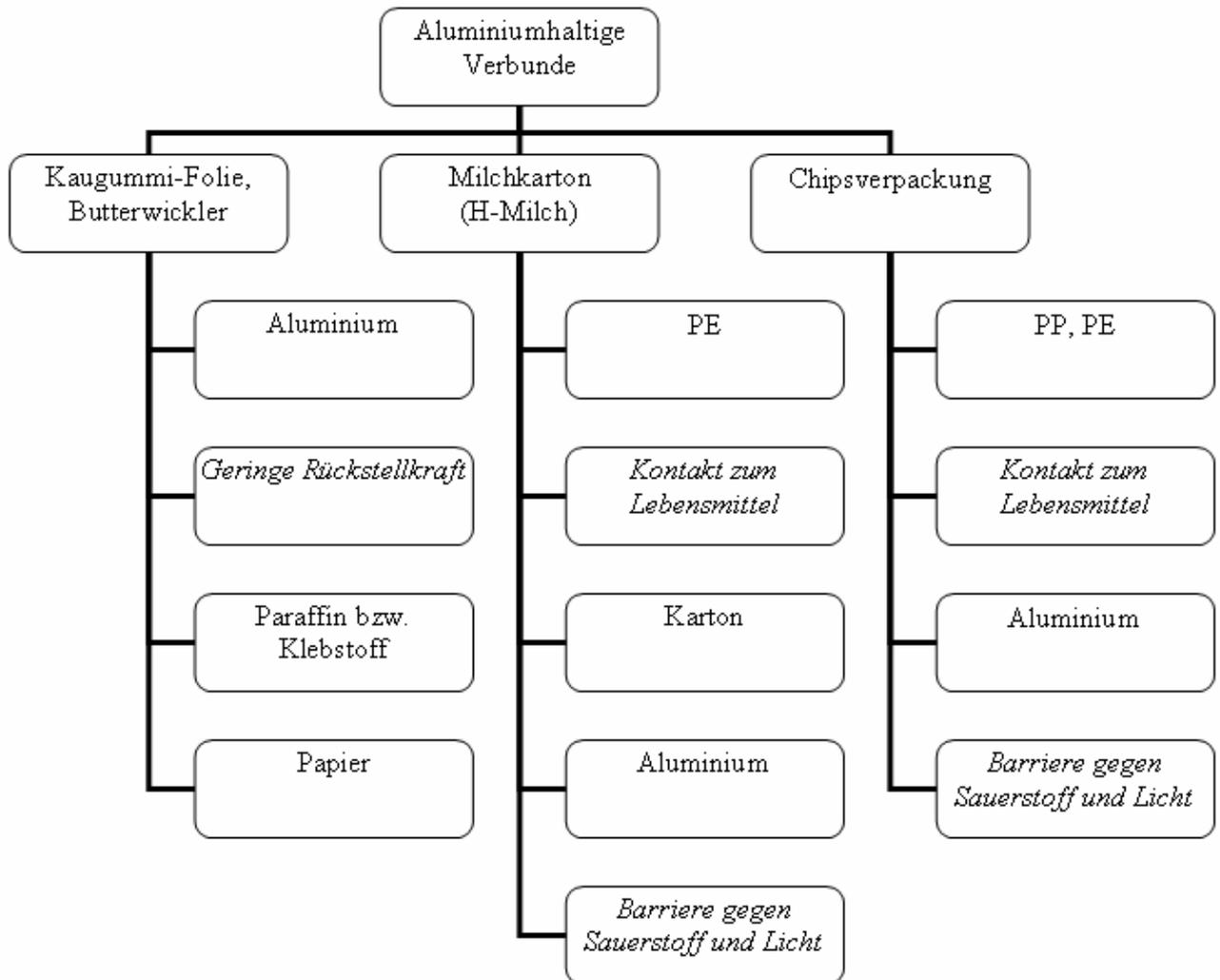


Abbildung 26: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen von aluminiumhaltigen Verbunden und deren Funktionen

Folgende experimentellen Ansätze sind dazu in dieser Arbeit realisiert:

- Bei aluminiumhaltigen Wicklern lässt sich nach Entfernen des Lacks der Aluminiumnachweis mit Alizarin S als Tüpfelprobe qualitativ durchführen.
- Nach der Reaktion des Aluminiums mit verdünnter Salzsäure sind die Aluminium-Ionen für ein quantitatives titrimetrisches Verfahren zugänglich, über das die Schichtdicke des Metalls ermittelt werden kann.
- Die auf der Seite des Lebensmittels liegende Papierschicht lässt sich mit Molisch-Reagenz als Tüpfelprobe nachweisen.
- Die nach der Zersetzung des Aluminiums verbliebenen Kunststoff-Schichten lassen sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Löslichkeiten in Toluol sowie mit Hilfe der FTIR-Spektroskopie identifizieren.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit: Zum qualitativen Nachweis von Aluminium in Verbundfolien (Abb. 26) konnte Alizarin S eingesetzt werden, wie auch bei Aluminiumdeckeln von Joghurtbechern und Aluminium in Getränkedosen (V 1.2.1).

Die quantitative Erfassung des Aluminiums hingegen wurde stets durch die Zersetzung des Metalls mit Salzsäure eingeleitet. Es zeigte sich, dass bei allen Verbunden das selbst entwickelte titrimetrische Verfahren eingesetzt werden konnte, aus dessen Ergebnis sich die Aluminium-Schichtdicke ermitteln ließ (V 1.3.3). Die quantitative Erfassung von Aluminium gelang mit diesem Verfahren auch bei sehr dünnen Aluminiumschichten wie z.B. bei Chipstüten. Die direkte Messung einer Aluminium-Schichtdicke mit einer Mikrometerschraube wäre innerhalb eines Verbundes ohnehin nicht möglich gewesen. Die Kunststoffschichten der Chipsverpackungen konnten erst nach dem Entfernen der Aluminiumschicht identifiziert werden.

Die Barrierewirkung von Aluminiumschichten konnte nachgewiesen werden für Sauerstoff (V 4.1.2) sowie für Wasserdampf (V 4.3). Beide Versuchsreihen gehen vollständig aus eigenen Arbeiten hervor.

Nachgewiesen wurde außerdem die Barrierewirkung gegen Licht (V 4.5).

## **6.5 PVC**

Auch heute noch wird PVC für Lebensmittelverpackungen eingesetzt. Mit Weichmacher wird es einerseits für Folien verwendet, die direkten Kontakt zum Füllgut haben, wie Frischfleisch oder Pilze. Andererseits wird PVC als Dichtungsmasse verwendet und dafür als Plastisol in Metallschraubdeckel eingespritzt. Man findet derartige Schraubdeckel auf Joghurtgläsern und Milchflaschen (Weißblech) sowie auf Glasflaschen für Mineralwasser (Aluminium). Die weich-elastischen Eigenschaften der Dichtungsmasse werden durch Zugabe von Phthalsäureestern als Weichmacher erzielt. Hart-PVC findet man z.B. in Blisterverpackungen für Kaugummis. Nachfolgend ist eine Auswahl PVC-haltiger Packmittel aufgeführt (Abb. 27), deren Inhaltsstoffe und Eigenschaften experimentell zugänglich sind.

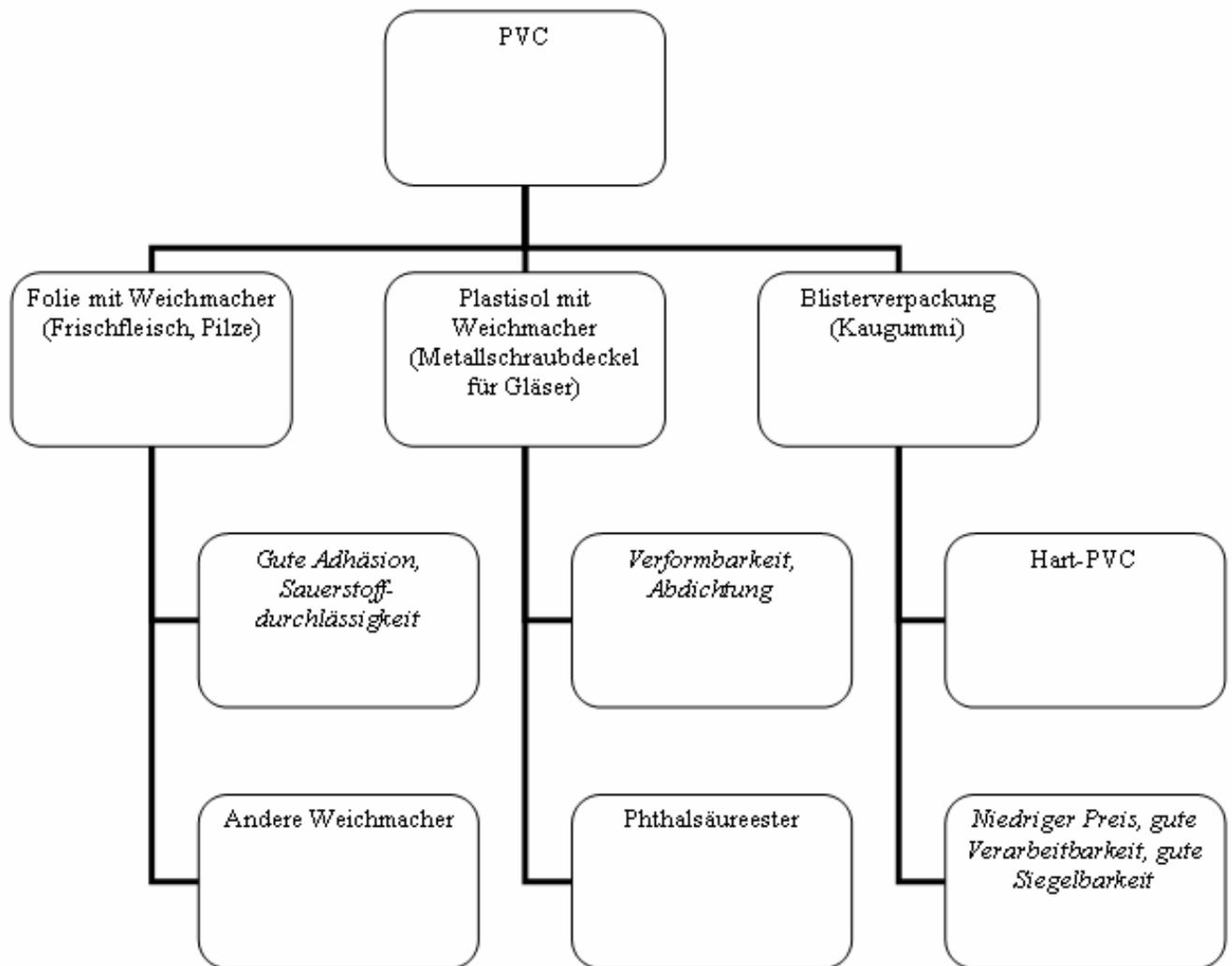


Abbildung 27: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen von PVC-haltigen Packmitteln und deren Funktionen

Folgende Nachweisreaktionen werden in dieser Arbeit angewendet:

- PVC kann durch die Beilsteinprobe sowie durch die saure Reaktion der Pyrolysegase nachgewiesen werden.
- Durch Herauslösen des Weichmachers aus der Folie oder der Dichtungsmasse lässt sich seine Funktion veranschaulichen, da der Kunststoff dann spröde wird.
- Der Massenanteil des Weichmachers lässt sich gravimetrisch ermitteln.
- Um den Chlorgehalt des Plastisols in Metallschraubdeckeln zu ermitteln, lässt sich das Schöniger-Verfahren einsetzen.
- Die Weichmachersubstanzen in den Dichtungsmassen der Metallschraubdeckel lassen sich den Phthalaten zuordnen. Der Nachweis erfolgt über die Bildung von Fluoreszein.
- Die Identifizierung als Dioctylphthalat gelingt mit Hilfe der Dünnschichtchromatografie.
- In den PVC-Folien hingegen lassen sich keine Phthalate nachweisen. Es handelt sich um andere Substanzklassen von Weichmachern.
- PVC-Folien mit und ohne Weichmacher lassen sich mit Hilfe der FTIR-Spektrometrie unterscheiden.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit: Zum Nachweis des Chloranteils in PVC-haltigen Verpackungen (Abb. 27) konnte auf das bekannte Schöniger-Verfahren sowie auf die Titration nach Mohr zurückgegriffen werden (V 2.10.4).

Vorgefundene Experimentiervorschriften zum Thema „Weichmacher“ wurden auf PVC-Verpackungsfolien sowie auf Dichtungsmassen in Metallschraubdeckeln bezogen. Diese bewährten Untersuchungsmethoden wurden zum Nachweis von Phthalsäureestern angewandt (V 2.10.3, V 2.10.5, V 2.10.6).

## 6.6 Mehrschichtige Kunststoff-Folien

Derartige Verbunde werden häufig zur Verpackung von Schnittkäse verwendet. Aus der Sicht des Packmittels kann man unterscheiden zwischen dem Schlauchbeutel einerseits und der tiefgezogenen Schale mit aufgesiegelter Deckfolie andererseits. Beim Schlauchbeutel liegt stets auf der Innenseite Polyethylen, auf der Außenseite hingegen häufig Polyamid. Die Tiefziehschalen mit Deckfolie weisen ebenfalls Polyethylen als innere Schicht auf. Die äußeren Schichten können jedoch auch aus verschiedenen Materialien bestehen (Abb. 28).

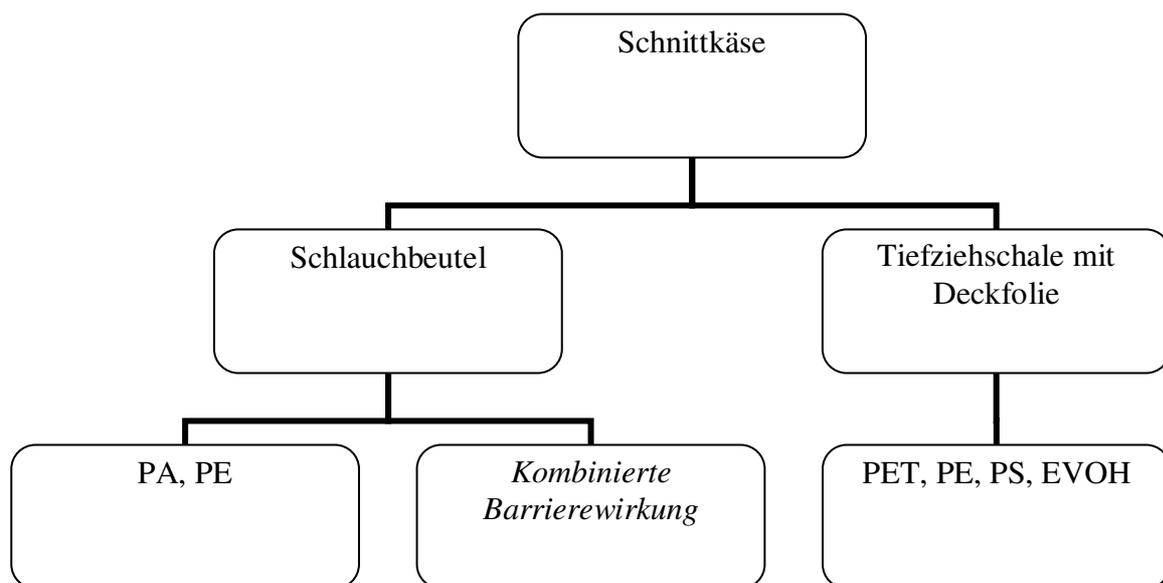


Abbildung 28: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen von Kunststoff-Verpackungen für Schnittkäse und deren Funktionen

Es können folgende Zusammenhänge ermittelt und als Experimentieranleitungen zusammengestellt werden:

- Die Polyamid-Schicht lässt sich nachweisen durch Anfärben mit Azofarbstoffen, die als Lebensmittelfarbstoff eingesetzt werden, ferner durch Reaktion mit Dimethylaminobenzaldehyd sowie durch Angreifbarkeit mit Salzsäure.
- Durch die Ermittlung des Schmelzbereiches kann das Polyamid als PA-6 identifiziert werden. Dies gelingt ebenso nach saurer Hydrolyse anhand des entstandenen Monomeren  $\epsilon$ -Aminocapronsäurehydrochlorid mit Hilfe der Schmelzpunktbestimmung.
- In konzentrierter Essigsäure gelingt bei dem PA/PE-Schlauchbeutel eine Trennung der beiden Kunststoff-Schichten. Diese Schichten werden dabei nicht beschädigt, während der Haftvermittler herausgelöst wird.

- Bei tiefgezogenen Schalen können mehrere Schichten nachgewiesen werden. Dabei lassen sich die Kunststoffe PS, PET, PE und als Barrierschicht EVOH nachweisen. Letzteres wird eindeutig über die FTIR-Spektrometrie identifiziert.
- Die Notwendigkeit der Kombination eines polaren und eines unpolaren Kunststoffes wird begründet, wobei die unterschiedlichen Durchlässigkeiten für Sauerstoff und für Wasserdampf berücksichtigt werden. Der Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaft wird hier besonders verdeutlicht.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit:

Der Nachweis über die Lage der Polyamid-Schicht innerhalb des PA/PE-Verbundes (Abb. 28) erfolgte mit einer selektiven Anfärbung (V 2.5.2) sowie über das gezielte Anlösen mit Salzsäure (V 2.5.3). Auch die Barrierewirkung der Materialkombination PA/PE für Sauerstoff (V 4.1.2), für Wasserdampf (V 4.3) sowie für einen fettlöslichen Farbstoff (V 4.4) konnten nachgewiesen werden. Ferner konnte ein Experiment entwickelt werden, in welchem  $\epsilon$ -Caprolactam-Hydrochlorid durch saure Hydrolyse von PA-6 erhalten werden konnte (V 2.5.7).

Ebenfalls auf eigene Arbeit ist der Befund zurückzuführen, dass Tiefziehschalen als Barrierschicht EVOH enthalten können (V 2.6).

## 6.7 Verpackung von Babybel-Käse

Es handelt sich um eine zweiteilige Verpackung aus einer beidseitig beschichteten Plissierfolie und einer direkt am Lebensmittel liegenden Hülle aus Wachs bzw. Paraffin. Eine Übersicht über Bestandteile und deren Funktion bietet Abb. 29.

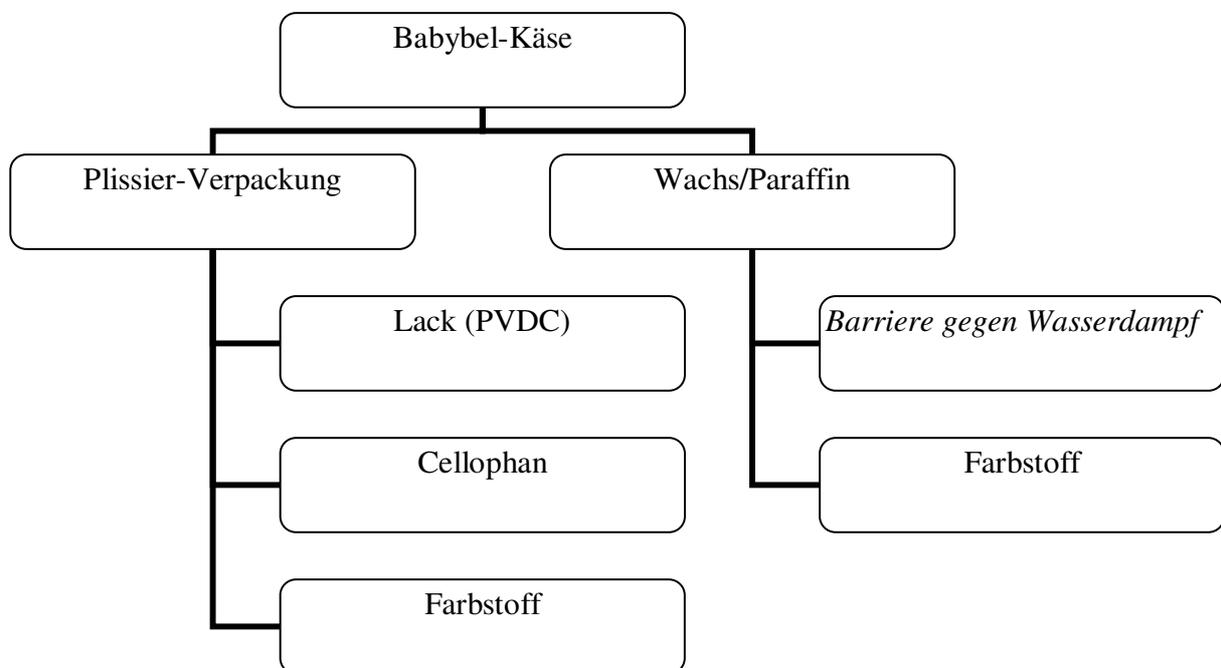


Abbildung 29: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen der Verpackung von Babybel-Käse und ihren Funktionen

Folgende Experimentieranleitungen werden angewendet bzw. entwickelt:

- Die Plissier-Verpackung als eine der wenigen aktuellen Anwendungen von Cellophan im Verpackungsbereich kann durch saure Hydrolyse mit anschließender Fehling-Probe experimentell zugänglich gemacht werden. Eine Alternative ist der Cellulose-Nachweis mit Molisch Reagenz (Tüpfelprobe).
- Bei den untersuchten Folien lässt sich der beidseitig aufgetragene Lack mit Toluol ablösen. Er zeigt eine positive Reaktion auf die Beilsteinprobe. Diese Befunde sprechen für PVDC.
- Der stark hydrophile rote Farbstoff aus der Cellophan-Folie zeigt pH-abhängige Farbänderungen. Dieser Farbstoff erweist sich als geeignet, teilweise hydrolysiertes PET selektiv nachzuweisen.
- Der rote Farbstoff aus dem Wachs wird isoliert und dünnschichtchromatografisch als Litholrubin identifiziert.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit: Die Entfernung der Lackschicht gelang nur mit Toluol. Es ergaben sich Hinweise aus PVDC (V 2.12.2). Nachdem die Cellophan-Folie freigelegt war, ließ sich der rote Farbstoff größtenteils herauslösen (V 2.12.13). Die Folie zeigte die gleichen Ergebnisse wie Cellulose bei der sauren Hydrolyse (V 2.8.2).

## 6.8 Obstschalen

Diese Kunststoff-Packmittel liegen in drei Materialarten vor: Polyethylenterephthalat, Polypropylen und Polystyrol, wie der folgenden Abbildung zu entnehmen ist. Diese durch die Technik des Tiefziehens hergestellten thermoplastischen Materialien ließen sich ohne großen Aufwand voneinander unterscheiden (Abb. 30).

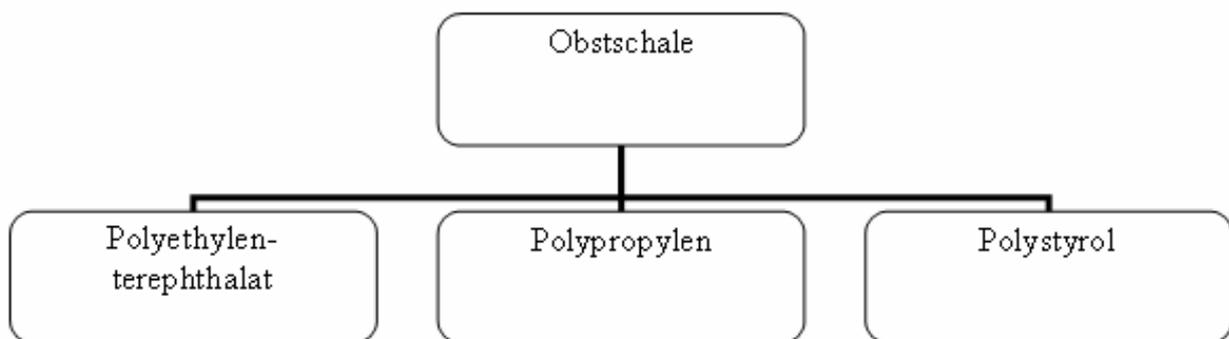


Abbildung 30: Übersicht zu experimentell nachweisbaren Bestandteilen von Kunststoff-Schalen

Zu den drei Kunststoffarten können relativ einfache Nachweisverfahren angewendet werden. Dazu werden folgende unterschiedliche Eigenschaften genutzt:

- Dichte,
- Verbrennungsverhalten,
- Erweichungsbereich,
- Löslichkeit in Aceton.

Diese Nachweisreaktionen lassen sich auch übertragen auf Joghurt-, Quark- oder Margarinebecher, wobei jeweils nur PP oder PS zur Auswahl stehen.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit: Hier konnte auf einfache bekannte Versuchsvorschriften zurückgegriffen werden (V 2.2).

## 6.9 Barrierefunktion unterschiedlicher Verpackungsmaterialien - Diffusionsfähigkeit verschiedener Substanzen

Im Anschluss an die in den vorausgehenden Kapiteln erläuterten stofflichen Untersuchungen sollen nun noch Diffusionsvorgänge in Verpackungsmaterialien bzw. deren Barrierefunktion auf experimentelle Erschließbarkeit hin überprüft werden. Hier sind die beiden Bereiche Migration und Permeation zu unterscheiden. Als Beispiel für Migration wird die Freisetzung von Acetaldehyd aus PET nachgewiesen. Die völlige Durchdringung eines Packstoffes hingegen, die Permeation, wird dokumentiert anhand

- einer fettlöslichen Modellschubstanz,
- von Sauerstoff,
- von Kohlenstoffdioxid,
- von Wasserdampf.

Ein Überblick über die Diffusionsvorgänge findet sich in Abb. 31.

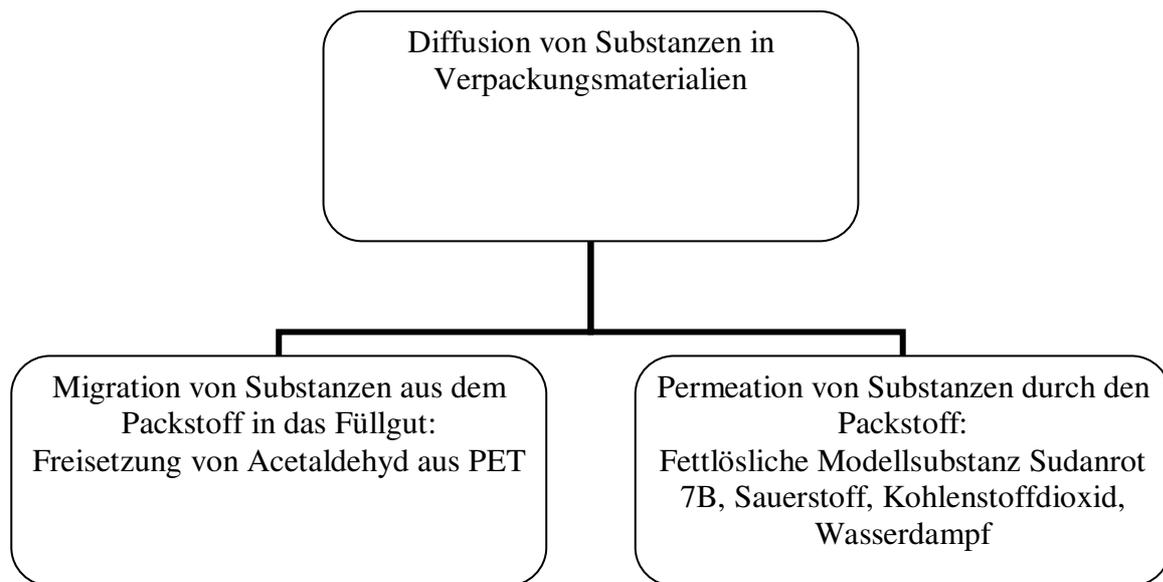


Abbildung 31: Überblick über die Vorgänge der Migration und Permeation unter Berücksichtigung der diffundierenden Substanzen

### 6.9.1 Migration

Dieser Vorgang wird am Beispiel von PET dokumentiert. Aus PET-Stücken lässt sich nach dem Erhitzen auf über 100 °C in einer abgeschlossenen Glasflasche mit Septum-Verschluss Acetaldehyd nachweisen. Die Nachweise werden durchgeführt

- mit Fuchsin-schwefliger Säure sowie
- halbquantitativ mit Gasspürröhrchen.

Bei Raumtemperatur kann eine Freisetzung von Acetaldehyd mit den genannten Methoden allerdings nicht nachgewiesen werden.

## **6.9.2 Permeation**

### **6.9.2.1 Durchlässigkeit einer fettlöslichen Modellschubstanz (Sudanrot 7B)**

Es werden PE-LD einerseits so wie ein Verbund aus PA 6 und PE-LD andererseits als Prüffolie eingesetzt. Als fettlösliche Modellschubstanz wird Sudanrot verwendet. Es kann gezeigt werden, dass PE-LD als unpolare Schubstanz eine große Durchlässigkeit für den fettlöslichen Farbstoff aufweist, wohingegen die Durchlässigkeit des Verbundes mit dem polaren PA nur sehr gering ausfällt. Die Auswertung der Ergebnisse kann mit Hilfe des Lambert-Beerschen Gesetzes erfolgen, wobei mittels einer Standardkurve das Ausmaß der Konzentrationsänderung als Funktion der Durchlässigkeit gewertet wird.

### **6.9.2.2 Sauerstoff-Durchlässigkeit**

Gezeigt werden kann jedoch die Wirkung einer vollständigen Abdichtung gegen Sauerstoff mit Hilfe eines Joghurt-Schraubdeckelglases. Ein quantitativer Nachweis der Sauerstoffdurchlässigkeit gelingt erst durch den Einsatz einer Zink-Luft-Batterie in einem mit Stickstoff gefluteten Exsikkator unter einer Belastung von 80  $\Omega$ .

### **6.9.2.3 Kohlenstoffdioxid-Durchlässigkeit**

Die Kohlenstoffdioxid-Durchlässigkeit wird bei PET-Flaschen mit kohlen säurehaltigen Getränken untersucht und dokumentiert. Dazu kommen verschiedene Methoden zum Einsatz. Stets zeigt sich, dass PET-Einweg-Flaschen mit Sternboden eine deutlich größere Durchlässigkeit aufwiesen als PET-Mehrweg-Flaschen. Eine extrem geringe Durchlässigkeit zeigt sich bei Glasflaschen, wo nur durch die Dichtung des Verschlusses eine Freisetzung von CO<sub>2</sub> möglich ist. Die Entwicklung von Experimenten lässt sich folgendermaßen aufgliedern:

- Bekannte Nachweise für Kohlenstoffdioxid werden eingesetzt, um diejenige Kohlenstoffdioxid-Portion nachzuweisen, welches nach erfolgter Permeation durch das Material einer Flasche in einen abgeschlossenen Raum gelangt und dort mit einer Schubstanz reagiert.
- Zunächst wird ausgetretenes CO<sub>2</sub> durch pH-Absenkung und mit dem Indikator Bromthymolblau im umgebenden wässrigen Medium nachgewiesen. Dabei zeigt sich überraschenderweise eine beachtliche Speicherfähigkeit für CO<sub>2</sub> in PET-Flaschenmaterial.
- In einem anderen halbquantitativen Verfahren wird CO<sub>2</sub> mit KOH gebunden, durch Zugabe von Salzsäure wieder freigesetzt, volumetrisch bestimmt und mit Barytwasser nachgewiesen.
- Der gleichzeitig permeierte Wasseranteil wird aus der Massendifferenz der Kaliumverbindung bzw. Gewichtsdiﬀerenz der Getränkeflaschen einerseits und der errechneten Masse des permeierten Kohlenstoffdioxids andererseits ermittelt.
- Freigesetztes CO<sub>2</sub> kann nicht nur auf volumetrischem Wege ermittelt werden, sondern auch titrimetrisch unter Nachweis von nicht verbrauchtem KOH.

### **6.9.2.4 Wasserdampf-Durchlässigkeit**

Keksverpackungen zeigen, wenn sie in feuchter Umgebung (Kaliumsulfat-Lösung in einem Exsikkator) gelagert werden, eine Massenzunahme. In trockener Umgebung (Phosphorpen-

xid bzw. Sicapent im Exsikkator) hingegen ist eine Massenabnahme zu verzeichnen. Beliebige Folien lassen sich mit geringem apparativem Aufwand folgendermaßen untersuchen:

- Zur Erfassung des Wasserdampfdurchtritts dient eine einfache und preiswerte Apparatur (Sturzglas mit Gewinde, Füllung mit Sicapent, ringförmig ausgestanzter Schraubdeckel), in die verschiedene Prüffolien eingelegt werden können.
- Zur Erzeugung eines definierten Luftfeuchte-Gradienten werden Sicapent (im Schraubdeckelglas) und Kaliumsulfat-Lösung (im Exsikkator) verwendet. Dabei lassen sich bei bekannter und konstanter Folienfläche deutliche Unterschiede der Wasserdampfdurchlässigkeit pro Mikrometer Foliendicke quantifizieren.
- Das Ausmaß der Permeabilität kann mit der Beschaffenheit und den Eigenschaften der verschiedenen Prüffolien in Zusammenhang gebracht werden (Struktur-Eigenschafts-Beziehung).

Bei den Experimenten zur Permeation muss berücksichtigt werden, dass es sich um relativ langwierige Versuche handelt, obwohl die Vorbereitung des Versuchsansatzes selbst nur relativ wenig Zeit beansprucht. Die gesamte Versuchsdauer erstreckt sich gegebenenfalls über einen Zeitraum von einer bis zu mehreren Wochen.

Anmerkungen zur Entwicklung der in diesem Kapitel erwähnten Experimente bzw. Experimentiervorschriften unter besonderer Berücksichtigung des Anteils der eigenen Arbeit: Versuchsentwicklungen sowie Verfassung von Experimentiervorschriften zum Thema „Diffusion“ beruhen ausschließlich auf eigenen Arbeiten. Dazu gehören die Experimente zur Freisetzung von Acetaldehyd aus PET-Flaschen (V 2.11), zur Sauerstoffdurchlässigkeit (V 4.1.1, V 4.1.2), zur Durchlässigkeit von Kohlenstoffdioxid bei PET-Flaschen (V 4.2.1 – V 4.2.4), zur Wasserdampf-Durchlässigkeit verschiedener Folien (V 4.3) sowie zur Permeabilität verschiedener Folien für einen fettlöslichen Farbstoff (V 4.4).

## **6.10 Zusammenfassung zur experimentellen Erschließbarkeit / Kriterien für ein Ordnungssystem der Experimentiervorschriften**

Ein Blick auf die thematischen Einordnungen im vorliegenden Kapitel zeigt, dass eine Vielzahl von Experimenten nötig und möglich ist, um für die Gesamtheit des Themas „Lebensmittelverpackungen“ experimentelle Zugänge zu erschließen. Die erhebliche Anzahl an Versuchsvorschriften macht es erforderlich, eine Einordnung der Experimente vorzunehmen. Als handliche Kriterien bieten sich Stoffklasse und Funktion des ausgewählten Materials an.

## 7 Ordnung der Experimente nach Stoffklassen und Funktionen sowie nach dem Ausmaß der eigenen Bearbeitung und Entwicklung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung umfassender Experimente zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ sowie die fachdidaktische Bewertung dieser experimentellen Zugänge. Dies wird hier in einer Übersicht dargestellt.

Um eigene neue Entwicklungen von Bekanntem abzugrenzen, werden diejenigen Versuchsvorschriften, welche modifiziert, optimiert oder direkt übernommen wurden, in der folgenden Tabelle in der linken Spalte aufgeführt, während die aus selbst entwickelten inhaltlichen und technischen Konzeptionen hervorgegangenen Experimente rechts aufgeführt sind. Ein weiteres Kriterium für die Einteilung der Experimente ist die stoffliche Zugehörigkeit bzw. die Funktion der Materialien (Tab. 12).

Tabelle 12: Auflistung der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsvorschriften nach stofflichen und funktionellen Gesichtspunkten. In dieser Tabelle sind die Versuchsvorschriften außerdem danach geordnet, ob sie nur eine an der Unterrichtspraxis orientierte Modifizierung darstellen (links) oder ob sie selbst entwickelt wurden – sei es experimentiertechnisch oder konzeptuell. Direkt übernommene Versuchsvorschriften werden mit „ü“ gekennzeichnet. Dabei wurden lediglich Chemikalien durch Packstoffe substituiert. Die Nummerierung bezieht sich auf Kap. 15 (Experimenteller Teil) dieser Arbeit.

Bestehende Vorschriften modifiziert, optimiert oder übernommen (ü)	Selbst entwickelt
<b>Thema: Metalle (Aluminium)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reaktion mit Säure (V 1.1)</li> <li>▪ Elektrolytische Auflösung als Anode (V 1.4.1)</li> <li>▪ Nachweis mit Alizarin S</li> <li>▪ Schmelzen von Aluminium im Mikrowellenofen (ü, V 1.5)</li> <li>▪ Aluminium-Sauerstoff-Element (ü, V 1.4.2, V 1.4.3)</li> <li>▪ Herstellung von Thenards Blau aus dem Aluminiumdeckel einer Getränkedose (V 1.2.2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reaktion mit Natronlauge, Nachweis mit Alizarin S (V 1.2.1)</li> <li>▪ EDTA-Lösung, Rücktitration (titrimetrisches Verfahren, V 1.3.3)</li> <li>▪ Aluminium-Quantifizierung durch Ermittlung der durch Säureeinwirkung freigesetzten Wasserstoffmenge (volumetrisches Verfahren, V 1.3.2)</li> </ul>

Bestehende Vorschriften modifiziert, optimiert oder übernommen (ü)	Selbst entwickelt
<b>Thema: Metalle (Weißblech Fe, Sn)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reaktion mit Säure oder elektrolytisch als Anode (V 2.9, V 1.6)</li> <li>▪ Nachweis von Eisen(II)-Ionen und Eisen(III)-Ionen (V 1.6, V 1.7.1, V 1.7.3)</li> <li>▪ Korrosionsversuche, Lokalelement (V 1.7.1)</li> <li>▪ Leuchtprobe (ü, V 1.7.1)</li> <li>▪ Nachweis der Zinn(II)-Ionen als Molybdänblau (V 1.7.1)</li> <li>▪ Titrimetrische Bestimmung des Zinn-Gehaltes (ü, V 1.7.2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fällung der Ionen als Sulfide mit Thioacetamid (V 1.7.3)</li> <li>▪ Elektrolytische Abscheidung von Zinn aus einer Weißblechdose (V 1.7.1)</li> </ul>
<b>Thema: Glas (Natronkalkglas)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elektrische Leitfähigkeit der Glasgrießsuspension (V 3.1, V 3.2.1)</li> <li>▪ Alkalische Reaktion (V 3.2.2)</li> <li>▪ Hydrolytische Klasse (ü, V 3.2.3)</li> <li>▪ Schmelzen im Mikrowellenofen (ü, V 3.3)</li> </ul>	
<b>Thema: Kunststoffe (Übersicht)</b>	
<b>Thema: Kunststoffe (Polyamid)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Pyrolysedämpfe (V 2.5.1)</li> <li>▪ Anlösen mit Salzsäure (V 2.5.3)</li> <li>▪ Schmelzbereich (V 2.5.6)</li> <li>▪ Dimethylaminobenzaldehyd (V 2.5.4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selektives Anfärben mit einem Azofarbstoff (V 2.5.2)</li> <li>▪ Saure Hydrolyse (Nachweis von <math>\epsilon</math>-Caprolactam-Hydrochlorid, V 2.5.7)</li> </ul>
<b>Thema: Kunststoffe (Polystyrol)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dichte (V 2.2)</li> <li>▪ Pyrolysedämpfe (V 2.2)</li> <li>▪ Brennverhalten (V 2.2)</li> <li>▪ Selektive Löslichkeit (V 2.2, V 2.3, V 2.6)</li> <li>▪ Schmelzbereich (V 2.6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mikroskopische Untersuchung von EPS und Kork im Vergleich (V 2.14)</li> </ul>
<b>Thema: Kunststoffe (Polyethylen, Polypropylen)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dichte (ü, V 2.2)</li> <li>▪ Pyrolysedämpfe (V 2.2)</li> <li>▪ Brennverhalten (V 2.2)</li> <li>▪ Selektive Löslichkeit (V 2.7, V 2.6)</li> <li>▪ Schmelzbereich (V 2.6)</li> </ul>	

Bestehende Vorschriften modifiziert, optimiert oder übernommen (ü)	Selbst entwickelt
<b>Thema: Kunststoffe (Polyethylenterephthalat)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Alkalische Hydrolyse, Darstellung von Terephthalsäure (V 2.1)</li> <li>▪ Dichte (ü, V 2.2)</li> <li>▪ Pyrolysedämpfe (ü, V 2.2)</li> <li>▪ Brennverhalten (ü, V 2.2)</li> <li>▪ Schmelzbereich (V 2.6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachweis von Acetaldehyd in erhitzten PET-Stücken (halbquantitativ, qualitativ, V 2.11)</li> <li>▪ Selektive Färbung (V 2.12.3)</li> </ul>
<b>Thema: Kunststoffe (Ethylvinylalkohol)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Selektive Lösungsmittel (nicht löslich in Toluol und Aceton, V 2.6)</li> <li>▪ Schmelzbereich (V 2.6)</li> <li>▪ FTIR-Spektroskopie (V 2.6)</li> </ul>
<b>Thema: Kunststoffe (Polycarbonat)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachweis mit Dimethylaminobenzaldehyd (V 2.4.1)</li> <li>▪ Alkalische Hydrolyse, Darstellung von Bisphenol A (ü, V 2.4.2)</li> </ul>	
<b>Thema: Kunststoffe (Polyvinylchlorid, Polychloropren, Polyvinylidenchlorid)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Beilstein-Probe (ü, V 2.10.1, V 2.12.2)</li> <li>▪ Brennverhalten (V 2.10.1)</li> <li>▪ Pyrolysegase (V 2.10.1)</li> <li>▪ Dichtungsmassen in Metallschraubdeckeln für Glasbehälter: Schöniger-Verfahren, Titration nach Mohr (ü, V 2.10.4)</li> </ul>	
<b>Thema: Kunststoffe (Lack Getränkedose)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Innen: Nachweis Epoxidharz (V 2.9)</li> </ul>	
<b>Thema: Klebstoffe (Herstellung und Lösung von Mehrschichtverbunden)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lösen von Verbunden mit heißem Toluol (V 2.6, V 2.7)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Lösen von Verbunden mit heißem Ethanol oder konz. Essigsäure (V 2.5.5, V 2.6)</li> </ul>
<b>Thema: Papier, Cellophan</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Test nach Molisch (V 2.8.1)</li> <li>▪ Saure Hydrolyse (V 2.8.2)</li> <li>▪ Nachweis der Zucker mit Fehling-Lösung (ü, V 2.8.2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ablösen der Polyvinylidenchlorid-Lackschicht von der Cellophanfolie (V 2.12.2)</li> <li>▪ Herauslösen eines roten Farbstoffes aus Cellophan (Babybel, V 2.12.3)</li> </ul>
<b>Thema: Wachs / Paraffin</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herauslösen des roten Farbstoffes Litholrubin (ü, V 2.12.1)</li> <li>▪ Schmelzbereich (ü, V 2.17)</li> </ul>	

Bestehende Vorschriften modifiziert, optimiert oder übernommen (ü)	Selbst entwickelt
--	-------------------

Thema: <b>Zusatzstoffe (Übersicht)</b>	
Thema: <b>Weichmacher</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Herauslösen eines Weichmachers mit Olivenöl (V 2.10.2)</li> <li>▪ Herauslösen des Weichmachers aus einer PVC-Folie, FTIR-Spektren (V 2.10.3)</li> <li>▪ Umwandlung in Phthalsäureanhydrid, Reaktion mit Resorcin zu Fluorescein (ü, V 2.10.5)</li> <li>▪ Dünnschichtchromatografische Unterscheidung unterschiedlicher Weichmachersubstanzen (ü, V 2.10.6)</li> </ul>	
Thema: <b>Pigmente</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachweis von Titandioxid (V 2.13)</li> </ul>	

Thema: <b>Migration</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachweis von Acetaldehyd in erhitzten PET-Stücken (quantitativ, V 2.11)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Nachweis von Acetaldehyd in erhitzten PET-Stücken (halbquantitativ, qualitativ, V 2.11)</li> </ul>

Thema: <b>Durchlässigkeit (Übersicht)</b>	
Thema: <b>Durchlässigkeit (Farbstoff)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umgebautes Osmometer: Alkoholische Lösung von Sudanrot 7B (V 4.4)</li> </ul>
Thema: <b>Durchlässigkeit (Licht)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Entstehung von Berliner Blau (V 4.5)</li> </ul>	

Bestehende Vorschriften modifiziert, optimiert oder übernommen (ü)	Selbst entwickelt
<b>Thema: Durchlässigkeit (Sauerstoff)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Einsatz einer Zink-Luft-Batterie (V 4.1.2)</li> <li>▪ Nachweis mit Methylenblau (V 4.1.1)</li> </ul>
<b>Thema: Durchlässigkeit (Kohlenstoffdioxid), Getränkeflaschen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Titrimetrischer Nachweis, Titration des restlichen KOH mit Oxalsäure (ü, V 4.2.4)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ pH-Wert (V 4.2.2)</li> <li>▪ Indikator Bromthymolblau (V 4.2.1)</li> <li>▪ Bindung durch Kaliumhydroxid in großen Einmachgläsern mit anschließender Freisetzung von Kohlenstoffdioxid durch geringe Mengen Salzsäure, Kohlenstoffdioxid-Nachweis mit Barytwasser (V 4.2.3)</li> </ul>
<b>Thema: Durchlässigkeit (Wasserdampf)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Versuch mit dem Schraubdeckelglas und präpariertem Metalldeckel bei eingespannter Prüffolie (V 4.3)</li> </ul>
<b>Thema: Schutzgasatmosphäre (Stickstoff)</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Farbstoff Methylenblau und Reduktionsmittel Natriumdithionit im Joghurtglas (V 4.1.1)</li> </ul>
<b>Thema: Mechanische Eigenschaften</b>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Zugversuche: Spannungs-/Dehnungs-Diagramm (V 2.15)</li> <li>▪ Verformbarkeit, Elastizität (V 2.5.3, V 2.15)</li> </ul>
<b>Thema: Thermische Eigenschaften</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Thermische Stabilität verschiedene Thermoplaste (V 2.16.2)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schrumpffolie (V 2.16.1)</li> </ul>

## 8 Lehrplanbezug der Experimente

Im Lehrplan Chemie des Hessischen Kultusministeriums wird ausdrücklich darauf verwiesen, dass Themen aus Alltag und Technik im Unterricht Berücksichtigung finden sollen. Verpackungsmaterialien stellen mit den Stoffklassen Metalle, Makromoleküle und Glas sowie deren Funktionen ein großes Potenzial mit Alltags- und Schülerbezug dar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein großer Anteil der vorgegebenen Lernziele über die Erkenntnisse, welche aus der experimentellen Beschäftigung mit Lebensmittelverpackungen gewonnen werden können, erreichbar ist. Zum tieferen Verständnis der eingesetzten Experimente ist jedoch zumindest die Beschäftigung mit den Themen „Redoxreaktionen“, „Protolysereaktionen“, „Kohlenstoffchemie / Funktionelle Gruppen“ sowie „Kohlenstoffchemie / Makromoleküle“ dringend erforderlich.

Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass ein Einsatz von Experimenten hauptsächlich in der Sekundarstufe II sowie im letzten Jahr der Sekundarstufe I für die Lernenden sinnvoll ist. Für die unteren Jahrgangsstufen der Sekundarstufe I hingegen erscheint ein überwiegend an Phänomenen orientiertes Experimentieren sinnvoll. Daraus kann – je nach Leistungsstand der Lerngruppe – eine angestrebte Stufe der Abstraktion erarbeitet werden. Als für die Sekundarstufe I gut zugänglich sind beispielsweise die Themen „Metalle“ sowie einige einfach strukturierte „Polymere“ (Polyethylen, Polypropylen) einzustufen.

## 9 Einfache Versuche mit geringerem Zeitaufwand

Unter dem Aspekt des begrenzten zeitlichen Rahmens einer einzelnen Schulstunde erscheint es geboten, neben der lehrplanbezogenen Stoffauswahl auch eine Auswahl an Versuchsvorschriften vorzunehmen, welche dem Wunsch nach größtmöglicher Einfachheit, Überschaubarkeit und schneller Durchführbarkeit gerecht wird. Der relativ geringe Zeitbedarf bezieht sich entweder auf die Dauer eines jeweils einzelnen Versuchs, der innerhalb einer Schulstunde begonnen und zum Abschluss gebracht wird oder auf Langzeitversuche, die sich zwar über mehrere Tage oder Wochen erstrecken, dabei aber nur innerhalb einer einzelnen Chemiestunde einige Minuten zur Messwerterfassung bzw. Auswertung erfordern. Zur besseren Übersicht sind die Themen in den nachfolgenden Tabellen nach den Schwerpunkten „Komplexchemie“, „Redoxreaktionen“, „Säure-Base-Reaktionen“, „Das chemische Gleichgewicht“, „Kohlenstoffchemie/Makromoleküle“, „Durchlässigkeit/Barrierefunktion“ sowie „Eigenschaften verschiedener Materialien“ gegliedert. Ausgewählte Experimente, welche Wege zu verschiedenen Lernzielen und Themenschwerpunkten eröffnen, werden mehrfach genannt.

In der folgenden Tab. 13 findet man eine Auflistung einiger einfach durchzuführender Experimente zum Thema „Komplexchemie“.

Tabelle 13: Versuche zur Komplexchemie in einfachen Experimenten

<b>Komplexchemie</b>	<b>Erläuterungen</b>	<b>Versuch</b>
Nachweis von Aluminium-Ionen	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Qual. Nachweis mit Alizarin S</li><li>➤ Qual. Nachweis als Thenards Blau</li><li>➤ Halbquantitativer Schnelltest, geeignet zur Ermittlung der Dicke einer Aluminiumschicht</li></ul>	1.2.1, 1.2.2, 1.3.1
Nachweis von Eisen(II)-Ionen	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ Nachweis als Berliner Blau mit Rotem Blutlaugensalz</li></ul>	1.6, 1.7.1

<b>Komplexchemie</b>	Erläuterungen	Versuch
Nachweis von Eisen(III)-Ionen, Austausch von Liganden, chemisches Gleichgewicht, Stabilitätsunterschiede	➤ Nachweis mit Thiocyanat-Ionen	1.6 1.7.1
Nachweis von Titandioxid	➤ Nachweis mit Wasserstoffperoxid	2.13
Entstehung von Berliner Blau, Eisenoxalat-Komplex	➤ Orientierendes Verfahren mit dem Overheadprojektor als Lichtquelle (lichtabhängige Reaktion)	4.5

Der Einsatz der Komplexchemie dient hauptsächlich dem qualitativen Nachweis von Metallkationen der Elemente, welche in Verpackungsmaterialien vorkommen. Lediglich im Rahmen einer lichtinduzierten Reaktion dient die Entstehung von Berliner Blau als orientierender Nachweis einer von der Lichtdurchlässigkeit des Packstoffes abhängigen Redoxreaktion. Bei den nachfolgend aufgeführten Redoxreaktionen liegt der Schwerpunkt auf der Bildung von Metall-Ionen aus den Packstoffen Aluminium, Eisen und Zinn. Eine Übersicht über ausgewählte Experimente bietet die folgende Tab. 14.

Tabelle 14: Einfach durchzuführende Experimente zum Thema „Redoxreaktionen“

<b>Redoxreaktionen</b>	Erläuterungen	Versuch
Aluminium-Sauerstoff-Element	➤ Spannungsreihe	1.4.2, 1.4.3
Zersetzung von Aluminium oder Eisen mit Säure	➤ Entstehung von Metall-Ionen	1.1, 1.3.1
Korrosionsversuch (Lokalelement): Zinn als Schutz für Eisen	➤ Teilweise verzinnter Eisennagel mit Agar in Petrischale	1.7.1
Reaktion von Aluminium mit Natronlauge	➤ Nachweis der entstehenden Aluminium-Ionen mit Alizarin S	1.2.1
Reduzierende Wirkung der Zinn(II)-Ionen	➤ Nachweis der Zinn(II)-Ionen als Molybdänblau	1.7.1
Reduktion von Eisen(III)-Ionen, lichtabhängig	➤ Nachweis der Eisen(II)-Ionen als Berliner Blau	4.5
<b>Spannungsreihe, Elektrolysespannung</b>		
Elektrolytische Abscheidung von Zinn aus einer Weißblechdose	➤ Galvanotechnik, Überspannung des Wasserstoffs	1.7.1
Anodische Oxidation von Eisen und Aluminium	➤ Zersetzungsspannung, Nachweis der Kationen ➤ Projektionsversuch	1.4.1, 1.6
<b>Nachweis von Sauerstoff</b>		
Farbstoff Methylenblau und Reduktionsmittel Natriumdithionit	➤ Qualitativer bzw. orientierender Sauerstoffnachweis	4.1.1

Vom Themenbereich der Redoxreaktionen aus lässt sich ein Bezug zum chemischen Gleichgewicht herstellen. Dies gelingt nicht zuletzt mit dem Experiment der elektrolytischen Raffination von Zinn aus der Weißblechdose. Schließlich lässt sich im Rahmen eines Tests zur Sauerstoffdurchlässigkeit von Verpackungen der Farbstoff Methylenblau als korrespondierendes Redoxpaar erfassen.

Nachfolgend werden einige ausgewählte Säure-Base-Reaktionen aufgeführt (Tab. 15). Hierzu gehören Versuche, welche dem Nachweis der Monomere oder der Zersetzungsprodukte aus

Makromolekülen dienen. So setzt der Nachweis von Cellulose-Verbindungen eine saure Hydrolyse voraus. Andererseits lassen sich verschiedene Kunststoffsorten anhand unterschiedlicher Säure-Base-Reaktionen ihrer durch thermische Zersetzung erhaltenen Verschmelzungsprodukte identifizieren oder zumindest klassifizieren. Ferner lassen sich einfache Experimente durchführen, welche durch das Herauslösen von Substanzen aus Verpackungsmaterialien bedingte pH-Änderungen erfassen. Dies bezieht sich auf das Herauslösen von Kohlenstoffdioxid aus PET, aber auch auf die Freisetzung von Hydroxid-Ionen und damit die alkalische Reaktion von Natronkalkglas.

Tabelle 15: Versuche zu Säure-Base-Reaktionen in einfachen Experimenten

<b>Säure-Base-Reaktionen</b>	Erläuterungen	Versuche
<b>Reaktion von Kohlenstoffdioxid mit Wasser oder einem Feststoff und Reaktion mit Wasser, pH-Wert</b>		
pH-Wert-Änderung im umgebenden wässrigen Medium von Getränkeflaschen mit kohlenensäurehaltigem Füllgut	➤ Indikator Bromthymolblau	4.2.1
<b>Hydrolytische Spaltung von Polymeren</b>		
Saure Hydrolyse von Cellophan	➤ Nachweis von regenerierter Cellulose mit Molisch Reagenz	2.8.1
<b>Thermische Zersetzung von Polymeren</b>		
PE, PP, PS, PET, PA, PVC	➤ Pyrolysegase, pH-Wert	2.2
<b>Glas: Protolysereaktionen mit Wasser</b>		
Alkalische Reaktion einer Glasgrießsuspension von Natronkalkglas	➤ pH-Meter ➤ Indikator	3.2.2
Elektrische Leitfähigkeit einer Glasgrießsuspension	➤ Natronkalkglas, Freisetzung von Ionen.	3.2.1

Zur Erschließung des Themas „Chemisches Gleichgewicht“ führen beispielsweise die zwei nachfolgend aufgeführten Experimente, welche trotz ihrer Einfachheit eine mehrtägige Versuchsdauer mit allerdings nur kurzen Phasen der Ergebnissicherung erfordern. Aus PET-Flaschen ausgetretenes Kohlenstoffdioxid lässt sich im Rahmen des Gleichgewichtes  $\text{CO}_2 / \text{HCO}_3^-$  thematisieren. In die Gleichgewichtsbetrachtungen lässt sich der Umschlagsbereich des Indikators mit einbeziehen. Direkt zum Löslichkeitsprodukt wiederum führt das in den Wänden von ehemals mit kohlen-saurem Mineralwasser befüllten PET-Flaschen gespeicherte Kohlenstoffdioxid. Wird das Innere dieser entleerten Flaschen mit Kalkwasser gefüllt, fällt Calciumcarbonat aus, da dessen Löslichkeitsprodukt überschritten wird (Tab. 16).

Tabelle 16: Versuche zum Chemischen Gleichgewicht in einfachen Experimenten

<b>Das chemische Gleichgewicht</b>	Erläuterungen	Versuche
<b>Fällungsreaktion, Löslichkeitsprodukt</b>		
Kohlenstoffdioxid-Nachweis in den Wänden von PET-Flaschen	➤ Qualitativer Nachweis mit Kalkwasser	4.2.5
<b>Durchlässigkeit für Kohlenstoffdioxid</b>		
pH-Wert-Änderung im umgebenden wässrigen Medium von Getränkeflaschen mit kohlenensäurehaltigem Füllgut	➤ Indikator Bromthymolblau	4.2.1

Viele Packstoffe bieten die Möglichkeit zur Erschließung von Eigenschaftskombinationen und damit zur Identifizierung verschiedener makromolekularer Verbindungen. In diesem Rahmen bietet es sich an, auch die Hilfsstoffe in makromolekularen Verbindungen zu untersuchen. Eine Übersicht dazu bietet die folgende Tab. 17.

Tabelle 17: Einfache Experimente zum Thema „Makromoleküle/Monomere“. Der Schwerpunkt liegt auf einfachen Nachweisreaktionen.

<b>Kohlenstoffchemie/Makromoleküle</b>	<b>Erläuterungen</b>	<b>Versuche</b>
<b>Nachweisreaktionen</b>		
PE, PP, PS, PET	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Dichte</li> <li>➤ Schmelzbereich</li> <li>➤ Brennverhalten</li> <li>➤ Pyrolysegase</li> <li>➤ Angreifbarkeit durch Aceton</li> <li>➤ Löslichkeit in Toluol</li> <li>➤ Strukturformeln</li> </ul>	2.2, 2.3, 2.7, 2.12.3
PA-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alkalische Pyrolysedämpfe</li> <li>➤ Anfärbbarkeit mit Azofarbstoffen (Säurefarbstoffen)</li> <li>➤ Nachweis von Polyamid in einer Mehrschichtfolie durch Ablösen mit Salzsäure</li> </ul>	2.5.1, 2.5.2, 2.5.3
PC	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nachweis mit Dimethylaminobenzaldehyd</li> </ul>	2.4.1
PVC,PVDC	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Beilstein-Probe</li> </ul>	2.10.1, 2.10.2
Cellophan bzw. Cellulose	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nachweis von Glucose als Hydroxymethylfurfural mit Molisch Reagenz</li> </ul>	2.7, 2.8.1,
EVOH	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nichtlöslichkeit in Toluol</li> <li>➤ Schmelzbereich</li> <li>➤ FTIR-Spektroskopie</li> </ul>	2.6
Epoxidharz (Getränkedose, Innenbeschichtung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nachweis von Bisphenol A</li> </ul>	2.9
<b>Pigmente</b>		
Titandioxid	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nachweis mit Wasserstoffperoxid</li> </ul>	2.13
<b>Migrierfähige Substanzen</b>		
PVC mit Weichmacher	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Herauslösen verschiedener Weichmachersubstanzen</li> </ul>	2.10.2, 2.10.3
Cellophan	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Herauslösen eines wasserlöslichen roten Farbstoffes</li> </ul>	2.12.2

Die nachfolgende Auflistung von Experimenten bezieht sich auf die Durchlässigkeit verschiedener Materialien für gasförmige Permeanten und für Licht. Zwischen der Barrierewirksamkeit der Materialien und ihrer Struktur lassen sich Zusammenhänge herstellen. Dadurch wiederum lässt sich die gezielte Auswahl bestimmter Packstoffe nachvollziehen (Tab. 18).

Tabelle 18: Die Barrierewirkung bzw. Durchlässigkeit verschiedener Materialien für die gasförmigen Permeanten Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf sowie für Licht kann in relativ einfachen Versuchen erschlossen werden.

Durchlässigkeit/Barrierefunktion verschiedener Materialien	ver-	Erläuterungen	Versuche
Sauerstoff		➤ Herstellung einer sauerstofffreien Schutzgasatmosphäre, Überprüfung mit reduziertem Methylenblau	4.1.1
Kohlenstoffdioxid		➤ pH-Änderung (Indikator Bromthymolblau)	4.2.1,
Wasserdampf		➤ Gravimetrische Bestimmung (Schraubdeckelglas mit eingespannter Folie, Sicapent), Polarität des Folienmaterials	4.3
Licht		➤ Lichtinduzierte Redoxreaktion, Reduktion von Eisen(III)-Ionen zu Eisen(II)-Ionen; Nachweis als Berliner Blau	4.5

Als Eigenschaften, welche ebenfalls nicht direkt mit einer chemischen Reaktion einhergehen, sind mechanische und thermische Eigenschaften verschiedener Materialien zu nennen, wie sie in nachfolgender Tab. 19 aufgeführt sind.

Tabelle 19: Eine Übersicht zu einfachen Experimenten zu mechanischen und thermischen Eigenschaften von Kunststoffen, Metall und Glas

Eigenschaften verschiedener Materialien	Erläuterungen	Versuche
<b>Mechanische Eigenschaften</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elastizität</li> <li>➤ Nachweis von Polyamid in einer Mehrschichtfolie durch Ablösen mit Salzsäure – Vergleich mit Polyethylen</li> <li>➤ PVC mit und ohne Weichmacher</li> </ul>	2.5.3, 2.10.2, 2.14
<b>Thermische Eigenschaften</b>		
<b>Kunststoffe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Schrumpffolie (Entropie)</li> <li>➤ Thermische Stabilität verschiedener Thermoplaste</li> </ul>	2.2, 2.16.1, 2.16.2
<b>Metalle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Schmelzen von Aluminium im Mikrowellenofen</li> </ul>	1.5
<b>Glas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Schmelzen von Flaschenglas im Mikrowellenofen</li> </ul>	3.3

## 10 Das Thema „Lebensmittelverpackungen“ unter dem Gesichtspunkt des Struktur-Eigenschaften-Konzeptes

Wie bereits eingangs im Kapitel „Stand der Forschung“ dargestellt, beziehen sich die meisten der dort erwähnten Arbeiten auf die ökologischen Aspekte von Verpackungsmaterialien, kaum jedoch auf ihre Eigenschaften und damit auf die erwünschte Funktion. Diese ist ein Kriterium für die Wahl eines bestimmten Materials. Die Eigenschaften, welche die Eignung zum Packstoff ermöglichen, haben wiederum auf der strukturellen Ebene ihre Ursache. Daher erscheint es geboten, dem Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften dieser hier ausgewählten Materialien besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Mit dem Struktur-Eigenschaften-Konzept lassen sich zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ angesichts der vielen gezielt angewendeten Materialien mit ihren unterschiedlichen Funktionen chemische Zusammenhänge „erschließen, verstehen und anwenden“. Zur besonderen Bedeutung des „Eigenschafts-Struktur-Denkens“ äußert sich FRANIK (1992). Für ihn ist es „das fundamentale Anliegen des Chemieunterrichts, makroskopische Stoffeigenschaften mit Hilfe submikroskopischer Strukturen zu erläutern und zu verstehen“. „Nicht allein ein trivialer Transfer vom Mikro- in den Makrokosmos ist gefragt, sondern Reflexion in neuen Kategorien mit angepassten Modellen und erweiterten Theorien. Ein Zurückführen von modellhaft Erkanntem auf verifizierbare Erfahrung ist verlangt und dessen Umkehrung!“[79]. Vor diesem Hintergrund werden nachfolgend die Materialien Kunststoff (Polymere), Metall und Glas exemplarisch beleuchtet sowie die Vorteile ausgewählter Kombinationen erläutert und in Bezug zu den entwickelten Schulexperimenten gesetzt.

### 10.1 Aluminiumhaltige Verpackungen

Aluminium findet man in Getränkedosen, Einschlagfolien, als Barrierefolie sowie als Deckel für Joghurtbecher.

Es stellt sich die Frage, auf welche strukturelle Entsprechung die gewünschten Eigenschaften wie Glanz, hohe Festigkeit und plastische Verformbarkeit (Duktilität) zurück zu führen sind.

Die Anziehungskräfte zwischen den positiven Atomrümpfen und dem Elektronengas im Metallgitter ermöglichen eine plastische Verformbarkeit, da während des Gleitens der Gitterebenen die ungerichteten Bindungskräfte erhalten bleiben [80, S. 164-166]. Die Art des Kristallgitters hat entscheidende Auswirkungen auf die plastische Verformbarkeit der Metalle. Aluminium zeigt mit seinem kubisch-flächenzentrierten Gitter eine größere Verformbarkeit als Eisen mit seinem kubisch-raumzentrierten Gitter [81, S. 164].

Die gute elektrische Leitfähigkeit von Metallen lässt sich mit dem „Elektronengasmodell“ erklären [82, S. 85]. Eine differenziertere Beschreibung liefert das Bändermodell. Diese Betrachtung setzt allerdings die Kenntnis des Orbitalmodells voraus [83, S. 50], [82, S. 85]. Auf die elektrische Leitfähigkeit von Metallen wird in zahlreichen Experimenten eingegangen (V 1.4.1, V 1.4.2, V 1.4.3 sowie V 1.6 und V 1.7.1).

Die Metallkristall-Struktur macht Aluminium auch als Sperrschicht geeignet. Zur Ermittlung deren Schichtdicke wurden verschiedene experimentelle Verfahren entwickelt (V 1.3.1, V 1.3.2, V 1.3.3). Die Effizienz der Barrierefunktion lässt sich gegenüber Sauerstoff und Wasserdampf belegen. Auch zu diesen Experimenten wurden Versuchsvorschriften entwickelt (V 4.1.2, V 4.3). Ebenfalls lässt sich die Barrierewirkung gegen Aromaverlust am Beispiel des fettlöslichen Farbstoffes Sudanrot 7 B experimentell nachvollziehen (V 4.4). Durch die Technik des Aufdampfens können extrem dünne Aluminiumschichten erzeugt werden, welche als Barriere häufig ausreichend sind. Außerdem wirkt Aluminium als Barriere gegen Licht (V 4.5). Die als Barriere in einen Getränkekarton eingearbeitete Aluminiumfolie lässt sich freilegen, wenn die Polyethylen-Schicht mit Toluol abgelöst wird (V 2.7).

Auf Grund seiner leichten Oxidierbarkeit liegt Aluminium selbst nicht am Lebensmittel, sondern ein Kunststoff. Im Falle des Getränkekartons ist es Polyethylen. In Getränkedosen ist das Füllgut vor dem Metall durch eine Schicht aus Epoxid-Harz geschützt (V 2.9). Auf der leichten Oxidierbarkeit des Aluminiums beruhen zahlreiche entwickelte und revidierte Experimente zu Lebensmittelverpackungen (V 1.1, V 1.2.1, V 1.2.2, V 1.4.1, V 1.4.2, V 1.4.3).

Für die Stabilität des Getränkekartons sorgt zwar das Kartonmaterial selbst, jedoch zeigt auch eine Aluminiumfolie eine gewisse Stabilität. Dies gilt auch für die Zugfestigkeit. Aluminiumfolien sind nur in engen Grenzen dehnbar und haben damit einen höheren Elastizitätsmodul als Polyethylen. Dazu wurden Spannungs-Dehnungs-Diagramme angefertigt (V 2.15).

Die geringe Dichte macht Aluminium zu einem vorteilhaften Verpackungsmaterial. Bei den tiefgezogenen Getränkedosen besteht der Deckel stets aus dem weicheren Aluminium, welches für die Öffnung mit dem Ringpull-Verschluss besser geeignet ist als Stahl. Auch die Schmelztemperatur ist bei Aluminium geringer. Zum Schmelzen von Aluminium im Mikrowellenofen wurden bestehende Versuchsvorschriften angewendet (V 1.5).

Die Kräfte zwischen den Metallatomen sind umso größer, je mehr Valenzelektronen dem betreffenden Atom zur Verfügung stehen. Somit steigen Schmelzpunkt und Härte (bei gleicher Gitteranordnung) mit zunehmender Zahl der Valenzelektronen [84, S. 317]. Damit steht im Einklang, dass Aluminium mit 3 Valenzelektronen eine geringere Härte besitzt als Eisen mit 6 Valenzelektronen. Die Höhe der Schmelztemperatur ist außerdem von der Gitterkonstante abhängig. Sie steigt mit abnehmender Gitterkonstante  $a$ . Rechnerisch lässt sich leicht ein Zusammenhang herstellen zwischen dem Atomradius und der Dichte eines Metalls, wenn die Gitterkonstanten  $a$  bekannt ist. Umgekehrt lassen sich nun bei bekannter Gitterkonstante der metallische Atomradius und die Dichte eines kristallinen Metalls berechnen. Dieser Zusammenhang kann anhand zweier Rechenbeispiele im Kapitel „Aufgabensammlungen mit Lösungen“ nachvollzogen werden [85, S. 177-179, 186].

Die nachfolgende Tabelle 20 enthält eine Sammlung ausgewählter Größen, welche jeweils ein Profil der beiden Metalle kennzeichnen.

Tabelle 20: Vergleich ausgewählter Eigenschaften der im Verpackungsbereich sehr häufigen Metalle Aluminium und Eisen. Rechts sind die strukturellen Ursachen aufgeführt. Die Werte für die Gitterkonstanten wurden entnommen aus [86, S. 316 f.].

<b>Metall</b>	<b>Aluminium</b>	<b>Eisen</b>
<b>Eigenschaft</b>	<b>Strukturelle Ursachen, Daten, Modelle</b>	
<b>Glanz</b>	Elektronengasmodell	
<b>Elektrische Leitfähigkeit</b>	Elektronengasmodell Bändermodell	
<b>Plastische Verformbarkeit</b>	Ungerichtete Bindungen Elektronengasmodell	
	Metallgitter bzw. Kugelpackungen	
	Kubisch-flächenzentriert	Kubisch-raumzentriert
	Koordinationszahl	
	12	8
<b>Härte (Mohs)</b>	2-2,9	4-5
<b>Schmelztemp. (°C)</b>	660	1535
	Abstand der Metallatome	
	Anzahl der Bindungselektronen	
	3	6
	Gitterkonstante a (pm)	
	404	286
<b>Dichte (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,70 (Leichtmetall)	7,86 (Schwermetall)
	Atommasse (u)	
	27,0	55,8
	Atomradius (pm)	
	143	126

Die vielfältigen Möglichkeiten und Auswirkungen von Legierungen werden hier aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht berücksichtigt.

## 10.2 Getränkeflaschen aus verschiedenen Materialien

Vergleicht man einige anwendungsrelevante Eigenschaften von Getränkeflaschen aus PET und Glas miteinander, so zeigen sich beträchtliche Unterschiede. Dabei stehen hier nicht die Ökobilanzen im Vordergrund, sondern Anforderungen an die Materialien, an deren Erfüllung sich die Alltagstauglichkeit der Getränkeverpackungen messen lässt. Die folgende Tab. 21 gibt einen Überblick über die Funktionen, welche besonders in der Gebrauchsphase der Verpackungen von Bedeutung sind.

Tabelle 21: Vor- und Nachteile von Glasflaschen und PET-Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke

<b>Anforderungen</b>	<b>PET</b>	<b>Glas</b>
Hoher Produktanteil am Gesamtgewicht	Sehr gutes Verhältnis von Produktgewicht/Verpackungsgewicht	Ungünstiger gegenüber PET
Hohe Stabilität, geringe Bruchempfindlichkeit	Sehr gut, unzerbrechlich	Schlecht, Polymerbeschichtung möglich [87, S. 12]
Möglichst hohe Umlaufzahlen bei Mehrwegflaschen	ca. 25 Umläufe [88]	ca. 50 Umläufe
Recyclebarkeit („Bottle to bottle“)	50 % und mehr möglich, jedoch 100 %, wenn PET für andere Produkte eingesetzt wird	Fast 100 % möglich
Keine Sorption von Aromastoffen bzw. mögliche Wiederabgabe an das Füllgut	Bisher unzureichend	Sehr gute Eigenschaften
Gewährleistung eines hygienisch einwandfreien Zustandes bei Kontakt mit dem Füllgut bei Mehrwegflaschen	Empfindlichkeit für Pilzbefall bei PET erhöht - durch statische Aufladung begünstigt [87, S.11], [89]	Sehr gute Eigenschaften
Anwendung einer Reinigungstemperatur, welche Sterilisierung bei Mehrwegflaschen ermöglicht	Bei PET werden Werte von 58 °C bis 65 °C angegeben [88, S. 11].	Glas kann bis über 200 °C erhitzt werden.
Gute Barriereigenschaften für O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> und Wasserdampf	Bisher unzureichende Haltbarkeitszeit von Füllgut [87, S. 7]	Sehr gute Barriereigenschaften

Bei Glas erweist sich das amorphe Netzwerk zwar als nachteilig wegen der hohen Dichte und der hohen Bruchempfindlichkeit, jedoch zeigt es große Vorteile wegen seiner Barriereigenschaften, seiner Inertheit gegenüber Lebensmittel-Füllgut und wegen seiner Hitzebeständigkeit. Der Kunststoff PET hingegen mit seinen polaren, nur teilweise kristallin angeordneten und gegeneinander verschiebbaren Makromolekülen zeigt seine größten Vorteile in der geringen Dichte, der geringen Bruchempfindlichkeit sowie der starken Verformbarkeit. Andererseits reichen bei PET die zwischenmolekularen Kräfte nicht aus, um eine zufrieden stellende Dichtigkeit und Temperaturbeständigkeit zu gewährleisten.

Die Eigenschaften von Natronkalkglas werden in den Experimenten V 3.1 bis V 3.3 sowie in V 4.5 vorgestellt [90, S. 214]. Das Vorhandensein der Natrium- und Calcium-Ionen lässt sich über die Komponenten erklären, die zur Herstellung von Flaschenglas benötigt werden, nämlich Soda, Kalk und Quarzsand.

Nachweisreaktionen zu PET findet man in den Versuchen 2.1 und 2.2. Mit der unterschiedlichen Barrierewirkung von PET und Glas für Kohlenstoffdioxid beschäftigen sich die Experimente V 4.2.1 bis V 4.2.5. Zum Thema „Wie dicht sind Getränkeflaschen?“ wurde eine Reihe von Versuchsergebnissen über die Durchlässigkeit von PET-Flaschen für CO<sub>2</sub> publiziert [33].

### 10.3 Verbund-Folien (PA/PE)

An Lebensmittelverpackungen wie z.B. für Käse werden verschiedene Anforderungen gleichzeitig gestellt. Dazu gehört die Gewährleistung einer Barriere gegen Sauerstoffeintritt sowie gegen Wasserdampfverlust. Im Hinblick darauf soll der Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften am Beispiel einer Mehrschichtfolie aus Polyamid (PA-6) und Polyethylen (PE-LD) näher betrachtet werden. Während Polyamid eine gute Sperrschicht für Sauerstoff darstellt, dient Polyethylen als hervorragende Barriere gegen Wasserdampf [18]. Dieser Zusammenhang wird durch die nachfolgende Abb. 32 veranschaulicht.

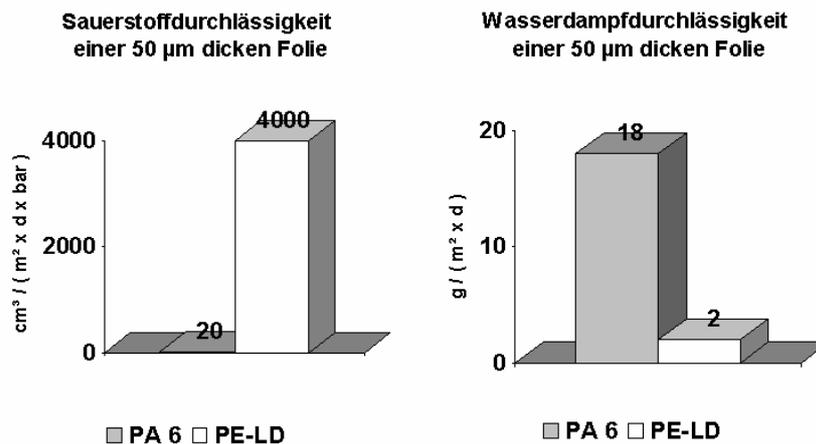


Abbildung 32: Durchlässigkeit für Wasserdampf und Sauerstoff von Polyamid (PA 6) und Polyethylen (PE-LD). Die Werte sind gerundet, bezogen auf 20 °C und 85 % rel. Feuchte [18].

Die Barrierefunktion gegenüber Sauerstoff bzw. die Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien lassen sich mit Hilfe einer Zink-Luft-Batterie ermitteln (V 4.1.2). Zwischen den unpolaren Polymer-Ketten im Polyethylen wirken lediglich die Van-der-Waals-Kräfte, während Polyamid polar aufgebaut ist. Daraus lässt sich die hohe Wasserdampf-Durchlässigkeit von Polyamid ableiten. Die Ergebnisse aus der Bestimmung der Wasserdampf-Durchlässigkeit von Polyethylen hingegen zählen zu den kleinsten gemessenen Werten (V 4.3). Außerdem lässt sich zeigen, dass die Barriere Wirkung für Sauerstoff bei PE-HD auf Grund der höheren Kristallinität höher als bei PE-LD. Die Durchlässigkeit für die fettlösliche Modellsubstanz Sudanrot 7 B wiederum ist bei dem unpolaren Polyethylen erwartungsgemäß hoch, bei Kombination mit PA-6 sehr niedrig (V 4.4).

Polyamid enthält Säureamidgruppen, wodurch es in der Lage ist, Säurefarbstoffe an der Oberfläche zu adsorbieren, wodurch es sich selektiv anfärben lässt [91, S. 14 f.] (V 2.5.2). Diese Strukturen erklären auch die Ablösbarkeit der Polyamidschicht durch Salzsäure (V 2.5.3). Bei der Spaltung von PA-6 in Monomere handelt es sich um den säurekatalysierten Angriff eines Wassermoleküls. Die beiden funktionellen Gruppen des Monomeren bilden sich zurück (V 2.5.7). Diese Bindungsspaltung bietet den Zugang zu einem Reaktionsmechanismus, welcher der Spaltung einer Peptidbindung entspricht. Allerdings wird der Reaktionsmechanismus dieses Vorgangs in Lehrbüchern und Schulbüchern bisher nicht ausführlich dargestellt [92, S. 293].

Die Steifigkeit bzw. Zugfestigkeit der Folie ist auf Polyamid zurückzuführen. Nach Entfernen der Polyamidfolie lässt sich die verbleibende PE-LD-Folie sehr weit ausdehnen (V 2.5.3). Zu den einzelnen Komponenten wurden Spannungs-Dehnungs-Diagramme erstellt (V 2.15). Die Ursache ist bei den unterschiedlichen zwischenmolekularen Kräften der Polymere zu suchen. Während bei Polyethylen ausschließlich die relativ schwachen Van-der-Waals-Kräfte vorliegen, findet man bei den Polyamiden aufgrund des stark polaren Charakters der -CONH-Gruppe zwischen benachbarten Molekülketten Wasserstoffbrückenbildungen (Abb. 33).

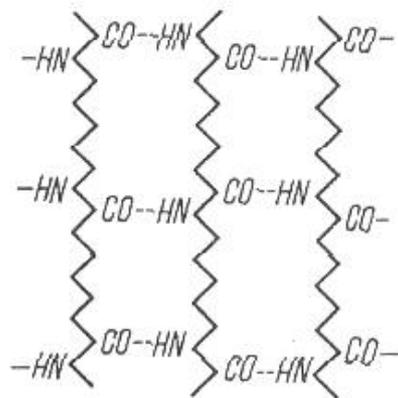


Abbildung 33: Wasserstoffbrückenbindung in einem Polyamid, PA 6 (nach [93, S. 465])

Diese Bindungen sind für die Zähigkeit, die Temperaturstandfestigkeit und den hohen Elastizitätsmodul verantwortlich. Mit größer werdendem Abstand, also mit zunehmender Zahl von  $\text{CH}_2$ -Gruppen zwischen den Amidgruppen nehmen die zwischenmolekularen Kräfte ab [93, S. 465]. Somit wird deutlich, dass bei der Käsefolie (PA/PE) die Polyamidschicht für die Zähigkeit und Festigkeit verantwortlich ist. Der stärkere Zusammenhalt der Moleküle im Polyamid ist auch im Zusammenhang mit dem hohen Schmelzbereich von 215-225 °C zu sehen (V 2.5.6).

Der Zusammenhalt des unpolaren Polyethylens und des polaren Polyamids wird durch einen Haftvermittler ermöglicht. Die Schichtung dieser Materialien ist in Abb. 34 dargestellt.

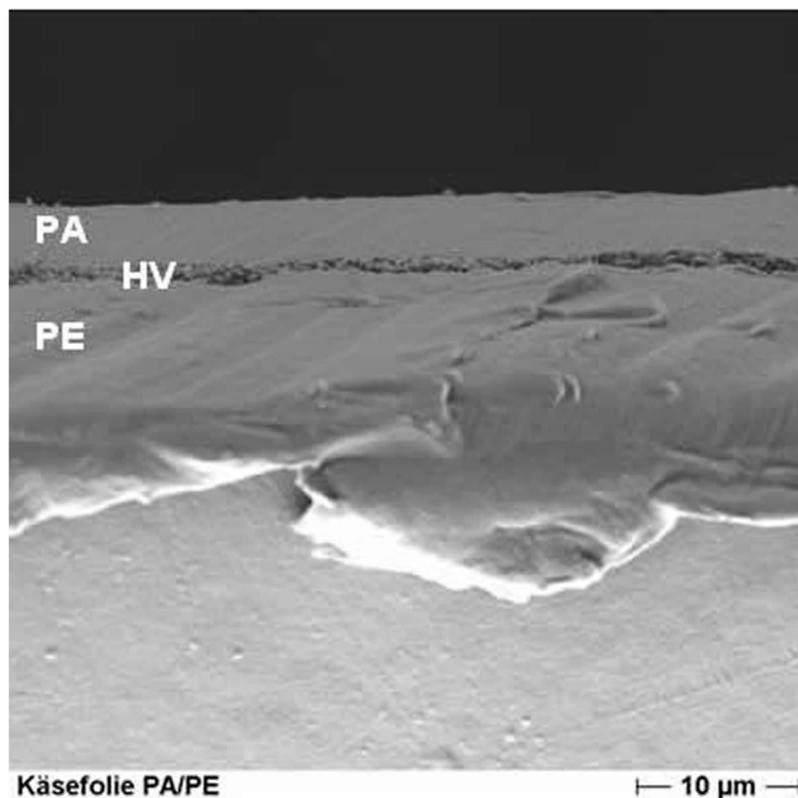


Abbildung 34: Schnitt durch eine Verbundfolie; PA = Polyamid, PE = Polyethylen, HV = Haftvermittler (Elektronenmikroskopische Aufnahme)

Die beiden Bestandteile Polyamid (außen) und Polyethylen (innen) lassen sich nach einwirkung von konzentrierter Essigsäure trennen. Dies gelingt mit kleinen Folienstücken (V 2.5.5). In der folgenden Tab. 22 wird abschließend eine Zusammenfassung über Experimente mit einer Verbundfolie dargestellt.

Tabelle 22: Zusammenstellung von Experimenten, welche den Zusammenhang zwischen Struktur und Eigenschaften am Beispiel einer Verbundfolie (PA-6/PE-LD) verdeutlichen

<b>Erwünschte Funktion der Folie</b>	<b>Untersuchte Eigenschaft</b>	<b>Hinweise zum Experiment</b>	<b>Versuch Nr.</b>
Schutz vor Oxidation	Sauerstoffdichtheit, Sauerstoffdurchlässigkeit	Polares PA als Sauerstoffbarriere	V 4.1.2
Schutz vor Austrocknung	Wasserdampfdichtheit, Wasserdampfdurchlässigkeit	Unpolares PE-LD als Wasserdampfbarriere	V 4.3
Schutz vor Aromaverlust	Durchlässigkeit des lipophilen Farbstoffes Sudanrot 7 B	Polares PA als Barriere	V 4.4
Steifigkeit	Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Elastizitätsmodul	Dehnbarkeit der PE-Folie	V 2.5.3
		Hoher Elastizitätsmodul von PA (Wasserstoffbrücken)	V 2.15
PE in Kontakt zum Lebensmittel (PA außen)	Selektive Anfärbbarkeit von PA mit Säurefarbstoff	Polarität von PA, Säureamid-Gruppen	V 2.5.2
	Anlösbarkeit von PA mit konz. Salzsäure		V 2.5.3
	Zerlegung von Polyamid durch saure Hydrolyse		V 2.5.7
Zusammenhalt der beiden Schichten	Trennung der beiden Schichten PA und PE	Angreifbarkeit des Haftmittlers durch konz. Essigsäure	V 2.5.5

#### 10.4 Zusammenfassende Bewertung des Struktur-Eigenschaften-Konzeptes

Es lässt sich mit dieser Arbeit zeigen, dass das Struktur-Eigenschaften-Konzept einen geeigneten Ansatz bietet, die Erkenntnisgewinnung über Bau und Funktion der Stoffgruppen Metall, Glas und Makromoleküle zu fördern. Die Eigenschaften der drei Stoffgruppen werden vergleichend hervorgehoben. Den Schülern und Schülerinnen wird zu allen verwendeten Verpackungsmaterialien die Möglichkeit eröffnet, mit Grundkenntnissen über den Aufbau der Stoffe Schlüsse zu ziehen über deren Funktion und damit über deren gezielte Verwendung als Packstoff. Auch die begründete Formulierung von Hypothesen über mögliche chemische Reaktionen ist mit diesen Kenntnissen möglich. Andererseits können Kenntnisse über bestimmte erwünschte Funktionen sowie Ergebnisse gezielter experimenteller Untersuchungen Rückschlüsse zulassen über den Aufbau und damit über die Struktur vorliegender Packstoffe. Dieses Durchschreiten verschiedener Betrachtungsebenen ermöglicht unter Einbeziehung der

jeweiligen Experimente vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten des Chemieunterrichts. Nachfolgend ist eine Auswahl an strukturellen Kennzeichen dreier unterschiedlicher Stoffklassen aufgeführt (Tab. 23).

Tabelle 23: Vergleich der im Verpackungsbereich häufig verwendeten Stoffklassen Metall, Kunststoff und Glas hinsichtlich verschiedener Eigenschaften [86, S. 79 f.], [94, S. 42, 118], [18, S. 28], [24, S. 131], [95, S. 45], [96, S. 99, 101], [97, S. 147] [98, S. 364]

Eigenschaft	Verpackungsmaterial		
	Metall (Fe, Al)	Kunststoff (Thermoplast)	Kalk-Natron-Glas
Chemische Bindung	Metallbindung	Atombindung	Atombindung und Ionenbindung
Klassifizierung der elektrischen Leitfähigkeit bei Gebrauchstemperatur	Leiter (Elektronentransport)	Isolator (Elektronen nicht frei beweglich)	Isolator (Ionen nicht frei beweglich)
Struktur	Kristallin (polykristallines Gefüge), Metallgitter (pos. Atomrümpfe)	Amorph mit unterschiedlichem Anteil an Kristalliten	Amorph (Reste des SiO <sub>2</sub> -Gitters mit Atombindungen als Netzwerk)
Anziehungskräfte	Anziehungskräfte nicht gerichtet, elektrische Kräfte zwischen Atomrümpfen und Elektronen	Zwischenmolekulare Kräfte: Van-der-Waals-Kräfte (geringfügige Verschiebungen der Elektronenhüllen)	Netzwerk mit ioni-schen Wechselwirkungen zwischen Na <sup>+</sup> -Ionen, Ca <sup>2+</sup> -Ionen und Silicat-Ionen
Verformbarkeit bei Gebrauchstemperatur	Metallrümpfe und Elektronen lassen sich leicht gegeneinander verschieben	Verformbar (Molekülketten lassen sich gegeneinander verschieben) oder spröde (im Glaszustand)	Glaszustand, spröde
Elastizitätsmodul (in kN/mm <sup>2</sup> )	74 (Al), 210 (Fe/Stahl)	0,13-0,40 (PE-LD), 1 (PA-6)	60-80
Schmelztemperatur, Schmelzbereich, Erweichungspunkt (in °C)	660 (Al) 1535 (Fe)	ca. 120 (PE-LD) 215-225 (PA-6)	540-580

PFEIFER (2007) stuft dieses Konzept, welches die Verbindungen „zwischen der Struktur atomarer Dimension und direkt handhabbarer Stoffportionen“ eröffnet als „didaktische Grundstruktur“ ein, welche zu einer der Leitlinien des Chemieunterrichts mit richtungsweisender Bedeutung geworden ist. Er zählt dieses Konzept zum „elementaren didaktischen Handwerkszeug“ und wertet es als „durchgängiges Prinzip für die Vertikalstruktur des zu vermittelnden Wissens“ [99]. Dabei beruft sich Pfeifer auch auf die „Empfehlungen zur Gestaltung von Lehrplänen bzw. Richtlinien für den Chemieunterricht“ [100]. PFEIFER (2007) fordert weiterhin stets die Suche nach „konkreten Bezügen zu den jeweiligen Substanzen“. Dieser Zusammenhang ist notwendig, um Fortschritte im Verständnis der Lernvorgänge fördern zu können. „Schulchemie darf eben keine bloße Molekülchemie sein.“ Der Zusammenhang zwischen Stoff, Struktur und Eigenschaften sollte als Bezugsebene immer bereit stehen,

damit es den Lernenden stets möglich ist „exemplarisch“ Verständnis zu gewinnen für die materielle Umwelt in Natur, Technik und Umwelt [99].

Auch DEMUTH (2007) spricht der Spannweite zwischen makroskopischem und submikroskopischem Bereich der Stoffe eine besondere Bedeutung zu und fordert entsprechende Konsequenzen für den Unterricht: „In keiner anderen Naturwissenschaft wird der Wechsel der Betrachtungsebenen so vorgenommen wie in der Chemie, weshalb er auch als Arbeitsweise im Chemieunterricht zu schulen ist. Ergebnisse zahlreicher Untersuchungen belegen die Schwierigkeiten, die Schülerinnen und Schüler mit der Vorgehensweise haben und machen deutlich, wie wichtig die strikte Trennung von Realitätsebene und Modellebene ist“ [101]. Letztlich bleibt aber „die Deutung von makroskopischen Eigenschaften von Stoffen durch Strukturen auf Teilchenebene“ eines der „durchgängigen Anliegen des Chemieunterrichts“ [102]. Es stellt sich nun die Frage, mit welchen Unterrichtsverfahren und mit welchen begründeten Schwerpunkten dieses Struktur-Eigenschafts-Konzept im Unterricht aufschlussreich berücksichtigt werden kann.

## 11 Ausgewählte Unterrichtseinheiten des Themas „Lebensmittelverpackungen“ im Rahmen verschiedener Unterrichtsverfahren.

Entsprechend den eingangs aufgestellten Forderungen nach einer Verbesserung des Chemieunterrichts erscheint es sinnvoll, nicht nur inhaltlich angemessen auf Interessen und Fähigkeiten der Schüler flexibler zu reagieren, sondern auch bei der jeweiligen Wahl des Unterrichtsverfahrens bewusste und umsichtige Entscheidungen zu treffen. Zunächst sollen die in diesem Kapitel aufgeführten Unterrichtsverfahren kurz charakterisiert werden.

### Forschend-entwickelndes Unterrichtsverfahren

Das „Forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren“ nach SCHMIDKUNZ/LINDEMANN (1981) gliedert sich in fünf „Denkstufen“, die wiederum in „Denkphasen“ unterteilt werden [103, S. 12-21]. Die gut überschaubare Struktur ist nicht starr, sondern kann sich flexibel an gegebene Wissensvoraussetzungen der Lernenden anpassen, wobei das „didaktisch wichtige Prinzip der immanenten Wiederholung“ beachtet wird [103, S. 30].

Die Problemerkennntnis, welche am Ende der Phase der Problemgewinnung steht, ist der Ausgangspunkt für die weiteren Arbeitsvorhaben. Dabei ist in den weiteren Denkstufen die Problemlösung das wesentliche Ziel der unterrichtlichen Interaktionen. Dem Experiment kommen nach SCHMIDKUNZ/LINDEMANN (1981) im Laufe des Erkenntnisprozesses unterschiedliche didaktische Funktionen zu [103, S. 19-26]. Die fünf Denkstufen mit den Experimenten unterschiedlicher Funktionen in den zugehörigen Denkphasen sind nachfolgend aufgeführt (Tab. 24).

Tabelle 24: Denkstufen des Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens unter besonderer Berücksichtigung des Experiments und seiner Funktion in verschiedenen Denkphasen [103, S. 19-26]

<b>Denkphase</b>	<b>Art des Experiments</b>	<b>Funktion des Experiments</b>
1. Problemgewinnung	Einführungsexperiment	Vorstellung des Problemgrundes
2. Überlegungen zur Problemlösung	Bestätigungsexperiment	Verifizierung oder Falsifizierung des zur Problemlösung angestrebten Weges
3. Durchführung eines Lösungsvorschlages	Bestätigungsexperiment	Verifizierung oder Falsifizierung der grundsätzlichen Hypothesen zur Problemlösung
	Weiterführendes Experiment	Präzisierung der Erkenntnisgewinnung, Förderung des Denkprozesses
4. Abstraktion der gewonnenen Erkenntnisse	-	-
5. Wissenssicherung	Wiederholungsexperiment	Wissenssicherung
	Anwendungsexperiment	Förderung von fächerübergreifendem Wissen

Der Verbindung von Experimenten und Denkprozessen wird eine „integrative“ Wirkung zugeschrieben, wobei die Lernenden darin gefördert werden, ihre Fähigkeit zur Erkenntnisgewinnung zu entwickeln. Die Entwicklung der Selbstständigkeit in der Erarbeitung von Er-

kenntnissen hilft, erarbeitetes Wissen in das Langzeitgedächtnis zu überführen. Ein weiterer Vorteil ist, dass dieses Verfahren in allen Altersstufen durchgeführt werden kann. „Die Lehrereinheit sollte so aufgebaut werden, dass die Lösung eines Problems genetisch ein neues Problem erkennen lässt, das den Denkprozess weiter vorantreibt“ [103, S. 30 f.].

### Chemie im Kontext

Die Unterrichtskonzeption „Chemie im Kontext“ bietet eine Vielfalt an Möglichkeiten, dem Experiment eine zentrale Rolle bei der Motivierung der Lernenden zukommen zu lassen, wodurch sie zur Entwicklung von Hypothesen geradezu herausgefordert werden. Dazu äußern sich HUNTEMANN/PASCHMANN/PARCHMANN/RALLE (1999) folgendermaßen: „Die besonderen fachdidaktischen Herausforderungen liegen zum einen in der Gestaltung einer sinnvollen Symbiose zwischen fachsystematischer Notwendigkeit und der gewünschten Kontextorientierung zum anderen aber auch in dem Wechselspiel von konzeptioneller Entwicklung, empirischer Überprüfung und daraus resultierender Überarbeitung“ [104]. Unter Berücksichtigung des Lebensweltbezugs, der Vernetzung fachimmanenter Inhalte und der Förderung der Selbstverantwortung der Lernenden werden die Unterrichtseinheiten dieses Konzeptes in vier Phasen unterteilt: 1. Begegnungsphase, 2. Neugierphase, 3. Erarbeitungsphase, 4. Vertiefungs- und Vernetzungsphase.

### Das Analytisch-synthetische Verfahren

Beim „Analytisch-synthetischen Verfahren“ handelt es sich um ein eigenständiges Unterrichtsverfahren, auch „ganzheitlich-analytisches“ Verfahren genannt, bei dem das „technische Gerät oder der technische Vorgang eine zentrale Stellung“ einnimmt. Dieses unter Verweis auf HOLLA von PFEIFER/LUTZ/BADER (2002) vorgestellte Verfahren lässt sich in fünf ausgeführte Stufen gliedern [45, S. 223]. Diese sind: 1. Problemgewinnung, 2. Technische Analyse, 3. Analyse der Grundprobleme, 4. Bearbeitung von Nebenproblemen, 5. Synthetische Betrachtung. Die Einsicht in die am technischen Gerät erschließbare Naturgesetzmäßigkeit wird „durch analytisches Denken und Vorgehen“ gewonnen. Im Rahmen der abschließenden „Synthetischen Betrachtung“ kann das vorher zerlegte Gerät wieder zusammengebaut bzw. seine technische Leistungsfähigkeit analysiert werden.

### Expertenunterricht

Die von DLABAL und BADER vorgestellte Unterrichtsmethode des „Expertenunterrichtes“ eignet sich nicht nur dazu, Schüler und Schülerinnen zu aktivieren sondern bietet gleichzeitig die Perspektive, sie für eine längere Unterrichtssequenz verbindlich eine selbst gewählte Verantwortung – innerhalb eines alltagsbezogenen Themas - übernehmen zu lassen. In dieser erfahrungsgemäß besonders für die Sekundarstufe I geeigneten Unterrichtsform sind alle Lernenden Teil eines Expertenteams und übernehmen in dieser Funktion die Rolle des Lehrenden. Dabei wird deutlich, in welchem Ausmaß Schüler ein Thema verstanden haben.

Es sollten möglichst einfache Experimente durchgeführt werden, welche gut als „Laienübung“ zu bewältigen sind. Die Experimente werden vom Lehrer vorgegeben, welcher außerdem Inhalte, Lernmaterial und Gruppengröße bestimmt. Nach DLABAL und BADER setzt sich der schematische Ablauf des „Expertenunterrichtes“ aus fünf Phasen zusammen [45, S. 230 f.]. Diese sind: 1. Themenauswahl und Auswahl der Experten, 2. Vorbereitung der Expertenteams, 3. Vortrag der Expertenteams (Schüler übernehmen Lehrfunktion des Lehrers), 4. Laienübungen, betreut durch Experten, 5. Korrektur von Protokollen durch Experten und Feedback an den Laien.

Der Lehrer hat während der Gruppenarbeitsphasen Zeit, sich über Lernfortschritte jedes Einzelnen ein Bild zu machen. Die Schüler hingegen haben durch das angewandte und wiederholende Erklären Gelegenheit, fachlich sicherer zu werden.

### Wahldifferenzierter Chemieunterricht

Kennzeichnend für den von WOEST (2002) vorgestellten „Wahldifferenzierten Chemieunterricht“ ist, dass „Schüler innerhalb eines vorgegebenen Rahmens wählen können, in welcher Reihenfolge, wie intensiv und mit wem sie welche Teilthematik bearbeiten wollen. Die Öffnung des Unterrichts wird dabei als Prozess verstanden, der bewusst darauf verzichtet, alle Schüler in gleicher Weise zu behandeln“ [45, S. 224]. Dazu werden die verbindlichen Lehrplanvorgaben eingehalten, während alle Freiräume genutzt werden, um die Aktivität der Schüler in einer arbeitsteiligen Gruppenarbeit zu fördern. Durch die Wahl von „Alltagsthemen“ sollen „Lern- und Handlungsanlässe auch für die bisher wenig an Chemie interessierten Schüler geschaffen werden“ [45, S. 224].

Der Verlauf einer typischen Unterrichtseinheit im Wahldifferenzierten Chemieunterricht ist nach WOEST (2002) in drei Phasen gegliedert [45, S. 224-230]:

- Einführung in das Thema: Themenvorstellung, Fragen der Schüler und Bearbeitung wichtiger Lerninhalte (Fundamentum)
- Freies Arbeiten: Bearbeitung der angebotenen Themen durch die Schüler in Gruppenarbeit, Sichtung des vielfältigen Lernmaterials (Recherchen und Experimente)
- Auswertung/Zusammenfassung: Vorstellung der Arbeitsergebnisse.

Die Fundamentumsphase ist als normaler Unterricht zu verstehen und dient der Information. Dadurch wird für die nachfolgenden Arbeitsschritte ein verbindliches einheitliches Vorwissen als Basis garantiert. Während dabei die klassisch-chemische Betrachtung der Lerngegenstände für die Schüler in den Hintergrund tritt, werden neben dem Experimentieren die Bezüge zum Alltag für die Schüler die bestimmenden Elemente [45, S. 228]. Dementsprechend werden nicht nur experimentell orientierte Gruppen eingerichtet, sondern auch Gruppen, die sich mit den zahlreichen fachübergreifenden Teilthemen und Alltagsbezügen befassen.

### Projektunterricht

Die Projektmethode wurde von DEMUTH als „4-Stufen-Plan“ entwickelt [45, S. 216-223]. Dieser gliedert sich in: 1. die Stufe der Anregung, 2. die Stufe der gemeinsamen Planung, 3. die Stufe der Ausführung, 4. die Stufe der Sicherung des Ergebnisses.

In der Stufe der Anregung (1) wird in einer Diskussion darüber entschieden, ob ein in der Lebenswelt angesiedeltes Problem erforscht werden soll. Auf der Stufe der gemeinsamen Planung (2) entscheidet die Lerngruppe über Zielsetzung und konkrete Vorgehensweisen, wobei die Fächergrenzen überwunden werden können. Am Ende dieser Phase liegt ein „Projektplan“ vor, welcher alle Aktivitäten umfasst. Die Stufe der Ausführung (3) richtet sich nach den Vorgaben des Projektplanes. Sie ist gekennzeichnet durch eigenverantwortliches Handeln der Teilnehmer. Für die Stufe der Ergebnissicherung (4) wird idealerweise ein konkretes Produkt angesteuert. Dieses Ergebnis wird anschließend mit der Ausgangssituation verglichen, um den Erfolg beurteilen zu können.

Nachfolgend wird eine Auswahl möglicher Unterrichtseinheiten zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ im Lichte verschiedener Unterrichtsverfahren vorgestellt. Die dort erwähnten Versuche beziehen sich auf Experimentiervorschriften aus dem Kapitel „Experimenteller Teil“ dieser Arbeit.

Es handelt sich nicht um vollständig selbst durchgeführte Unterrichtsstunden, sondern um Entwürfe. Viele der skizzierten Elemente basieren jedoch auf eigener Unterrichtserfahrung.

## 11.1 Thema 1: „Untersuchung des Aufbaus einer aus mehreren Komponenten bestehenden Folie“ (Forschend-entwickelndes Unterrichtsverfahren)

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Säuren und Laugen, Atombindung, Kohlenstoffchemie, funktionelle Gruppen, selektive Lösungsmittel, Makromoleküle

### 1. Problemgewinnung

#### 1a) Problemgrund

Unverpackte Nahrungsmittel wie z.B. Schnittkäse sind nach mehrwöchiger Lagerung im Kühlschrank nicht mehr genießbar. Möglicherweise kann ein Foto von verdorbener Ware gezeigt werden. Auch ein Hinweis dahingehend ist denkbar, dass ein angeschnittener Apfel an der frei an der Luft liegenden Schnittfläche schon nach kurzer Zeit braun anläuft. Die Schüler können nun weitere Beispiele für den Verderb von Nahrungsmitteln ohne Verpackung nennen.

#### 1b) Problemerkennung/Problemfindung/Problemstellung

Es muss den Lernenden bewusst werden, dass Lebensmittelverpackungen unverzichtbar sind, gerade bei längeren Lagerzeiten angesichts eines globalen Warenstroms. Gegebenenfalls muss den Schülern mitgeteilt werden, dass eine Käseverpackung Sauerstoff und Keime fernhalten und gleichzeitig wasserdampfdicht verschließen muss. Dem Material kommen also vielfältige Aufgaben zu. Offenbar können nicht alle Materialien diese Funktionen erfüllen. Zur Problemstellung sollten verschiedene ausgewählte Kunststoff-Folien präsentiert werden, darunter eine aus Polyethylen (PE-LD) sowie mehrschichtige Folien, darunter eine mit der Aufschrift PA/PE. (Eine reine Polyamid-Folie ist aus dem Verpackungsbereich nicht erhältlich.)

#### 1c) Problemerkennung - Problemformulierung

Es kann hier ein Hinweis auf die verschiedenen Packstoffe und deren Kombinationen erfolgen. Im vorliegenden Fall sind Polyamid und Polyethylen als Hauptbestandteile der Folie bekannt. – Nun kann die Problemstellung formuliert werden:

- Wie sind diese Stoffe PA und PE in der Folie verarbeitet?
- Wie muss eine Folie aufgebaut sein, damit sie mehrere Aufgaben erfüllen kann?

### 2. Überlegungen zur Problemlösung

#### 2a) Analyse des Problems

Der Aufbau der Folie mit ihren kombinierten Bestandteilen muss ermittelt und die Bestandteile müssen nachgewiesen werden.

Es stellt sich daher die Fragen:

- Handelt es sich bei der Materialkombination um eine Monofolie, um ein Polymerisat, um ein Blend (Gemisch) oder um eine Mehrschicht-Folie?
- Eine Reaktion sollte möglichst nur mit einer der Komponenten stattfinden.

#### 2b) Lösungsvorschläge

Die Vorschläge werden gesammelt und an die Tafel geschrieben.

Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung:

- (1) Dichte (nach V 2.6, nach V 2.2)
- (2) Schmelzbereich/Erweichungsbereich (V 2.5.5, V 2.5.6)
- (3) Verbrennungsverhalten/Pyrolysedämpfe (nach V 2.2, V 2.5.1)
- (4) Stabilität gegenüber Säuren und Laugen (V 2.5.3)
- (5) Selektive Anfärbbarkeit (V 2.5.2)

(6) Nachweis für Polyamid (V 2.5.4)

(7) Stabilität gegenüber organischen Lösungsmitteln (Ethanol, Aceton, Toluol, nach V 2.2, nach V 2.6)

### 2c) Entscheidung für einen Lösungsvorschlag

Angesichts einer möglichen Materialkombination (z.B. PA/PE) ist eine selektive Reaktion des Materials bzw. der Materialkomponenten nicht auszuschließen. Unterschiedliche Materialien könnten jedoch unterschiedliche Dichten und Schmelzbereiche besitzen. Die Pyrolysedämpfe von beiden Komponenten könnten sich vermischen und ein mögliches verwertbares Ergebnis verschleiern. Trotzdem steht es dem Lehrer hier frei, eine Probe zur Dichte, zum Schmelzbereich und zu den Pyrolysegasen – auch parallel - durchführen zu lassen. Letztlich bieten sich jedoch folgende Experimente als Testverfahren an:

- Angreifbarkeit durch Säuren oder Laugen (V 2.5.3)
- Versuch des selektiven Anfärbens (V 2.5.2)
- Bei Bedarf Reaktion mit den bereit gestellten organischen Lösungsmitteln (nach V 2.2, nach V 2.6)

### 3. Durchführung eines Lösungsvorschlages

#### 3a) Planung des Lösungsvorhabens

- Prinzipiell können Planung und Durchführung in mehreren Gruppen parallel erfolgen, wenn der zeitliche Rahmen und die räumlichen Bedingungen es zulassen.
- Geht man die Vorschläge der Reihe nach durch, dann sollte zunächst die Folie in Säure bzw. Lauge gelegt werden, da diese Lösungen schon seit dem zweiten Unterrichtsjahr Chemie bekannt sind.

#### 3b) Praktische Durchführung des Lösungsvorhabens

- Einbringen der Folie in konz. Salzsäure ( $w=25\%$ , V 2.5.3)
- Einbringen der Folie in halbkonz. Natronlauge ( $w=20\%$ )
- Die Folien werden mit einer Kunststoff-Pinzette in die Prüflösung eingebracht und anschließend in einer Schale mit dest. Wasser gespült.

Ergebnis: Durch die Säure wird eine Seite der Folie angelöst, die andere Seite wird davon nicht beeinflusst. Die von der Säure angegriffene Schicht lässt sich sogar mit dem Daumen nagel abreiben. Die übrig bleibende Schicht lässt sich ohne großen Kraftaufwand dehnen. Von Natronlauge hingegen wird die Folie nicht angegriffen.

#### 3c) Diskussion der Ergebnisse

- Die Ergebnisse sprechen dafür, dass diese Folie aus zwei Schichten aufgebaut ist, von denen eine polar sein muss, da sie von der polaren salzsauren Lösung leicht angegriffen wird. Die andere, nicht angegriffene Schicht muss hingegen unpolar sein.
- Zurück zu 2b): Es kann nun als Bestätigungsexperiment überprüft werden, ob auch andere polare Substanzen, wie polare Farbstoffe bzw. Lebensmittelfarbstoffe an der polaren Kunststoffschicht haften bleiben (V 2.5.2). Dazu müssen wieder Lösungsvorschläge eingesammelt werden (2c): Es kann hier vom Lehrer vorgegeben werden, dass als Säurefarbstoff z.B. der Lebensmittelfarbstoff Cochenillerot A fungieren kann oder auch der Lebensmittelfarbstoff Patentblau V. Darauf muss das Lösevorhaben geplant werden (3a). Hier besteht nochmals die Möglichkeit, Innen- und Außenseite der Folie zu identifizieren, wobei beide Seiten mit Tesafilm beklebt werden können, um die Anfärbung zu testen. Als Ergebnis (3c) zeigt sich wiederum, dass nur die äußere Schicht gefärbt ist, und nach dem Abnehmen des Tesafilms die entsprechende ungefärbte Fläche zurück bleibt.

- Zurück zu 2b): in der gleichen „Wiederholungsschleife“ können nun auch Lösungsversuche mit heißem Toluol durchgeführt werden, wodurch das Polyethylen abgelöst werden kann und dessen unpolarer Charakter bestätigt wird (V 2.6).
- Zurück zu 2b): Polyamid kann mit Dimethylaminobenzaldehyd nachgewiesen werden (Bestätigungsexperiment, V 2.5.4).
- Zurück zu 2b): Durch Säureeinwirkung erhaltene abgeriebene Stücke können mit einem Schmelzpunktbestimmungsgerät als PA-6 identifiziert werden (Bestätigungsexperiment).
- Zurück zu 2b): Unterzieht man die Folie in ihrer Gesamtheit der Pyrolyse, so zeigen die Dämpfe eine alkalische Reaktion, womit das Vorhandensein von Polyamid nachgewiesen ist (Bestätigungsexperiment, V 2.5.1).
- Zurück zu 2b): Wiederum in einer „Wiederholungsschleife“ kann man als Vorbereitung für die nachfolgende Auswertung die Folie in konzentrierte Essigsäure legen, worauf sich die beiden Schichten PA und PE voneinander trennen lassen (V 2.5.5).
- Zurück zu 2b): Auch ein Ergebnis mit negativem Ausgang, wie z.B. das Versetzen der Folie mit Natronlauge kann rückwirkend zu einer Modifizierung der Lösungsvorschläge (2b) und zu einer neuen Entscheidungsfindung für einen Lösungsvorschlag (2c) führen.

#### 4. Abstraktion der gewonnenen Erkenntnisse

##### 4a) Grafische Abstraktion

Der gefundene Sachverhalt kann als Grafik dargestellt werden, indem man von einem Schichtenmodell ausgeht, wobei die äußere Schicht nach oben zeigt:

Außen: Polarer Kunststoff (Polyamid)

-----  
Innen: Unpolarer Kunststoff (Polyethylen)

##### 4b) Verbale Abstraktion:

Es bietet sich die Möglichkeit an, den Weg der Erkenntnisgewinnung bis zum vorliegenden Befund wiederholen zu lassen. Außerdem kann darauf hingewiesen werden, dass prinzipiell die unpolare Schicht am Lebensmittel liegen sollte, damit es nicht zu Wechselwirkungen zwischen Packstoff und Füllgut kommt. Entsprechend sollte problematisiert werden, was geschähe, wenn die säureempfindliche Schicht mit dem Füllgut Kontakt hätte. Spätestens am Schluss dieser Abstraktionsphase muss thematisiert werden, wie es zu einer Haftung der beiden Schichten mit völlig unterschiedlicher Polarität kommen kann. Auf das Vorhandensein einer Haftvermittler-Schicht muss der Lehrer hinweisen und die grafische Darstellung entsprechend ergänzen.

##### 4c) Mathematische Abstraktion

- Da hier nicht die Funktionen, sondern Materialien selbst untersucht werden, bietet sich nach der möglicherweise vorgenommenen Trennung der Materialien eine Messung der Schichtdicke der Folie bzw. ihrer gereinigten Komponenten mit Hilfe einer Mikrometerschraube an. Dazu kann unter Rückgriff auf die Denkstufe 3 ein Präzisierungsexperiment vorgenommen werden, wonach quantifizierbare Befunde zu erwarten sind. Erfahrungsgemäß liegen die Schichtdicken bei jeweils etwa 30 µm.
- Als Weiterführung der Abstraktion können auch quantifizierbare Aspekte des Begriffs der chemischen Bindung aufgegriffen werden. Dazu bietet es sich an, den Begriff der polaren Atombindung unter Verwendung der Elektronegativitätswerte und ihrer Differenzen zu erörtern.
- Hier kann auf die Anzahl der Monomere eingegangen werden, aus denen ein Makromolekül zusammengesetzt ist.

- Auch der Elastizitätsmodul kann hier als fächerübergreifender Ansatz thematisiert werden: Die Gesamtfolie besitzt einen großen, die verbleibende dehnbare Polyethylen-Schicht nur einen kleinen Wert.

## 5. Wissenssicherung

### 5a) Anwendungsbeispiele

- Die Verwendung der Kombination PA/PE als Verpackungsfolie bei Wurst, Fleisch und Baguettes sollte erwähnt werden.
- Den Schülern kann hier mitgeteilt werden, dass es „die“ Lebensmittelverpackung schlechthin nicht gibt und dass die sorgfältig ausgewählten Schichten unterschiedliche Aufgaben besitzen, wobei sie sich nur in ihrer Kombination zu einem gewünschten Eigenschaftsprofil ergänzen. Dabei dient das unpolare Polyethylen (PE-LD) als Barriere gegen Wasserdampfaustritt, wobei die polaren Wassermoleküle nur geringfügig hindurch gelassen werden. Das polare Polyamid (PA-6) hingegen dient als Barriere gegen den Eintritt der Sauerstoffmoleküle. Außerdem bewirkt es die hohe Dehnungsfestigkeit der Gesamtfolie. Im Rahmen des „Struktur-Eigenschafts-Konzeptes“ kann hier eine Brücke geschlagen werden zwischen der Teilchenebene und der makroskopischen Phänomenebene der beobachtbaren Eigenschaften.
- Es besteht auch die Möglichkeit, in dieser Phase ein „Anwendungsexperiment“ durchzuführen, so beispielsweise zur selektiven Anfärbbarkeit, falls dies vorher noch nicht geschehen sein sollte. Schließlich kann auch die Eignung des Farbstoffes selbst thematisiert werden.
- Auch die Möglichkeit anderer Materialkombinationen, wie PE/PET sollten hier erwähnt werden. Die Funktionsverteilung ist ähnlich gelagert.
- Schüler können nach weiteren Materialkombinationen suchen oder es können Exemplare von Verpackungsfolien vorsorglich mitgebracht werden. Hier sollten auch Folien erwähnt werden, welche eine Aluminiumschicht enthalten.
- Falls vorhanden, kann auch ein rasterelektronenmikroskopisches Foto eines Folienquerschnitts gezeigt werden.

### 5b) Wiederholung

In dieser Phase sollten alle Nachweise für die beiden Kunststoffe genannt und erläutert werden. Die Übersicht sollte als Aufzählung an der Tafel festgehalten werden. Die Erläuterung der Bindungsverhältnisse in den Makromolekülen muss von den Lernenden erwartet werden können. Es besteht alternativ oder ergänzend die Möglichkeit, eine „mind-map“ oder „concept-map“ zur vertiefenden Ordnung der verwendeten Begriffe anfertigen zu lassen.

### 5c) Lernzielkontrolle

Diese kann durchgeführt werden als mündliche oder schriftliche Kontrolle, beispielsweise im Rahmen einer Klassenarbeit oder Klausur. Unter Beachtung der Lehrpläne müssen die Themen „Atombindung“ und „Kunststoffe“ bearbeitet werden. Die folgende Tab. 25 fasst vereinfachend die oben ausgeführten Stufen des Unterrichtsfortganges zusammen.

Tabelle 25: Ermittlung des Aufbaus einer aus mehreren Komponenten bestehenden Folie mit Hilfe des Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens (EE: Einführungsexperiment, BE: Bestätigungsexperiment, E: Experiment im Rahmen des Lösungsvorhabens, WE: Weiterführendes Experiment)

<b>Denkstufen</b>	<b>Aktivitäten in verschiedenen Denkphasen</b>
1. Problemgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vorstellung einer Käsefolie mit dem Aufdruck „PA/PE“</li> <li>▪ EE/BE: Nachweis von PA mit Hilfe der Pyrolysegase (V 2.5.1)</li> <li>▪ Wie sind PA und PE in der Folie verarbeitet? (Copolymerisat, Blend oder Verbund?)</li> </ul>
2. Überlegungen zur Problemlösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Spezifische Nachweise, Dichte, Pyrolysegase, Angreifbarkeit durch Säure oder Lauge, Säurefarbstoff, Schmelzbereich</li> </ul>
3. Durchführung eines Lösungsvorschlags	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ E: Selektive Anfärbbarkeit von PA (Lebensmittelfarbstoff Cochenille-rot A, V 2.5.2)</li> <li>▪ E: Angreifbarkeit von PA durch Säuren (Konz. Salzsäure, w=25%, V 2.5.3)</li> </ul>
4. Abstraktion der gewonnenen Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schichtenaufbau (PA außen, PE innen)</li> <li>▪ WE: Bestimmung des Schmelzbereiches der PA-Probe (PA-6, V 2.5.6)</li> <li>▪ Strukturformeln der Monomeren und Polymeren von PA-6 und PE-LD</li> <li>▪ PA-6 als polarer, PE-LD als unpolarer Kunststoff</li> <li>▪ Hydrolytische Spaltung von PA-6 (Reaktionsmechanismus)</li> </ul>
5. Wissenssicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PA-6 als Barriere gegen Sauerstoff, PE-LD als Barriere gegen Wasserdampf</li> <li>▪ Reaktionsmechanismus der Entstehung der Makromoleküle</li> <li>▪ Wiederholung des Struktur-Eigenschaften-Prinzips (Formel/Stoff)</li> </ul>

## 11.2 Thema 2: „Untersuchung einer aluminiumhaltigen Folie“ (Forschend-entwickelndes Unterrichtsverfahren)

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Säuren und Laugen, metallische Bindung („Elektronengasmodell“), Allgemeine Zustandsgleichung der Gase, Komplexchemie, selektive Lösungsmittel

### 1. Problemgewinnung

#### 1a) Problemgrund

Es werden verschiedene Verpackungsfolien für Lebensmittel in den Unterricht mitgebracht, welche eine Aluminiumschicht besitzen. Die Folien sollten vor der Verwendung im Unterricht sorgfältig gereinigt werden. Die einzelnen Folien werden von den Schülern vorgestellt unter Hinweis auf vorher enthaltenes Füllgut und im Hinblick auf den vermuteten Folienaufbau. Es ist damit zu rechnen, dass Schlauchbeutel-Verpackungen für Kartoffelchips und Erdnüsse, Kaugummifolien, Butterfolien („Butterwickler“), Verpackungen für Schokoriegel und Milchkartons für haltbare Milch mitgebracht werden aber auch Aluminiumfolie aus dem Haushalt. Auf jeden Fall sollte die Lehrkraft vorausschauend derartige Verpackungen in geeignetem Zustand bereithalten. Es bietet sich nun an, die Funktion der Aluminiumschicht zu erfragen. Hierzu können Schülervorschläge gesammelt werden. Festzuhalten bleibt jedoch, dass die Kaugummifolie und Butterfolie aufgrund ihrer geringen Rückstellkraft sich flexibel

an die Form des Füllgutes anpassen. Ferner sollte hier darauf hingewiesen werden, dass Aluminium als Schutz gegen einfallendes Licht und Sauerstoff eingesetzt wird. Dadurch wird ein vorzeitiger Verderb des Lebensmittels verhindert. Zur Erläuterung der Barrierefunktion könnte ein Diagramm vorgestellt werden, welches die Konzentrationsabnahme von Vitamin B2 in der Milch bei ungehindertem Lichteinfall zeigt. Je nach vorhandener Zeit kann der oxidative Verderb von Lebensmitteln erläutert werden.

### 1b) Problemerkennung/Problemfindung/Problemstellung

Mit konzentrierter Salzsäure ( $w=25\%$ ) kann man unter Hinweis auf die Reaktion von sauren Lösungen mit Metallen (Jahrgangsstufe 9/10) demonstrieren, dass Haushaltsaluminiumfolie sofort reagiert, während bei den beschichteten Folien, welche flächig mit der Innenseite in die Säure eingetaucht werden keine Zersetzung stattfindet (Hinweise unter V 1.2.2 und V 1.3.2). Das Ergebnis dieses „Einführungsexperiments“ sollte hier zu einer Diskussion über den Schichtenaufbau der Folie führen. Gegen Ende dieser Phase muss einsichtig geworden sein, dass die Folien aus mehreren Schichten aufgebaut sind, wobei die aluminiumhaltige Verpackungsfolie nie direkt am Füllgut liegt. Es wird sich außerdem erweisen, dass die Aluminiumschichten offenbar verschiedene Dicken haben. Es ist sinnvoll, hier auf die unterschiedlichen Herstellungsverfahren einzugehen. Damit ergeben sich – grob zusammengefasst – zwei Kategorien von Aluminiumschichten: die durch Walzen hergestellte Folie und die sehr dünne Schicht, welche durch Bedampfen erzeugt wurde. Es stellt sich nun die Frage, im Bereich welcher geläufigen Abmessungen bzw. Dimensionen die Schichtdicken dieses Metalls einzuordnen sind. Hier wären beispielsweise die Dicke eines Haares, eines Blattes Schreibpapier, einer Frischhaltefolie oder eines roten Blutkörperchens zu nennen.

### 1c) Problemerkennung - Problemformulierung

Wie lässt sich die Dicke einer Aluminiumschicht bestimmen?

## 2. Überlegungen zur Problemlösung

### 2a) Analyse des Problems

Wenn bekannt ist, dass die Aluminiumschicht bei den meisten Folien auf beiden Seiten mit Kunststoff-Beschichtungen umgeben ist, muss entweder der Kunststoff abgelöst werden und die Dicke der zurückbleibenden Aluminiumschicht mit einer geeigneten Mikrometerschraube gemessen werden oder es muss die Aluminiumschicht mit Salzsäure zersetzt werden, woraufhin die Dicke der verbleibenden Folien anschließend mit der Mikrometerschraube bestimmt wird. Im Sinne eines exakten Arbeitens sollten die Flächen der untersuchten Proben genau ausgemessen werden. Auf folgende Aspekte sollte der Lehrer jedoch die Schüler hinweisen:

- Zunächst sollte im Sinne eines sparsamen Verbrauchs an organischen Lösungsmitteln gleich auf Toluol als Lösemittel für Polyethylen verwiesen werden. (Toluol darf als Ersatz für Benzol unter dem Abzug verwendet werden.)
- Ferner sollte der Lehrer darauf bestehen, dass die Schüler spätestens bis zum Ende dieser vorliegenden Phase den Ablauf der Reaktion dieses unedlen Leichtmetalls mit salzsaurer Lösung formuliert haben - zunächst als Wortgleichung, anschließend aber als Stoffgleichung und als Ionengleichung. Sollten die Schüler jedoch nicht auf die Entstehung von Wasserstoff schließen können, so dürfte die Zersetzung einer gut zugänglichen Aluminiumportion (Haushaltsfolie) als „Einführungsexperiment“ oder bereits als „Wiederholungsexperiment“ den Blick in diese Richtung lenken (Hinweise unter V 1.2.2 und V 1.3.2). Es ist damit zu rechnen, dass die Schüler das „Verschwinden“ der Folie und die lebhaft Gasentwicklung mit Interesse beobachten. Dabei sollte der Lehrer mitteilen, dass Kaugummifolie und Butterwickler bereits durch verdünnte Salzsäure ( $c=2 \text{ mol/L}$ ) angegriffen werden. (Außerdem sollte er die Schüler fragen, wie man den Vorgang dieser Zer-

setzung beschleunigen kann.) Beim Getränkekarton hingegen muss man auf Salzsäure höherer Konzentration zurückgreifen ( $w=25\%$ , V 1.3.2, Hinweis).

- Letztlich sollte der Lehrer die Schüler darüber nachdenken lassen, warum die Kaugummi- folie silbrig glänzt, die Butterfolie (Butterwickler) hingegen häufig eher goldfarben er- scheint. Sollten die Schüler darauf keine Antwort finden, so wird der Lehrer letztlich dar- auf hinweisen, dass es sich um eine Lackierung handelt. Diese Lackierung sollte – als weiteres „Einführungsexperiment“ – mit Hilfe von Ethanol unter dem Abzug mit einem Zellstofftuch abgerieben werden. Somit wird für alle Lernenden deutlich, dass Kaugum- mifolie und Butterwickler nur von einer Seite her von Salzsäure angegriffen werden kön- nen (V 1.3.1, V 1.3.3).

## 2b) Lösungsvorschläge

Folgende Vorschläge sind denkbar:

- Zunächst wird mit der Mikrometerschraube die Dicke einer Folie gemessen, daraufhin wird die Folie in Salzsäure gelegt, bis sich die Aluminiumschicht aufgelöst hat. Dann nimmt man die verbleibenden Folienschichten aus der sauren Lösung, spült sie in destil- liertem Wasser gut ab, trocknet sie sorgfältig und misst ihre Dicke. Es ist damit zu rech- nen, dass prinzipiell aus der Differenz zwischen der Anfangsdicke und der Dicke der ver- bliebenen Folien die Stärke der Aluminiumschicht zu ermitteln ist.
- Ein genau ausgemessenes Stück einer Folie wird mit einer Schere zerkleinert und unter Rühren mit verdünnter Salzsäure in einem abgeschlossenen System zur Reaktion ge- bracht, wobei das Volumen des bekanntermaßen entstehenden Wasserstoffs gemessen wird. Durch Umrechnung auf Normbedingungen lässt sich unter Berücksichtigung des molaren Normvolumens die Stoffmenge des Wasserstoffs ermitteln. Daraus lässt sich über das der Reaktionsgleichung zu entnehmende Stoffmengenverhältnis die Masse der Alumi- niumportion errechnen, welche bei der Reaktion umgesetzt wurde.
- Ein ausgemessenes Stück einer Folie wird mit einer Schere zerkleinert und mit verdünnter Salzsäure unter Rühren und vorsichtigem Erhitzen vollständig zur Reaktion gebracht. Die dabei entstandene Stoffmengenkonzentration bzw. Stoffmenge an Aluminium-Ionen wird ermittelt. Daraus lässt sich die Masse der Aluminiumportion berechnen, aus welcher wie- derum die Schichtdicke zu ermitteln ist.
- Unter Rückbesinnung auf Eigenschaften der Metalle könnte auch die Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit genannt werden. Dabei kann möglicherweise ein Hinweis über die Dicke der Metallschicht über die Ermittlung des Ohmschen Widerstands erhalten wer- den.

Die einzelnen Versuche müssen nun in der folgenden Entscheidungsphase genauer beleuchtet werden. Dabei muss die Lehrkraft bei genauer Kenntnis der Folienszusammensetzung Hinwei- se zum apparativen und zeitlichen Rahmen geben sowie die geeigneten Chemikalien (Salzsäu- re, Toluol, evtl. Ethanol) bereithalten. Steuernde Hinweise zur Organisation erscheinen hier unerlässlich.

## 2c) Entscheidung für einen Lösungsvorschlag

Hier müssen die einzelnen Vorschläge nochmals einer näheren Betrachtung unterzogen wer- den.

- Verschiedene Folien, bei denen die Aluminiumschicht beidseitig beschichtet ist, können nebeneinander in eine Kristallisierschale mit Salzsäure ( $w=18\%$ ) gelegt werden. Obwohl die Versuchsdauer sich über mehrere Tage erstrecken dürfte, kann man sich von der Beob- achtung der kontinuierlichen Metallzersetzung einen motivierenden Effekt versprechen (V 1.1).
- Beim volumetrischen Ansatz der quantitativen Wasserstoffbestimmung muss berücksich- tigt werden, dass die Aluminiumzersetzung bei Zimmertemperatur mit konz. Salzsäure

(w=25%) sehr lebhaft, mit verdünnter Salzsäure hingegen sehr langsam verläuft. Daher müsste bei Einsatz von verdünnter Salzsäure mehrere Stunden gewartet werden, bis sich aus Schnipseln der Folien die Aluminiumschicht herausgelöst hat. Die langsam entstehende Wasserstoffportion könnte jedoch durch Undichtigkeiten im Laufe dieser Reaktionszeit entweichen. Eine Volumenmessung mit dem Kolbenprober ist daher offensichtlich nicht geeignet, das entstehende Gasvolumen vollständig zu ermitteln. Auch eine heftig verlaufende Reaktion mit konz. Salzsäure ließe sich mit dem Kolbenprober nur schlecht kontrollieren, zumal durch das Aufschäumen Salzsäure-Portionen in den Zylinder hineingelangen könnten. Daher erscheint es sinnvoll, das Volumen pneumatisch zu erfassen. Das Volumen des aufgefangenen Wasserstoffes muss bei bekanntem Druck auf Normbedingungen zurückgerechnet werden. Beim Auffangen des Gases über Wasser muss der temperaturabhängige Wasserdampfdruck von dem gemessenen Luftdruck abgezogen werden, bevor man den Faktor zur Umrechnung in der Tabelle aufsucht bzw. den Wert des Druckes in die „allgemeine Zustandsgleichung der Gase“ einsetzt [69, S. 358], [85, S. 143 f.]. Wenn diese Reaktion mit konz. Salzsäure (w = 25%) zügig ablaufen soll, darf man nur Folien verwenden, bei denen die Aluminiumschicht von einer Seite frei zugänglich ist. Diese Situation ist bei einer Kaugummifolie gegeben sowie bei einer Butterfolie, deren Lackschicht mit Ethanol entfernt wurde (nach V 1.3.1, V 1.3.3). Bei einem Getränkekarton hingegen ist die Aluminiumschicht auch für konz. Salzsäure wesentlich schwerer zu erreichen. Deshalb dauert die Zersetzung länger, so dass man bis zum folgenden Tag mit dem Ablesen des Ergebnisses warten muss (V 1.3.2 und Hinweis). Bei den Folien schließlich, die nur eine sehr dünne, durch Aufdampfen hergestellte Aluminiumschicht besitzen, dürfte das Volumen an freigesetztem Wasserstoff derart gering sein, dass eine präzise Quantifizierung der Gasportion unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht möglich ist.

- Mit der titrimetrischen Methode ist die Erfassung auch sehr geringer Aluminiumportionen möglich. Dabei reagiert die Aluminiumschicht mit Salzsäure. Die entstandenen Aluminium-Ionen werden anschließend mit einem Überschuss EDTA-Lösung versetzt. Unverbrauchte EDTA-Lösung wird mit Zinksulfat-Lösung zurücktitriert. Daraus lässt sich der EDTA-Verbrauch für die Aluminium-Ionen berechnen. Diese Methode ist wegen ihrer universellen Anwendbarkeit auf jeden Fall zu bevorzugen und sollte in den Mittelpunkt der experimentellen Tätigkeit gestellt werden (V 1.3.3).
- Es könnte die Frage nach einer noch einfacher durchzuführenden Bestimmungsmethode der Aluminium-Ionen gestellt werden, etwa durch Teststreifen der Fa. Merck (Merckoquant, V 1.3.1).
- Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bereitet Schwierigkeiten, schon was die Herstellung eines Kontaktes zur Metallfolie mit Krokodilklemmen betrifft. Eine Quantifizierung erscheint daher sehr ungenau.

### 3. Durchführung eines Lösungsvorschlages

#### 3a) Planung des Lösungsvorhabens

Die Lösungsvorhaben werden aus Übersichts- und Zeitgründen auf das Konzept „Zersetzung der Metallschicht durch Salzsäure“ beschränkt.

- Unter dem Abzug werden Kristallisierschalen mit Salzsäure (w = 18%) aufgestellt. Zunächst wird die Dicke der gesamten Folie gemessen. Die Folien werden nebeneinander in die Kristallisierschalen gelegt. Nach der vollständigen Reaktion des Aluminiums wird die Folie gewaschen, getrocknet und die Dicke der verbleibenden Folien wird mit der Mikrometerschraube gemessen. Die Dicke der Aluminiumschicht wird berechnet (V 1.1).
- Volumetrischer Ansatz (Wasserstoffbestimmung): Aus dem Volumen der Wasserstoffportion wird die Stoffmenge an Wasserstoff ermittelt. Daraus wird die Stoffmenge von Aluminium berechnet. Daraus lässt sich über die Dichte das Volumen des Metalls bestimmen, aus welchem bei bekannter Fläche die Höhe und damit die Dicke abgeleitet werden kann.

Es können Milchkarton, Kaugummifolie und Butterfolie eingesetzt werden. Zur vollständigen Zersetzung der Aluminiumschicht aus dem Getränkekarton jedoch muss bis zum folgenden Tag gewartet werden (V 1.3.2).

- Die titrimetrische (komplexometrische) Methode sollte auf Kaugummifolie oder auf vom Lack befreite Butterwickler angewendet werden. Zur Zersetzung der Aluminiumschicht wird verdünnte Salzsäure ( $c=2 \text{ mol/L}$ ) eingesetzt, wobei der Zersetzungsvorgang durch vorsichtiges Erwärmen auf wenige Minuten begrenzt werden kann. Will man hingegen die Dicke der Aluminiumschicht eines Getränkekartons bestimmen, so muss Salzsäure höherer Konzentration ( $w=18\%$ ) verwendet werden. Die Kartonschicht dieser Getränkeverpackung muss vor dem Einwirken der Salzsäure mit Wasser aufgeweicht und mechanisch entfernt werden (V 1.3.2).
- Auch der Schnelltest-Methode (Merckoquant) muss eine Reaktion der Aluminium-Schicht mit Salzsäure vorausgehen. Da für den Schnelltest ein pH-Wert von 13 eingestellt werden soll, erscheint es sinnvoll, die zerkleinerte aluminiumhaltige Probe ausschließlich mit verdünnter Salzsäure reagieren zu lassen. Da aber verdünnte Salzsäure die Aluminiumschicht des Milchkartons nur äußerst langsam angreift, sollte diese Methode nur auf Kaugummifolie oder auf vom Lack befreite Butterwickler angewendet werden. Es muss aber damit gerechnet werden, dass man mit diesem Testbesteck nur eine orientierende Bestimmung der Aluminiumionen-Konzentration erreicht. Das Ergebnis dieser halbquantitativen Methode sollte dann mit den erhaltenen Werten der titrimetrischen (komplexometrischen) Methode verglichen werden (V 1.3.1).

Eine derartige Entscheidungsfindung erfordert die Bildung von mindestens vier Arbeitsgruppen.

### 3b) Praktische Durchführung des Lösungsvorhabens

Nach der Entscheidungsfindung aus Phase 3a) werden nur Experimente zum Konzept „Auflösung der Metallschicht durch Salzsäure“ durchgeführt:

- Zersetzung der Aluminiumschicht zusammenhängender auch größerer Folienstücke durch Salzsäure ( $w=18\%$ ), Schichtdickenmessung mit der Mikrometerschraube (Folien, deren Aluminiumschicht beidseitig kaschiert ist, Schokoriegel usw., V 1.1)
- Ermittlung der Stoffmenge und Masse der Aluminiumportion aus dem Ergebnis der volumetrischen Bestimmung des freigesetzten Wasserstoffs (Kaugummifolie, Butterfolie, Getränkekarton), Einsatz von Gasentwicklungsapparatur, pneumatisches Auffangen des Gases (V 1.3.2)
- Ermittlung der Stoffmenge und Masse der Aluminiumportion aus dem Ergebnis der komplexometrischen Bestimmung mit Hilfe von EDTA-Lösung (Kaugummifolie oder Butterfolie, anschließend Getränkekarton, V 1.3.3)
- Ermittlung der Stoffmenge und Masse der Aluminiumportion aus dem Ergebnis des orientierenden bzw. halbquantitativen Schnelltests „Merckoquant“ (Kaugummifolie oder Butterfolie), Suche nach einer sinnvollen Verdünnung der sauren Ausgangs-Probelösung (V 1.3.1)

### 3c) Diskussion der Ergebnisse

- Die Zersetzung sehr dünner Aluminiumschichten dauert mehrere Tage, da die saure Lösung nur sehr langsam zwischen die umgebenden Schichten eindringen kann. Sehr dünne Aluminiumschichten lassen sich jedoch nicht mit Hilfe der Differenzmessungen über die Mikrometerschraube ermitteln. Bei dickeren Aluminiumschichten hingegen ist eine solche Messung zumindest annähernd möglich. Dabei sind allerdings Papierreste, die durch

Quellung und anschließendes Austrocknen bzw. Auflösung teilweise verändert werden, erhebliche Fehlerquellen.

- Das volumetrische Verfahren eignet sich nur für dicke Aluminiumschichten. Wegen Fehlerquellen (nicht zu vernachlässigende Löslichkeit von Wasserstoff in Wasser, Durchdringen des Wasserstoffs an Verbindungs- bzw. Kontaktstellen, Ablesefehler am Messzylinder, Ermittlung der Temperatur der Gasportion und Umrechnung des Volumens auf Normbedingungen) kann man diese Methode als halbquantitativ klassifizieren.
- Mit dem titrimetrischen Verfahren sind genaueste Bestimmungen möglich, wobei die Aluminiumschichtdicke von Getränkekartons und von Kaugummifolie sowie Butterwickler in einer Größenordnung von 6  $\mu\text{m}$  präzise bestimmt werden kann. Wenn man die Reagenzien, die zur Titration nötig sind 1:10 verdünnt (EDTA-Lösung und Zinksulfat-Lösung), dann wird die Bestimmung auch von 0,05  $\mu\text{m}$  dicken Schichten möglich.
- Mit dem Schnelltest-Verfahren sind nur orientierende Bestimmungen möglich, wobei die Aluminiumschichtdicke von Kaugummifolie sowie Butterwickler ebenfalls in einer Größenordnung von ca. 5  $\mu\text{m}$  ermittelt werden. Um dieses halbquantitative Verfahren sinnvoll durchführen zu können, muss man die erhaltene saure Ausgangslösung, welche die Aluminium-Ionen enthält, mit dem Faktor 1:100 verdünnen. Nur unter dieser Bedingung kann die vorgegebene Farbskala für eine Zuordnung der Massenkonzentration an Aluminium-Ionen sinnvoll ausgenutzt werden.

#### 4. Abstraktion der gewonnenen Erkenntnisse

##### 4a) Grafische Abstraktion

Es erscheint sinnvoll, den Schichtenaufbau zu skizzieren. Als relativ einfach erweist sich die Skizze des Querschnitts einer Kaugummifolie, eines Butterwicklers und eines Milchkartons. Der Schichtenaufbau eines Kaugummipapiers von außen nach innen lautet: Aluminium/Wachs/Papier. Beim Getränkekarton findet man die Schichtung PE/Karton/PE/Aluminium/PE.

##### 4b) Verbale Abstraktion:

Das Konzept „Aluminium reagiert mit Salzsäure“ wird zusammenfassend erläutert. Die drei Strategien der Vorgehensweisen werden wiederholt. Die Schüler sollen erkennen, dass offenbar die Aluminiumschicht niemals direkt am Lebensmittel liegt. In den genannten Beispielen hat das Lebensmittel direkten Kontakt zu Papier oder Polyethylen.

##### 4c) Mathematische Abstraktion

Die quantitative Bestimmung der Stoffmenge des Aluminiums nach dem volumetrischen und dem komplexometrischen Verfahren wird sorgfältig durchgeführt bzw. in Auszügen wiederholt.

#### 5. Wissenssicherung

##### 5a) Anwendungsbeispiele

Beispiele für verschiedene Folien, welche Aluminium enthalten werden vorgestellt. Die Herstellungsverfahren werden wiederholt: Auswalzen von Aluminium zu Folien mit anschließender Kaschierung und Aufdampfen von Aluminium zur Herstellung extrem dünner Schichten. Die Barrierefunktion der Aluminiumschicht wird erwähnt. Dabei sollte auf die metallische Bindung eingegangen werden. Auch Größenvergleiche sollten herangezogen werden, wie z.B. der Durchmesser eines roten Blutkörperchens mit ca. 7  $\mu\text{m}$ .

Hier könnte zum Aufbau des Getränkekartons ein „Bestätigungsexperiment“ zur Einordnung bisheriger Befunde eingesetzt werden, wonach die Polyethylen-Schichten mit Toluol abgelöst werden und die restlichen Schichten (Aluminiumfolie, Karton mit der Mikrometerschraube

vermessen werden (V 2.7). Zur Auflösung eines Getränkekartons sollte dessen Aufbau in groben Zügen bekannt sein. Dazu kann eine Informationsbroschüre eines Getränkekartonherstellers hilfreich sein.

Ergebnisse des Bestätigungsexperiments:

- Die Dicke der Aluminiumschicht lässt sich mit Hilfe der Mikrometerschraube zu etwa 5 µm ermitteln.
- Außerdem lässt sich der Massenanteil der drei Komponenten Aluminium, Karton und Polyethylen am Gesamtverbund ermitteln.
- Ferner kann als „weiterführendes Experiment“ ein Nachweis von Papier erfolgen, sei es durch Molisch Reagenz oder durch saure Hydrolyse und Nachweis der Bausteine mit Fehling-Lösung (V 2.8.1, V 2.8.2). Auch ein Nachweis von Lignin ist denkbar (V 2.7.1).

Nach diesen umfassenden Experimenten wird deren komplementärer Charakter im Überblick deutlich, wobei die Aluminiumschicht im Zentrum der Überlegungen stehen sollte.

### 5b) Wiederholung

- Hier kann die Herstellung von Aluminiumfolien erläutert werden.
- Außerdem besteht die Möglichkeit, bei bekannter Masse des Aluminiums die Anzahl der Aluminiumatome in deiner Kaugummifolie berechnen zu lassen.
- Die Reaktionsgleichung der Zersetzung von Aluminium durch Salzsäure muss formuliert werden können.
- Die Umrechnung von Gasportionen auf das jeweilige Normvolumen sollte geübt werden unter Verwendung der Zustandsgleichung der Gase.
- Es sollte – mit Blick auf das pneumatisch aufgefangene Gas - problematisiert werden, welches Gas sich eigentlich im Messzylinder befindet.
- Die Vorgänge des titrimetrischen Verfahrens müssen nochmals aufgegriffen werden.
- Stoffliche Unterschiede zwischen Aluminium, Polyethylen und Papier werden in einer Tabelle gegenüber gestellt.

### 5c) Lernzielkontrolle

- Stöchiometrische Berechnungen auf der Grundlage der Gleichung der Reaktion von Aluminium und Salzsäure
- Aufgaben zur „allgemeinen Zustandsgleichung der Gase“
- Vergleich der beiden Stoffgruppen „Kunststoffe“ und „Metalle“ auf der Basis des Struktur-Eigenschaften-Konzeptes

Die folgende Tabelle 26 fasst vereinfacht die oben ausgeführten Stufen des Unterrichtsfortganges zusammen.

Tabelle 26: Ermittlung des Aufbaus einer aluminiumhaltigen Folie mit Hilfe des Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens (EE: Einführungsexperiment, BE: Bestätigungsexperiment, E: Experiment im Rahmen des Lösungsvorhabens, WE: Weiterführendes Experiment)

<b>Denkstufen</b>	<b>Aktivitäten in verschiedenen Denkphasen</b>
1. Problemgewinnung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vorstellung mehrerer aluminiumhaltiger Folien (Kaugummi, H-Milch usw.)</li> <li>▪ EE/BE: Nachweis der Aluminiumschicht einer Kaugummifolie mit Alizarin S (V 1.2.1)</li> <li>▪ Wie lässt sich die Dicke einer Aluminiumschicht bestimmen?</li> </ul>
2. Überlegungen zur Problemlösung	Angreifbarkeit durch Säure, Lauge, Alizarin S, Auflösung von Polyethylen durch Toluol, Abmessen der Dicke der Restbestandteile mit einer Mikrometerschraube

Denkstufen	Aktivitäten in verschiedenen Denkphasen
3. Durchführung eines Lösungsvorschlages	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ E: Zersetzung sehr dünner Aluminiumschichten durch konz. Salzsäure (w=25%) und spätere Messung der Dicke der verbliebenen Kunststoffschichten mit einer Mikrometerschraube (V 1.1)</li> <li>▪ E: Zersetzung der Aluminiumschichten von Kaugummifolie, Butterwickler und Milchkarton mit konz. Salzsäure (w=25%) und pneumatisches Auffangen des Wasserstoffs zur Ermittlung der Stoffportion an Aluminium (volumetrisch, V 1.3.2)</li> <li>▪ E: Zersetzung der Aluminiumschichten von Kaugummifolie, Butterwickler mit verdünnter Salzsäure (c=2 mol/L) und Ermittlung der Aluminiumionen-Konzentration durch ein komplexometrisches Verfahren mit EDTA (titrimetrisch, V 1.3.3)</li> <li>▪ E: Zersetzung der Aluminiumschichten von Kaugummifolie, Butterwickler mit verdünnter Salzsäure (c=2 mol/L) und Ermittlung der Aluminiumionen-Konzentration durch ein orientierendes Schnelltest-Verfahren (Merckoquant, V 1.3.1)</li> </ul>
4. Abstraktion der gewonnenen Erkenntnisse	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gleichung der Reaktion von Metall mit Säure</li> <li>▪ Errechnung der Aluminiumportion aus der Wasserstoffportion (allgemeine Zustandsgleichung der Gase)</li> <li>▪ Komplexe Bindung der Aluminium-Ionen</li> </ul>
5. Wissenssicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ BE: Zerlegung eines Getränkekartons mit Hilfe von Toluol (V 2.7)</li> <li>▪ Aluminiumschicht als Barriere gegen Sauerstoff- und Lichteintritt</li> <li>▪ Aufbau und Herstellung einer Aluminiumfolie</li> <li>▪ Herstellung eines Getränkekartons mit Aluminiumschicht</li> <li>▪ Aufbringen einer sehr dünnen Aluminiumschicht auf eine Chipsfolie</li> <li>▪ Wiederholung des Struktur-Eigenschaften-Prinzips (Metallgitter / metallische Eigenschaften)</li> </ul>

### 11.3 Thema 3: „Untersuchung der Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien“ (Analytisch-synthetisches Verfahren)

#### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse: Diffusion, Redoxreaktion, Spannungsquellen, Kunststoffe, Ideale Gasgleichung

Die Entscheidung für dieses Verfahren liegt darin begründet, dass die in der Überschrift erwähnte Sauerstoffdurchlässigkeit von Folien nur unter größerem apparativem Aufwand einer Messung zugänglich ist<sup>2</sup>.

Bestimmte Verpackungsfolien müssen für Lebensmittel eine Barriere für Sauerstoff darstellen, um das Füllgut vor oxidativem Verderb zu schützen. Die Problemstellung lautet: „Nahrungsmittel müssen vor oxidativem Verderb geschützt werden. – Verpackungen müssen als Sauerstoffbarriere dienen.“ Dieser kurze Hinweis auf den Alltag sollte noch vor der eigentlichen „Problemgewinnung“ an die Schüler erfolgen.

#### Stufe 1:

Diese Stufe dient der „Problemgewinnung“ am technischen Gerät. Die nachfolgend beschriebene Apparatur wird – für die Schülergruppe gut einsehbar – zunächst auf dem Tisch ohne weitere Kommentare präsentiert.

<sup>2</sup> Wir danken Herrn Prof. Dr. W. Jansen für interessante Anregungen zu diesem Verfahren.

Am Anfang dieser als Demonstration geplanten Einführungsphase muss als Impuls und zur richtungsweisenden Motivation folgende Frage an die Lernenden gestellt werden: „Wie kann man den Sauerstoffgehalt in einer Apparatur und seine möglichen Veränderungen möglichst präzise ermitteln?“. Zunächst werden die Vorschläge und Anmerkungen gesammelt, dann stellt der Lehrer die direkte Frage nach den erforderlichen Bedingungen für eine störungsfreie Bestimmung des Sauerstoffgehaltes. Auch diese Vorschläge werden gesammelt, ohne sie zunächst weiter zu kommentieren.

Nun wird das „technische Gerät“, ein umgebauter Exsikkator vorgestellt, in welchem sich eine mit einem Widerstand von  $80\ \Omega$  belastete Zink-Luft-Batterie befindet. Diese Zink-Luft-Batterie, eine Knopfzelle, ist das eigentliche chemische Kernstück der Apparatur. Die beiden Kabel bzw. Drähte werden durch die seitliche Öffnung nach außen geführt und dort mit einem Spannungsmessgerät bzw. einem entsprechenden Computerprogramm zur Datenspeicherung und Aufzeichnung verbunden. Der Ausführkanal der Kabel ist abgedichtet, wobei sich an der Seite dieses abführenden Glasrohres ein Hahn befindet, über welchen Stickstoff in die Apparatur eingeleitet werden kann. Der geschliffene Rand des Exsikkators wird zunächst mit Schliff fett bestrichen, woraufhin die zurechtgeschnittene Prüffolie aufgelegt wird. Diese wird durch einen extra angefertigten Messingring beschwert (Abb. 35, V 4.1.2).

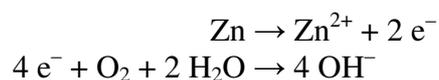


Abb. 35: Umgebauter Exsikkator als Messapparatur zur Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit von Prüffolien. An Stelle des Glasdeckels wird der Messingring auf die Prüffolie gelegt. Im Inneren befindet sich die Plexiglasplatte mit Knopfzelle und  $80\ \Omega$  –Widerstand. Der Spannungsabgriff an den beiden Drähten erfolgt mit Hilfe von Krokodilklemmen

Am Ende dieser Problemgewinnungsphase muss den Lernenden bewusst sein, dass die erwähnte Prüfapparatur gasdicht sein muss, damit ein mögliches Eindringen von Sauerstoff ausschließlich durch die Fläche der ausgeschnittenen Prüffolie erfolgen kann. Dazu wird erwähnt, dass Schliff fett als Dichtungsmittel verwendet wird. Es stellt sich nun die Frage, wie die Zink-Luft-Batterie funktioniert und wie man sie einsetzen muss, um den Sauerstoffgehalt und seine Veränderungen zu ermitteln.

### Stufe 2:

Im Zentrum der „technischen Analyse“ steht die Funktionsweise der Zink-Luft-Batterie. Die zugehörigen chemischen Vorgänge lassen sich als Redoxgleichung darstellen:



Bei ungehindertem Luftzutritt beträgt die Spannung ohne Belastung 1,4 V.

### Stufe 3:

Das erste „Grundproblem“ besteht nun darin, einen Zusammenhang zwischen einer definierten Sauerstoffkonzentration und der Spannung der Zink-Luft-Batterie herzustellen. Hierzu müssen die Schülerinnen und Schüler informiert werden, dass sich nur bei Belastung der Batterie mit einem Widerstand von  $80 \Omega$  eine lineare Beziehung zwischen Batteriespannung und Sauerstoffgehalt ergibt. Es können nun Wertepaare zugeordnet werden, woraus sich folgende Eichkurve erstellen lässt (Abb. 36):

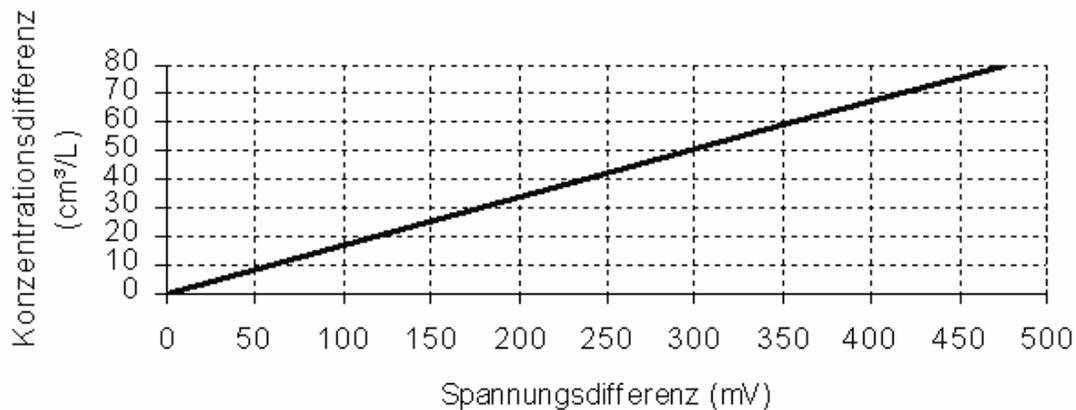


Abbildung 36: Eichkurve zur Sauerstoffkonzentration. Spannungsanstieg und Konzentrationsdifferenz des Sauerstoffs verhalten sich zueinander proportional. (Die Eichkurve bezieht sich auf eine Belastung der Zink-Luft-Batterie mit  $80 \Omega$ , eine Temperatur von ca.  $22^\circ\text{C}$  und einen Luftdruck von rund 1 bar).

Spätestens an dieser Stelle, mit Blick auf die Eichkurve müssen die Schüler gefragt werden, wie man es schafft, einen niedrigen Sauerstoffgehalt bzw. einen Prüfraum sauerstofffrei zu erhalten. Folgende Vorschläge wären – als fragend-entwickelnde Zwischenphase - denkbar:

1. Man evakuiert die Apparatur.
2. Man leitet ein Gas ein, welches sauerstofffrei ist (Edelgas, Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoffdioxid).

Anschließend werden die Vorschläge auf ihre Sinnhaftigkeit hin überprüft.

1. Eine Evakuierung der Apparatur würde die Prüffolie auf Grund des entstehenden Unterdrucks zerstören.
2. Das Gas muss sauerstofffrei sein und darf nicht mit der Batterie und ihren Inhaltsstoffen reagieren. Diese Anforderung wird mit Sicherheit erfüllt von Edelgasen, Wasserstoff und Stickstoff. Kohlenstoffdioxid ist hingegen ungeeignet, da es mit den Hydroxid-Ionen des Elektrolyten reagiert und diese Ionen dann dem Gleichgewicht entzieht.

Schließlich bleibt zusammenzufassen, welches der genannten inerten Gase am sinnvollsten eingesetzt wird:

- Wasserstoff diffundiert leicht und würde relativ schnell zu einem Unterdruck im Prüfgerät führen. Daher erscheint er wenig geeignet.
- Das Edelgas Argon ist zwar geeignet, jedoch spricht der Kostenfaktor gegen eine Verwendung.
- Die Wahl fällt daher auf Stickstoff, denn er verhält sich gegenüber der Batterie neutral und ist kostengünstig.

#### „Modellversuch“:

Stickstoff wird nun verwendet, um für den nachfolgenden „Modellversuch“ die Apparatur zu spülen. Mit diesem kurzen Demonstrationsexperiment soll den Schülern innerhalb einer Doppelstunde das Funktionieren der Apparatur nahe gebracht werden. Die beiden Drähte (Kabel) aus der Apparatur werden mit einem Voltmeter verbunden sowie mit dem PC, auf welchem ein entsprechendes Messprogramm verwendet wird. Damit die Diffusion des Sauerstoffs durch die Prüffolie innerhalb einiger Minuten nachvollziehbar gemacht wird, setzt man z.B. Backpapier als Modell-Prüffolie ein. Die Apparatur wird über den seitlichen Ansatz mit Stickstoff geflutet, das rund ausgeschnittene Backpapier lose auf den eingefetteten Rand gelegt, bis die Spannung auf einen minimalen, konstanten Betrag abgesunken ist. Dann dreht man den Stickstofffluss ab und setzt den Messring auf den Folienrand über dem Schliff und drückt somit die Folie auf die eingefettete Schlifffläche. Man startet das Messprogramm und verfolgt den Spannungsanstieg. Anhand der Eichkurve lässt sich nun jede Spannungsdifferenz einer Konzentrationsänderung des Sauerstoffs zuordnen. Daraus lässt sich bei bekannter Folienfläche die Sauerstoffdurchlässigkeit pro  $m^2$  berechnen.

Man kann den Sauerstoffeintrag abstoppen, wenn man die Außenseite des Backpapiers mit Haarlack besprüht. Der als Folge auftretende Spannungswert zeigt, dass der Sauerstoffgehalt im Inneren des Messgefäßes nahezu konstant bleibt. Dabei muss man außerdem von einem geringen Sauerstoffverbrauch durch die Batterie ausgehen. Sticht man kurz nach dem Auftragen des Haarlacks, wenn die Spannung konstant geworden ist, in die Folie hinein, so steigt die Spannung sprunghaft an, da Sauerstoff ungehindert eintreten kann. Dies ist in Abb. 37 dargestellt.

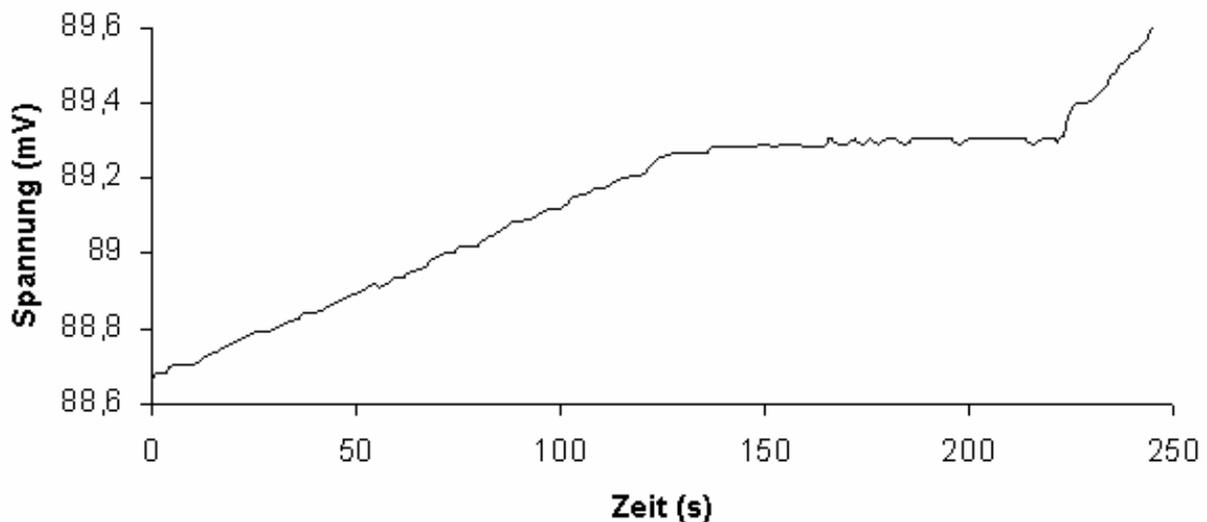


Abbildung 37: Demonstration der Sauerstoffdurchlässigkeit durch eine Backpapierfolie: Unbehandelt (links), mit Haarlack besprüht (Mitte) sowie nach dem Durchstechen (rechts), dargestellt als Spannungsänderungen.

Schließlich stellt sich auf dieser Stufe die Frage nach der treibenden Kraft, welche dazu führt, dass der Sauerstoff in das Innere der Apparatur gelangt. Hier ist die Teilchenbewegung als Ursache zu nennen, wobei durch die größere  $O_2$ -Teilchenzahl außen und die sehr geringe  $O_2$ -Teilchenzahl innen – entsprechend der Partialdruckdifferenz - ein Nettoeinstrom von Sauerstoffmolekülen erfolgt.

#### Stufe 4:

In dieser Stufe soll ein „Nebenproblem“ angesprochen werden.

Beim Fluten der Apparatur mit Stickstoff zeigt sich, dass die Spannung der Batterie nicht, wie erwartet auf 0 mV absinkt, sondern – je nach Gebrauchsdauer der Batterie - im Bereich von ca. 50 bis 70 mV verharrt, auch wenn Argon zum Spülen der Apparatur verwendet wird. (Auf diesen Umstand geht Lit [78] ein.) Daher sollte aus der oben dargestellten Eichkurve nicht der absolute Gehalt des Sauerstoffs ermittelt werden, sondern nur dessen Konzentrationsdifferenz. Zur Berechnung von Sauerstoffdurchlässigkeiten jeglicher Prüffolie genügt es, diese Differenz zu kennen.

#### Stufe 5:

Auf dieser Stufe wird nun eine „synthetische Betrachtung“ der Apparatur vorgenommen. Dies soll nach drei Gesichtspunkten geschehen.

1. Der „Nachbau“ einer derartigen Apparatur als Schülerversuch dürfte sich äußerst schwierig gestalten. Eher empfiehlt es sich, als Schülerversuch in einer der nachfolgenden Stunden ein qualitativ ausgerichtetes Experiment durchführen zu lassen, wobei die Wirkung eines Schutzgases (N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) besonders deutlich wird (Versuch 4.1.1): In ein Joghurtglas mit dicht schließendem Metalldeckel legt man eine in Methylenblau getränkte und mit Thiosulfat-Lösung benetzte Filterpapierscheibe. Das Glas wird mit N<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub> geflutet und der Metalldeckel wird sofort aufgeschraubt. Der gleiche Ansatz wird mit einer zweiten Probe in einem zweiten Glas durchgeführt, welches jedoch offen und damit für den Luftsauerstoff frei zugänglich bleibt. Die Unterschiede in der Geschwindigkeit der wieder auftretenden Blaufärbung lassen Rückschlüsse auf die unterschiedliche Sauerstoffkonzentration zu. Obwohl dieses Experiment keine quantifizierbaren Ansätze enthält, zeigt es trotzdem eine gute Visualisierung der Wirkung des Sauerstoffs.
2. Die Möglichkeiten des „Transfers“ beziehen sich nicht auf Variationsmöglichkeiten der Apparatur selbst, sondern auf die Überprüfbarkeit vieler verschiedener authentischer Verpackungsfolien (Frischhaltefolie, PVC-Folie, Verbundfolie zur Käseverpackung, aluminiumhaltige Folien zur Verpackung von Kartoffelchips). Die Unterschiede der Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien können deutlich nachgewiesen werden.
3. Im Hinblick auf die „technische Leistungsfähigkeit“ soll zunächst die Messgenauigkeit dokumentiert werden, anschließend soll der Messbereich abgeschätzt werden. Auf 24 Stunden angelegte Messreihen zeigen deutliche Unterschiede bei der Sauerstoffdurchlässigkeit zwischen Folien gleichen Materials (PE) bei verschiedener Dicke. Wenn Temperatur, Partialdruckdifferenz, Fläche, Messzeitraum und Material gleich bleiben, dann lässt sich folgender Zusammenhang gut erkennen:

$$\text{Durchlässigkeit} \sim \frac{1}{\text{Foliendicke}}.$$

Außerdem zeigen sich hohe Durchlässigkeiten bei PE-Frischhaltefolie bzw. PVC-Folie, geringe Durchlässigkeiten hingegen bei aluminiumhaltigen Verbundfolien sowie bei Folien, welche mit PA beschichtet sind. Die relativ hohe Messgenauigkeit liefert Hinweise auf Polarität und Dichte von Folien bzw. auf das Vorhandensein von Sauerstoffbarrieren.

Nachfolgend ist eine Tabelle zum „Analytisch-synthetischen Verfahren“ dargestellt, welche vereinfacht eine Übersicht über die Stufen und ihre Inhalte enthält (Tab. 27).

Tabelle 27: „Messung der Sauerstoffdurchlässigkeit einer Folie mit Hilfe einer Zink-Luft-Batterie“ als Beispiel für ein Analytisch-synthetisches Unterrichtsverfahren (in Anlehnung an [45, S. 223] )

Stufe	Inhalt
Stufe 1: Problemgewinnung am technischen Gerät	Vorstellung des umgebauten Exsikkators mit der Zink-Luft-Batterie (Versuch 4.1.2)
Stufe 2: Technische Analyse	Zink-Luft-Batterie: Redoxreaktion
Stufe 3: Analyse der Grundprobleme	Erstellung einer Eichkurve zum linearen Zusammenhang Konzentrationsdifferenz / Spannungsdifferenz; Modellversuch mit Backpapier
Stufe 4: Bearbeitung von Nebenproblemen	Vernachlässigung des Netto-Stickstoff-Ausstromes
Stufe 5: Synthetische Betrachtung (Transfer, technische Leistungsfähigkeit)	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Antiproportionaler Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Foliendicke</li> <li>➤ Berechnung der Leistungsfähigkeit mit Hilfe des idealen Gasgesetzes</li> <li>➤ Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien</li> <li>➤ Vorstellung anderer Messverfahren</li> <li>➤ Qualitativer Versuch mit reduziertem Methylenblau im Joghurtglas (Versuch 4.1.1)</li> </ul>

#### Exkurs: Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit einer Folie in industriellen Prüfverfahren

Diese zur Ermittlung der Permeation verschiedener Stoffe benutzten Verfahren sind meist DIN-definiert. Bei Gasen wie Sauerstoff wird das Volumen angegeben. Da dieses nicht nur vom Zeitraum und der permeablen Fläche abhängig ist, sondern auch von der Partialdruckdifferenz, muss die Einheit angegeben werden in  $\frac{cm^3}{m^2 \times d \times bar}$  [11, S. 371-374]. Prüfverfahren

zur Sauerstoffdurchlässigkeit sind z.B. manometrische Verfahren, bei denen Druck- und Volumenänderungen erfasst werden. Weiter ist die Gasphasenmethode zu erwähnen, wobei das Permeans in einem schwer flüchtigen, flüssigen Medium gelöst, durch einen Gasstrom in ein Sorptionsröhrchen transportiert, später extrahiert und gaschromatographisch bestimmt wird. Bei der Trägergasmethode wird in einer Prü fzelle eine Prüffolie von einer Seite mit dem Prüfgas umspült, auf der anderen Seite - bei Druckgleichheit - von einem Trägergas. Letzteres reißt permeiertes Prüfgas mit und führt es einem Detektor zu. Hierbei kann es sich um einen Absorptions- oder einen Wärmeleitfähigkeitsdetektor handeln. Auch UV-Detektoren können hier eingesetzt werden. Ferner kann als Detektor auch ein Massenspektrometer verwendet werden. Schließlich muss eine kolorimetrische Methode erwähnt werden, welche die Bildung von Kupferammonium-Ionen in einer Ammoniak-Lösung registriert, wenn Sauerstoff hinzu tritt. Außerdem sind noch Verfahren mit radioaktiven Isotopen zu erwähnen. Letztlich sind bei Polymeren in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt Thermolumineszenz-Verfahren möglich [11, S. 378-380]. Eine nicht-invasive Methode auf der Basis der Fluoreszenz-Auslöschung erlaubt die Sauerstoff-Registrierung sogar in geschlossenen Flaschen [105]. Auf einer invasiven Messmethode basiert ein Analysator, durch dessen dünne Nadel kleinste Gasmengen aus dem Inneren von Verpackungen entnommen werden und mit Hilfe einer Messzelle auf Restsauerstoff überprüft werden. Die auftretende schwache Spannung wird von einem Mikroprozessor ausgewertet [106]. Da diese genannten Verfahren recht aufwändig und mit der Anschaffung u. U. sehr teurer Geräte verbunden sind, ist ihr Einsatz im Chemieunterricht fragwürdig. Hier wären handlichere Geräte vonnöten, die möglichst wenig stör anfällig sind. Grundbedingung für das Funktionieren eines Messsystems ist seine prinzipielle Affinität zu Sauerstoff.

#### **11.4 Thema 4: „Rund um den Joghurtbecher“ (Expertenunterricht)**

Für einfachere Experimente bieten sich beispielsweise die Materialien von Joghurtverpackungen an. Hier können die Stoffgruppen Kunststoff, Metall, Karton sowie ggf. Glas auf einer ungewohnten Ebene eine neue vergleichende Betrachtung erfahren. Nach Vorankündigung sollten die Schüler saubere und trockene Joghurtpackungen mit in den Unterricht bringen: Kunststoffbecher mit Aluminiumdeckel, Kunststoffbecher mit Karton-Außenschicht und Stülpedeckel, Joghurtglas mit Weißblech-Schraubverschluss. Es könnten auch Schüler beauftragt werden, als Vorbereitung auf das Thema ein Foto über präsentierte Joghurtbecher in einem Supermarkt zu machen.

##### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Stofftrennung, Oxidation, Metalle, Säuren und Laugen, Atombindung, Kohlenwasserstoffe (Sek. I)

##### Themenauswahl und Auswahl der Experten (1):

Folgende am Experiment orientierte Themenzusammenstellung ist denkbar, wobei die Schüler hier 15 Experten-Zweiergruppen bilden können:

Gruppe 1: Kunststoffe PS / PP (8 Referate und Experimente / 16 Schüler als Experten)

Gruppe 2: Karton / Papier (2 Referate und Experimente / 4 Schüler als Experten)

Gruppe 3: Aluminium (5 Referate und Experimente / 10 Schüler als Experten)

Für eine Lerngruppe von bis zu 30 Schülern lassen sich zum Thema „Joghurtbecher“ – wie in der Unterrichtskonzeption gewünscht – viele einfache Versuche finden. Vorschläge dazu finden sich in der nachfolgenden Tab. 28.

Tabelle 28: Übersicht über experimentelle Zugänge zu Bestandteilen von Joghurt-Verpackungen mit vorausgehenden Referat-Themen im Rahmen des „Experten-Unterrichts“

<b>„Kunststoff-Gruppe“ (PS/PP)</b>	
<b>Referat</b>	<b>Experiment</b>
Was müssen Lebensmittelverpackungen leisten? – Verhinderung der Wechselwirkung Packstoff / Füllgut	Stabilität gegenüber Aceton, auch am Beispiel von Styropor (V 2.2)
Das Pigment Titandioxid und seine vielfältige Anwendung	Nachweis des Pigments Titandioxid (V 2.13)
Brauchen wir unbedingt Müllverbrennungsanlagen?	Verbrennungsverhalten (V 2.2)
Stofftrennung durch das Schwimm-Sink-Verfahren	Dichte (V 2.2)
Herstellung, Verarbeitung und werkstoffliches Recycling von thermoplastischen Kunststoffen (Hinweis auf Copolymerisate Polystyrol/Butadien)	Verhalten beim Erwärmen/Schmelzbereich (V 2.2, V 2.16.2)
Aufbau von Kunststoffen, Makromoleküle	Löslichkeit von Polystyrol in Toluol / Gießen einer dünnen Folie (V 2.2 und V 2.3)
Einweg- und Mehrweg-Verpackungen: Versuch einer ökologischen Bewertung	Abwiegen geleerter, sorgfältig gereinigter und getrockneter vollständig erhaltener Packmittel und sämtlicher Bestandteile (Becher, Karton, Aluminiumdeckel, Stülpedeckel, Joghurtglas mit Metallschraubdeckel): Wie viel Gramm Verpackung ist nötig, um 500 g Joghurt aufzubewahren?
Verschlüsse bei Lebensmittelverpackungen	Stoffliche Identifizierung des Stülpedeckels aus Kunststoff (V 2.2 und V 2.10.1)

<b>„Karton-Gruppe“ (Ummantelung eines Polystyrol-Bechers)</b>	
<b>Referat</b>	<b>Experiment</b>
Wo wird Papier bzw. Karton zur Lebensmittelverpackung eingesetzt?	Cellulose-Nachweis mit Molisch Reagenz (V 2.8.1)
Grund für den Einsatz von Papier bzw. Karton in Lebensmittelverpackungen	Test auf Holzstoff Lignin (V 2.7.1)

<b>„Aluminium-Gruppe“ (aufgeschweißter Aluminiumdeckel)</b>	
<b>Referat</b>	<b>Experiment</b>
Verpackungen als Werbeträger	Ablösung der äußeren Lackschicht (V 1.2.1)
Welche Eigenschaften muss der Aluminiumdeckel erfüllen? Wie wird er aufgebracht?	Messung der Schichtdicke des Aluminiumdeckels mit der Mikrometerschraube
Wo wird Aluminium bei Lebensmittelverpackungen eingesetzt?	Reaktion mit Natronlauge und Nachweis mit Alizarin S (V 1.2.1)
Unedle Metalle und ihr Verhalten in sauren Lösungen	Reaktion mit konz. und halbkonz. Salzsäure (V 1.1)
Warum und womit ist der Aluminiumdeckel innen beschichtet?	Reaktion mit verdünnter Salzsäure zur Untersuchung des Schichtenaufbaus (V 1.3.1)

#### Vorbereitungen der Expertenteams (2):

Für diese Stufe müssen die Informationsmaterialien vom Lehrer bereitgelegt werden. Zur Vorbereitung der Kurzreferate, deren Dauer 5 Minuten nicht überschreiten sollte, eignen sich Schulbücher, Zeitungsartikel, Fachzeitschriften über Lebensmittelverpackungen. Auch vom Lehrer bestellte Informationsschriften der Kunststoff- und Aluminium-Industrie sowie Werbebroschüren von einzelnen Packmittelherstellern dürften geeignet sein. Für die Experimente selbst sollten sehr gezielte Hinweise auf die Literatur gegeben werden, wobei im Zweifelsfall den Schülern direkt die Versuchsanleitung ausgehändigt werden sollte. Die Experten fertigen das jeweilige Versuchsprotokoll an. Sie konzipieren Aufgabenblätter, die in der Übungsphase (4) eingesetzt werden können.

#### Vortrag der Expertenteams (3):

Auf jedes Referat kann jeweils das thematisch entsprechende, kurze Experiment folgen. Danach sollte jeweils die Möglichkeit bestehen, Fragen zu stellen. Bei zeitaufwändigen Versuchen, die vorzugsweise von experimentell sehr versierten Schülern vorgetragen werden sollten - Auflösen von Polystyrol in Toluol (V 2.2, V 2.3) und Nachweis von Titandioxid (V 2.13) – könnte man es jeweils bei einem Demonstrationsexperiment belassen, während die anderen Experimente als praktische „Laienübungen“ vorgetragen werden. Dies kann in enger Verknüpfung mit der Übungsphase (4) geschehen.

#### Laienübungen, betreut durch Experten (4)

Diese Phase kann in direktem Zusammenhang mit den Vorträgen stattfinden, wobei die Laien entweder Experimentalvorträge protokollieren (V 2.2, V 2.3, V 2.13) oder selbst – unter Anleitung - einfache Experimente vortragen. Letztere könnten sich beispielsweise auf das Verbrennungsverhalten von Thermoplasten beziehen, wodurch bereits eine Identifizierung von PS bzw. PP möglich ist (V 2.2). Die beiden Thermoplaste lassen sich auch anhand ihrer unterschiedlichen Dichte trennen und identifizieren (V 2.2). Die sachliche Organisation dieser Phase kann von den Experten übernommen werden. Damit sollte es den Experten auch freigestellt sein, ob sich „ihre“ angelernten Laien thematisch im Referat auf das Experiment beziehen sollen (hier z.B. Müllverbrennung oder Abfalltrennung) oder ob eine breitere thematische Streuung mit vielen Variationsmöglichkeiten zu bevorzugen ist.

Im Rahmen dieser Übungen (4) kann nun von den Laien verlangt werden, beispielsweise Skizzen von Versuchsaufbauten zu beschriften, Beobachtungen und Deutungen einzutragen, aber auch abstrakte Darstellungsformen zu beherrschen, wie beispielsweise die Reaktionsgleichung, nach welcher Aluminium mit Salzsäure reagiert (V 1.1, V 1.3.1).

#### Korrektur von Protokollen durch Experten und Feedback an den Laien (5)

An die wechselseitige Korrektur von Protokollen sollte sich eine Phase der Wissenssicherung anschließen. Jetzt haben Laien nochmals Gelegenheit, die Experten um Rat zu fragen. Es bietet sich an, diese Phase zur Abstraktion der Ergebnisse zu nutzen, wie zum Aufbau eines Metalls, eines Kunststoffes oder von Cellulose (V 2.8.1).

## 11.5 Thema 5: „Nachweis der Lichtschutzfunktion bei Lebensmittelverpackungen“ (Chemie im Kontext)

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Licht als Energieform, Redoxreaktionen (Sek. II)

Es handelt sich um ein etwas isoliertes Thema, bei dem eine einzelne Funktion von Lebensmittelverpackungen im Zentrum steht. Versucht man, einen Überblick über die Möglichkeiten experimenteller Zugänge zu diesem Thema zu finden, so zeigt sich, dass nur wenige Experimente den Ansprüchen an einen unkomplizierten Einsatz im Unterricht gerecht werden. Es bietet sich die nachfolgend beschriebene „Modellreaktion“ an, in der Eisen(III)-Ionen bei Belichtung zu Eisen(II)-Ionen reduziert werden, welche dann mit rotem Blutlaugensalz zu Berliner Blau reagieren [107, S. 182-184]. Stellt man diese Redoxreaktion in den Mittelpunkt, so kann sie frühestens ab Jahrgangsstufe 11 (Redoxreaktionen) verstanden bzw. nachvollzogen werden [38]. Ersatzweise könnte man jedoch bereits in der Sekundarstufe I mit Hilfe der Oxidationszahlen bzw. Wertigkeiten das Kernstück dieser Reaktion im Ansatz nachvollziehen, nämlich das Entstehen von Eisen(II)-Ionen durch Lichteinfluss. Belässt man es allein beim Phänomen der Umfärbung von gelb nach blau und verzichtet somit auf die Abstraktion bzw. die Formelschreibweise, so kann die Reaktion als einfaches „Testverfahren“ für mehrere Verpackungsbeispiele angewandt werden und eignet sich damit bereits für den Anfangsunterricht Chemie, um die Wirkung des Lichtes innerhalb kürzester Zeit nachzuweisen.

Einerseits steht nur eine einzige chemische Reaktion im Mittelpunkt, andererseits zeigen sich diverse Bezüge zu realen Verpackungsmaterialien sowie zu fächerübergreifenden Ansätzen. Bei dieser Vielzahl an Verknüpfungen bietet es sich an, hier die Konzeption „Chemie im Kontext“ zu wählen [104].

In der folgenden Tab. 29 wird das Thema zunächst unter Zuhilfenahme der vier Phasen dieser Konzeption für den Chemieunterricht strukturiert.

Tabelle 29: Nachweis der Lichtschutzfunktion bei Lebensmittelverpackungen unter Anwendung des Konzeptes „Chemie im Kontext“ [104], [75]

Phase	Aktivitäten
1. Begegnungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Collage zum Thema: Wirkungen des Lichtes (Fotosynthese, Solarzellen, Bräunung der Haut, Bleichen von Farben usw.)</li> <li>➤ Mind-mapping: Was ist Licht? (Zusammensetzung, Farbigkeit, Energie, Lichtquellen usw.)</li> </ul>
2. Neugierphase	<p>Mögliche Leitfragen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Wie kann sich Licht auf Lebensmittel auswirken?</li> <li>➤ Wie lassen sich Lebensmittel vor Licht schützen?</li> </ul>
3. Erarbeitungsphase	<p>Gruppenarbeit („Expertenbildung“) zu Themen mit den folgenden Schwerpunkten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Experiment</li> <li>➤ Licht</li> <li>➤ Lebensmittel</li> <li>➤ Verpackungsmaterialien</li> </ul> <p>Jede Gruppe trägt eine Frage zu ihrem Thema in ein Übungsblatt ein, welches gegen Ende dieser Phase von allen bearbeitet werden soll.</p> <p>Auswertung, Zusammenfassung und Sicherung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Präsentation der zum Modellexperiment gehörenden Redoxgleichung (Tafel)</li> <li>➤ Vorführung des vom Lehrer ausgewählten Modellexperiments, Ergebniserfassung und Deutung der Ergebnisse (1 bis 2 Gruppen)</li> <li>➤ Kurzreferate einzelner Gruppen zu den verbleibenden Themenschwerpunkten</li> <li>➤ Bearbeiten des von allen vorher vorbereiteten Übungsblattes (alle)</li> </ul>
4. Vertiefungsphase/ Vernetzungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fertigstellung des Übungsblattes</li> <li>➤ Einordnung der Redoxreaktion zum Modellexperiment in das „Donator-Akzeptor-Konzept“</li> <li>➤ Licht und seine Wirkung im Hinblick auf das „Energie-Konzept“, das „Struktur-Eigenschaften-Konzept“ und „Stoff-Teilchen-Konzept“</li> <li>➤ Stoffklassen von Verpackungsmaterialien, (Aluminium, Braunglas, Karton) unter Berücksichtigung des „Struktur-Eigenschaften-Konzeptes“</li> <li>➤ Erwähnung weiterer Funktionen von Verpackungsmaterialien (Kontextbezug)</li> </ul>

In der „Begegnungsphase“ sollten in Gruppenarbeit die Gedanken der Lernenden gesammelt und geordnet werden. Hier eröffnet sich – neben dem Alltagsbezug - unmittelbar ein fächerübergreifender Ansatz zu den Bereichen Biologie und Physik. Die „Leitfragen“ der anschließenden „Neugierphase“ sollten jedoch unbedingt auf das Thema „Lebensmittelverpackungen“ hin zielen. In diese Richtungweisend, müssen zu Beginn der Erarbeitungsphase konkrete Arbeitsaufträge formuliert werden, welche als Gruppenarbeit mit dem Ziel der „Expertenbildung“ ausgeführt werden. Wenn möglich, sollten die Schüler gleich zu Beginn der Erarbeitungsphase sich auf einzelne Themen konzentrieren. Diese könnten sein:

### Themenbereich „Experiment“

- Beschreibung und Klassifizierung von unterschiedlich lichtdurchlässigen Packmitteln (Obstschale, Joghurtglas/Weißglas mit Schraubverschluss, Braunglas mit Schraubverschluss, Getränkekarton für H-Milch, Aluminiumfolie)
- Recherchen zu lichtabhängigen chemischen Reaktionen / Wie kann man den Einfluss des Lichtes experimentell nachweisen?
- Die Experimentieranleitung zu dem vom Lehrer ausgewählten Versuch wird den Schülern ausgehändigt und von ihnen mit verschiedenen unterschiedlich lichtdurchlässigen Packmitteln nachvollzogen (Versuch 4.5: „Lichtdurchlässigkeit von gefärbtem und ungefärbtem Glas“)
- Einrichten der Redoxgleichung zum Versuch, Berücksichtigung von Oxidationszahlen und Teilgleichungen

### Themenbereich „Licht“

- Spektralanteile, Farbigkeit, Wellenlänge, Frequenz, UV-Strahlung
- Licht und Energie

### Themenbereich „Lebensmittel“

- Zusammenfassung lichtempfindlicher Lebensmittel und ihrer Bestandteile
- Fotooxidation, ein lichtabhängiger Oxidationsprozess (Aktivierung von Sauerstoff durch Lichteinfluss)
- Welche Lichtschäden sind bei Lebensmitteln bekannt? (Berücksichtigung der Wellenlängen der Lichtbestandteile)
- Wie werden Lebensmittel vor Lichteinfluss geschützt? (Zusammenstellung von entsprechenden Packmitteln)

### Themenbereich „Verpackungsmaterialien“

- Beschreibung und Klassifizierung von unterschiedlich lichtdurchlässigen Packmitteln (Obstschale, Joghurtglas/Weißglas mit Schraubverschluss, Braunglas mit Schraubverschluss)
- Die Wirkung lichtundurchlässiger Packmittel im Hinblick auf die Wellenlängen der Lichtbestandteile (Präsentation der entsprechenden Packmittel: Getränkekarton für H-Milch, braune Glasflasche, Joghurtbecher mit Karton)
- Die Herstellung lichtundurchlässiger Anteile von Packmitteln (Aluminiumfolie, Verbundkarton, Braunglas)

Den Schülern werden vom Lehrer zu diesen genannten Themen verschiedene Quellenmaterialien zur Verfügung gestellt: Schulbücher, Fachbücher, Lexika, Broschüren der Glas-, Kunststoff- und Aluminiumindustrie, Werbematerialien von Spezialanbietern bestimmter Packmittel, Internetzugang.

In der Phase der „Auswertung, Zusammenfassung und Sicherung“ präsentieren die Schüler ihren Mitschülern die Ergebnisse ihrer Recherchen.

- Redoxgleichung der lichtabhängigen Reaktion
- Durchführung des Experiments mit unterschiedlich lichtdurchlässigen Materialien (V 4.5: „Lichtdurchlässigkeit von gefärbtem und ungefärbtem Glas“).
- Kurzvorträge zu den Themen „Licht“, „Lebensmittel“, Verpackungsmaterialien“
- Bearbeiten eines von allen Gruppen vorher erstellten Übungsblattes

In der abschließenden „Vertiefungs- und Vernetzungsphase“ wird das Übungsblatt bei Bedarf fertig gestellt, und es werden ungeklärte Fragen aufgegriffen [104].

## 11.6 Thema Nr. 6: „Metалldosen als Lebensmittelverpackungen / Experimente zur Ermittlung von Aufbau und Funktion“ (Chemie im Kontext)

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Metalle, Elektrochemie, Fällungsreaktionen, Löslichkeitsprodukt

Zu Beginn („Begegnungsphase“) sollten die Schüler mit Hilfe von Collagen und Zeichnungen einen Überblick über die verschiedenen Arten von Dosen gewinnen. Die Aktivitäten sollten sich auf Getränkedosen und Konservendosen beschränken. Bereits mit diesen aus dem Alltag bestens bekannten Verpackungen wird eine erhebliche Zahl an Stoffen erschlossen. Dazu gehören Eisen, Zinn und Papier bei der Konservendose sowie Eisen oder Aluminium bei der Getränkedose, wobei auch die Lackschichten von Innen- und Außenseite zu berücksichtigen sind. Dies deutet auf eine umfangreiche Zahl an Experimenten hin, die zu diesem Thema zur Verfügung stehen können. Unter den angesprochenen Stoffgruppen stellen die Metalle allerdings den Schwerpunkt dar. Zunächst werden die Schüler – auch fächerübergreifend mit dem Kunstunterricht – mit dem Aufbau dieser Metallverpackungen vertraut. Durch das bewusste Wahrnehmen der Strukturen lassen sich Fragen zur Dichtigkeit und Stabilität zielgerichtet ableiten. Die Entstehung der Metallverpackungen von der Erzverarbeitung über die gebrauchsfertige Dose bis hin zu Fragen des Recyclings sollten als „Gedankenlandschaft“ in Form von „Mind-maps“ nach dem vorläufigen Vorstellungsvermögen der Schüler strukturiert werden. Gegen Ende der „Begegnungsphase“ werden diese Schüler-Produktionen vorgestellt.

Die nachfolgende „Neugierphase“ schließt mit der Erstellung eines Arbeitsplans ab. Dieser umfasst die Sichtung geeigneter Experimentieranleitungen, den Aufbau bzw. das Erproben von Experimenten, das Ausarbeiten von Kurzreferaten mit Folien sowie die Sammlung geeigneter Übungsfragen für ein gemeinsam formuliertes und später gemeinsam zu bearbeitendes Übungsblatt. An diesen Aufträgen arbeiten die Schüler in kleinen Gruppen. Die Ergebnisse werden in der darauf folgenden „Erarbeitungsphase“ vorgestellt. Dann erst erfolgt die Bearbeitung des Übungsblattes, welches auch auf die Ergebnisse der Experimente Bezug nehmen sollte. In der nachfolgenden Tab. 30 wird ein Überblick über den geplanten Ablauf gegeben.

Tabelle 30: Erforschung des Aufbaus und der Funktion von Metalldosen. Nachweis der Bestandteile unter Anwendung des Konzeptes „Chemie im Kontext“ [104], [75]

Phase	Aktivitäten
1. Begegnungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Collagen und Zeichnungen zum Thema: Konservendosen und Getränkedosen mit typischen Füllgütern und Werbeaufschriften</li> <li>➤ Mind-mapping: Gewinnung, Herstellung und Verarbeitung von Metallen</li> </ul>
2. Neugierphase	<p>Mögliche Leitfragen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Woraus bestehen diese Dosen?</li> <li>➤ Wie lassen sich Bestandteile von Metalldosen nachweisen?</li> <li>➤ Können die Metalle den Lebensmitteln schaden?</li> </ul>
3. Erarbeitungsphase	<p>Gruppenarbeit („Expertenbildung“) zu den Bereichen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Experimente (Vorbereitung)</li> <li>➤ Kurzreferate (Metalldosen, Eignung für Nahrungsmittel)</li> </ul> <p>Jede Gruppe trägt eine Frage zu ihrem Thema in ein Übungsblatt ein, welches gegen Ende dieser Phase von allen bearbeitet werden soll.</p> <p>Auswertung, Zusammenfassung und Festigung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vorführung der Experimente und Diskussion der Ergebnisse</li> <li>➤ Präsentation der zu den Experimenten gehörenden Reaktionsgleichung</li> <li>➤ Bearbeiten des von allen vorher vorbereiteten Übungsblattes (alle)</li> </ul>
4. Vertiefungsphase/ Vernetzungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fertigstellung des Übungsblattes (bei Bedarf)</li> <li>➤ Einordnung der präsentierten chemischen Reaktionen in das „Donator-Akzeptor-Konzept“ bzw. in das „Konzept der Kinetik und des chemischen Gleichgewichts“</li> <li>➤ Herstellen eines Bezuges zwischen den Stoffklassen der Verpackungsmaterialien (Metalle, Kunststoff, Papier) und den Basis Konzepten „Stoff-Teilchen-Konzept“ und „Struktur-Eigenschaften-Konzept“</li> <li>➤ Metalle als Verpackungsmaterialien im Licht der Kontexte „Rost ohne Rast“ sowie „Steinzeit, Eisenzeit, Plastikzeit?“</li> </ul>

Folgende Themenbereiche sind denkbar:

#### Kurzreferate

- Historisches zu Metallverpackungen
- Verschiedene Konservierungsmethoden
- Herstellung und Verarbeitung von Stahl
- Herstellung und Verarbeitung von Aluminium
- Struktur und Eigenschaften von Metallen
- Schutz des Füllgutes vor direktem Kontakt mit dem Metall
- Herstellungsverfahren und Aufbau einer zweiteiligen Getränkedose
- Aufbau einer Konservendose
- Konstruktion von Metalldosen unter Berücksichtigung mechanischer Anforderungen
- Typische chemische Reaktionen von Metallen

### Experimente:

- Elektrolytische Zersetzung der Aluminium-Getränkedose, Nachweis der Aluminium-Ionen und des entstehenden Wasserstoffs (Projektionsversuch, V 1.4.1)
- Elektrolytische Zersetzung der Stahl-Getränkedosedose, Nachweis der Eisen(II)-Ionen und des entstehenden Wasserstoffs (Projektionsversuch, V 1.6)
- Zersetzung der Metallschicht einer Stahl-Getränkedosedose in 18%iger Salzsäure, Nachweisreaktionen mit der zurück bleibenden Außen- und Innenschicht (V 2.9)
- Qualitativer Nachweis der Metalle Zinn und Eisen als Bestandteile der Konservendose, Sulfid-Fällung mit Hilfe von Thioacetamid (V 1.7.3)
- Quantitativer titrimetrischer Nachweis von Zinn / Ermittlung der Schichtdicke von Zinn (V 1.7.2)
- Elektrolytische Raffination der Zinnbeschichtung einer Weißblech-Konservendose, Zinn-Abscheidung auf einem Eisennagel (V 1.7.1)
- Qualitative Zinn-Nachweise (Leuchtprobe, Nachweis als Molybdänblau, V 1.7.1)
- Demonstration der Zinn-Schutzfunktion am Eisennagel durch Bildung eines Lokalelementes in einer Agar-Petrischale (V 1.7.1)
- Untersuchung des Papiers an der Außenseite der Konservendose (V 2.7.1, V 2.8.1, V 2.8.2)
- Vergleichende Ermittlung des Quotienten „Masse Füllgut pro 100 Gramm Verpackungsmaterial“ (Aluminium, Stahl, Karton, Glas, PET)

Für die „Erarbeitungsphase“ sollte vom Lehrer ausreichend Informationsmaterial bereit gelegt werden. Dazu sollten die Schüler bereits auf die passenden Versuchsvorschriften hingewiesen werden, damit die Suche zeitlich begrenzt bleibt. Jedes „Experten“-Team führt seinen Versuch vor und ist gleichzeitig Zuschauer bei den anderen Versuchen. Die Ergebnisse werden genutzt, um das Übungsblatt zu bearbeiten. Die Elektrolysevorgänge können bereits ab Jahrgangsstufe 11 bearbeitet werden („Donator-Akzeptor-Konzept“), Papier und Kunststoffe ab Stufe 12 („Struktur-Eigenschaften-Konzept“ zu makromolekularen Stoffen). Für die Trennung der beiden Metallbestandteile von Konservendosen durch Fällung als Sulfide muss das „Konzept der Kinetik und des chemischen Gleichgewichts“ verstanden worden sein. Auf Grund der großen Zahl an Experimentiervorschriften mit einem entsprechenden Zeitaufwand sollten die Versuche jeweils nur ein Mal vorgestellt und gemeinsam ausgewertet werden. Ein Blick auf die „Kontexte“ zeigt, dass viele Aspekte des Themas „Lebensmittelverpackungen“ mit dem Kapitel „Steinzeit-Eisenzeit-Plastikzeit“ in Verbindung gebracht werden können, besonders im Hinblick auf die gebrauchsfertige Verpackung und ihre Funktion [75].

## **11.7 Thema 7: „Zerlegung von Polymeren durch Hydrolyse (PA, PET, PC, Cellophan)“, (Chemie im Kontext)**

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Da bei den Schülern die Kenntnis der funktionellen Gruppen, ihrer Reaktionsmöglichkeiten untereinander sowie der Aufbau verschiedener Makromoleküle Voraussetzung sind, um die Vorgänge bei der Zerlegung zu verstehen, sollten die Experimente zur Hydrolyse erst in den beiden letzten Jahrgangsstufen der gymnasialen Oberstufe eingesetzt werden.

Es kann von den Packmitteln Folien (PA, Cellophan) und Flaschen (PET, PC) ausgegangen werden. Polyamid ist häufig Außenschicht einer Verbundfolie (PA/PE), während Cellophan als lackierte und gefärbte Außenverpackung von Babybel-Käse eingesetzt wird. Während man PET als alltägliches Material antrifft, aus welchem gängige Getränkeflaschen bestehen, findet

man Polycarbonat (PC) als Flaschenmaterial fast ausschließlich bei Milch-Mehrweg-Flaschen. Ersatzweise kann man hier auf Kunststoff-Babyflaschen zurückgreifen. Alle vier Materialien haben die Eigenschaft gemeinsam, dass sie durch Hydrolyse zerlegt werden können, wobei sich die entstehenden Monomere relativ problemlos nachweisen lassen. Die Zerlegung von Polyamid (PA-6) ist ein Langzeitversuch, wobei die Versuchsdurchführung selbst unproblematisch ist. Das Problem lässt sich umgehen, indem man eine entsprechende Probe des Produkts vorausschauend vorbereitet und den Schülern zur Auswertung vorlegt. Folgende Inhalte stehen im Vordergrund:

- Aus curricularer Sicht werden bekannte Bindungen (Peptid-Bindung, Ester-Bindung, etherartige bzw. glykosidische Bindung) behandelt. Erschienen sie vorher nur bei der Verknüpfung von Monomeren, so erweisen sie sich jetzt als Stelle, an denen ein Makromolekül angegriffen und gespalten werden kann.
- Die Schüler lernen, dass sich diese polaren Materialien mit Hilfe polarer oder polarisierender Teilchen ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ) aufspalten lassen – im Gegensatz zu den Polyolefinen (PE, PP).
- Außerdem lernen die Schüler, dass aus authentischen Verpackungsmaterialien grundlegende chemische Bausteine darstellbar bzw. nachweisbar sind. Sie lernen, Verfahren zur Identifizierung entstehender Substanzen neu zu bewerten.
- Die Hydrolyseverfahren dienen nicht nur dem Kennenlernen der Bausteine, sondern weisen auch auf prinzipielle Möglichkeiten des Recyclings hin.
- Außerdem zeigen die Hydrolysevorgänge Verbindungen zum Fach Biologie auf (Stoffwechsel, Zellbiologie): Zerlegung von Peptiden in Aminosäuren.

Die nachfolgende Tab. 31 vermittelt einen Überblick über einige ausgewählte Aspekte, nach denen diese vier Materialien eingeordnet werden können.

Tabelle 31: Übersicht über ausgewählte Unterschiede zwischen den Materialien Polyamid-6, Polyethylenterephthalat, Polycarbonat und regenerierter Cellulose mit Angaben der Experimentiervorschriften

<b>Polymer</b>	<b>PA-6 (Polyamid)</b>	<b>PET (Polyethylenterephthalat)</b>	<b>PC (Polycarbonat)</b>	<b>Cellophan (regenerierte Cellulose)</b>
Anwendung	Außenschicht einer Verbund-Folie	Getränkeflasche (Ein- oder Mehrweg)	Milchflasche (Babyflasche)	Außenverpackung von Babybel-Käse
Eigenschaft	Stabilität, Sauerstoff-Barriere (V 2.5.3, V 2.15, V 4.1.2)	Stabilität, Dichtigkeit gegen CO <sub>2</sub> (V 4.2.1 bis V 4.2.5)	Schlagzäh, sterilisierbar mit Wasserdampf	Gut verarbeitbar und lackierbar, geringe Rückstellkraft
Einfache Nachweisreaktionen des Polymers	Anfärben mit Lebensmittelfarbstoffen (Säurefarbstoffe, V 2.5.2)	Anfärben mit rotem Farbstoff aus der Babybel-Folie (V 2.12.3)	Blaufärbung mit Dimethylaminobenzaldehyd (V 2.4.1)	Molisch-Reagenz (V 2.8.1)
Thermisches Verhalten	Thermoplast (V 2.5.6)	Thermoplast (V 2.16.2)	Thermoplast	Duroplast (V 2.8.2)
Zwischenmolekulare Kräfte	Wasserstoff-Brücken	Dipol-Dipol-Kräfte	Dipol-Dipol-Kräfte	Wasserstoff-Brücken
Bindung zwischen den Monomeren	Peptidbindung	Ester	Ester	Glykosidisch (etherartig)
Im Experiment zersetzt durch	Salzsäure (V 2.5.3)	Kalilauge (V 2.1)	Kalilauge (V 2.4.2)	Schwefelsäure (V 2.8.1, V 2.8.2)
Nachgewiesenes Monomeres (Baustein)	$\epsilon$ -Aminocapronsäurehydrochlorid	Terephthalsäure	Bisphenol A	Mono-, Di-, Oligosaccharide
Nachweismethode	Schmelztemperatur 123 °C (V 2.5.7)	Ausfällung in Wasser durch Ansäuern, Saugfiltration (V 2.1)	Ausfällung in Wasser durch Ansäuern, Saugfiltration (V 2.4.2)	Fehling-Probe (V 2.8.2)

Die vielen in der Tab. 32 aufgelisteten Bezüge zeigen einerseits die Verknüpfungsmöglichkeiten zwischen Kontext und curricularen Ansprüchen, andererseits weisen sie auch auf Möglichkeit eines vielfältigen Methodeneinsatzes hin.

In der „Begegnungsphase“ sollen die Schüler ihren Bezug zu diesen Materialien zum Ausdruck bringen und vorhandenes Vorwissen strukturieren. In der „Neugierphase“ sollte bereits die Frage nach der Polarität von Atombindungen gestellt werden.

Tabelle 32: Zerlegung von Polymeren und Nachweis der jeweiligen Monomere durch geeignete Reagenzien unter Anwendung des Konzeptes „Chemie im Kontext“ [104], [75]

Phase	Aktivitäten
1. Begegnungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Foto-Collagen zum Thema: Käseverpackung, PET-Flasche, Mehrweg-Kunststoffflasche für Milch sowie Verpackungsfolie für Babybel-Käse (bzw. Einmachfolie)</li> <li>➤ Mind-mapping: Eigenschaften von Säuren und Laugen / Erinnerungen an bisherige Versuche im Chemieunterricht</li> </ul>
2. Neugierphase	<p>Mögliche Leitfragen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Welchen Schluss auf die Struktur lässt die Angreifbarkeit durch Säuren oder Laugen auf diese Kunststoffe zu?</li> <li>➤ Frage nach der Angreifbarkeit von Polyethylen durch Säure</li> <li>➤ Formulierung konkreter Arbeitsaufträge</li> </ul>
3. Erarbeitungsphase	<p>Gruppenarbeit („Expertenbildung“) zu den Bereichen</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Experimente (Vorbereitung)</li> <li>➤ Kurzreferate (Vorbereitung)</li> </ul> <p>Jede Gruppe trägt eine Frage zu ihrem Thema in ein Übungsblatt ein, welches gegen Ende dieser Phase von allen bearbeitet werden soll.</p> <p>Auswertung, Zusammenfassung und Festigung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kurzreferat (Kohlenstoffchemie: Aufbau der Makromoleküle) Herstellen eines Bezuges zwischen der Struktur der Polymere und ihren Eigenschaften</li> <li>➤ Vorführung der Experimente und Diskussion der Ergebnisse</li> <li>➤ Präsentation der zu den Hydrolyse-Experimenten gehörenden Reaktionsmechanismen</li> <li>➤ Einordnung der präsentierten chemischen Reaktionen in das „Struktur-Eigenschaften-Konzept“</li> <li>➤ Bearbeiten des im Sinne einer Tabelle vorbereiteten Übungsblattes (alle)</li> </ul>
4. Vertiefungsphase/ Vernetzungsphase	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fertigstellung des Übungsblattes (bei Bedarf)</li> <li>➤ Stoffklassen der Verpackungsmaterialien (Kunststoff) und den Basiskonzepten „Stoff-Teilchen-Konzept“ und „Struktur-Eigenschaften-Konzept“</li> <li>➤ Kunststoffe als Verpackungsmaterialien im Licht der Kontextbetrachtung „Steinzeit, Eisenzeit, Plastikzeit?“</li> <li>➤ Querverbindungen zum Biologieunterricht: Peptide, Holzverzuckerung</li> </ul>

In der „Erarbeitungsphase“ liegen die Themen fest. Anhand eines Fragenkataloges arbeiten die Schüler in kleinen Gruppen möglichst selbstständig im Hinblick auf die Präsentation der nachfolgend dargestellten Themen.

### Kurzvorträge zum Thema „Kohlenstoffchemie“

- Vorstellung funktioneller Gruppen (1 Gruppe)
- Bausteine der vier Makromoleküle (1 Gruppe)
- Aufbau der vier Makromoleküle unter besonderer Berücksichtigung der Verknüpfung der Monomere (1 Gruppe)
- Zwischenmolekulare Kräfte bei den vier Polymeren (1 Gruppe)
- Herstellungsverfahren der vier Packmittel

### Experimente

- Einfache Nachweisreaktionen der vier Materialien (4 Gruppen): V 2.5.2, V 2.12.3, V 2.4.1, V 2.8.1 (Tab. 31)
- Versuchsdurchführung zur Hydrolyse der vier Materialien (4 Gruppen): V 2.5.3 (mit V 2.5.7), V 2.1, V 2.4.2, V 2.8.2 (Tab. 31)

### Kurzvorträge zum Thema „Kohlenstoffchemie“

- Polare Atombindungen, Elektronegativität des Sauerstoffs in Verbindungen mit Kohlenstoff- und Wasserstoff-Atomen (1 Gruppe)
- Definition der Protolysereaktion (1 Gruppe)
- Erläuterungen zu den vier Hydrolyse-Experimenten / Darstellung der Reaktionsmechanismen (4 Gruppen)
- Erläuterungen zu den Nachweis-Verfahren der Produkte der Hydrolyse (1 Gruppe): V 2.5.7, V 2.1, V 2.4.2, V 2.8.2 (Tab. 31)

Der Beginn der Vorträge leitet zu den Materialien hin, dann folgt die experimentelle Identifizierung der Packstoffe durch vier Gruppen. Anschließend führen die Schüler von vier weiteren Gruppen nacheinander die Hydrolyse-Experimente durch. Die nachfolgenden Kurzvorträge sollten die Reaktionsmechanismen der Hydrolyse im Hinblick auf das „Struktur-Eigenschaften-Konzept“ stets im Blick haben. Im Sinne der Protolyse-Vorgänge muss das „Donator-Akzeptor-Konzept“ berücksichtigt werden. Eine geeignete Tabelle bzw. ein entsprechend gestaltetes Übungsblatt sollte als „Auswertung, Zusammenfassung und Sicherung“ die Phase der „Erarbeitung“ abschließen.

In der abschließenden „Vertiefungsphase/Vernetzungsphase“ sollten die Reaktionsmechanismen der Hydrolyse im Rahmen des „Struktur-Eigenschaften-Konzeptes“ wiederholend aufgegriffen werden. Ein Blick sollte auf die biologischen Themen „Saure Hydrolyse von Peptiden“ bzw. „Holzverzuckerung“ geworfen werden. Außerdem kann der Kontext „Steinzeit-Eisenzeit-Plastikzeit“ unter dem Aspekt der Lebensmittelverpackungen betrachtet werden.

## 11.8 Thema 8: „PVC als Bestandteil von Verpackungen“ (Wahldifferenzierter Chemieunterricht)

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Halogene, Kohlenstoffchemie, Makromoleküle

Als ein motivierender Zugang zur Chemie bietet sich beispielsweise die Erarbeitung des Themas „PVC als umstrittenes Verpackungsmaterial für Lebensmittel“ an. Auch die Brisanz dieses Packstoffes (Chlorchemie, Weichmacher, Verbrennungsgase) dürfte bei den Schülern Neugierde und Erkenntnisinteresse fördern.

Das Thema „PVC“ hat schon seit den Achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts aus ökologischen Gründen für Schlagzeilen gesorgt. Die gesundheitsschädigende Wirkung der Verbrennungsprodukte (Chlorwasserstoffgas, Dioxin) und Weichmacher (Phthalsäureester) wurde häufig in den Medien thematisiert. Angesichts dieses komplexen Hintergrundes empfiehlt es sich, dieses Thema erst in der Jahrgangsstufe 12 im Rahmen der „Kohlenstoffchemie“ zu bearbeiten. Wichtig erscheint es jedoch, den Aufbau der PVC-Makromoleküle mit ihren Eigenschaften in Verbindung zu bringen, wobei die besondere Funktion der Weichmacher hervorzuheben ist.

Entsprechend dem typischen Verlauf des Wahldifferenzierten Chemieunterrichts sollte bereits in der Einführung die Umweltproblematik von PVC angesprochen werden. Gleichzeitig sollten den Schülern Verpackungsmaterialien präsentiert werden, die PVC bzw. PVDC enthalten. Für das Fundamentum empfiehlt es sich, die Strukturformeln der Monomeren und Polymeren vorzustellen, ebenso die des Weichmachers Dioctylphthalat. Nachfolgend ist ein möglicher Verlauf einer Unterrichtseinheit zum Thema „PVC“ dargestellt (Tab. 33).

Tabelle 33: Möglicher Verlauf einer Unterrichtseinheit im Wahldifferenzierten Chemieunterricht zum Thema „PVC als umstrittenes Verpackungsmaterial für Lebensmittel“ in Anlehnung an WOEST (2002) [45, S. 224-230]

Phase	Inhalt
Einführung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Befragung der Schüler zu ihren Vorstellungen und Assoziationen zum Thema „PVC“</li> <li>➤ Präsentation einer Sammlung von Packmitteln, welche PVC (bzw. PVDC) enthalten</li> <li>➤ Anschreiben von Strukturformeln: Chlorethen bzw. Vinylchlorid, typischer Ausschnitt aus dem PVC-Polymer, Weichmacher Diocetylphthalat</li> <li>➤ Hinweise zu Arbeitstechniken und Anfertigung eines Protokolls</li> </ul>
Freies Arbeiten	<p>Die Schüler bearbeiten je eines der angebotenen Themen in Gruppenarbeit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ PVC: Pro und contra</li> <li>➤ Chlorhaltige Verpackungsmaterialien im Überblick; qualitativer Nachweis von PVC</li> <li>➤ Quantitative Nachweise von PVC</li> <li>➤ Bedeutung der Weichmacher und ihre Problematik</li> <li>➤ Isolierung der Weichmacher und Nachweismethoden</li> </ul>
Auswertung/ Zusammenfassung	<p>Die einzelnen Gruppen halten jeweils einen kurzen Vortrag im Plenum:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Kurzreferate</li> <li>➤ Berichte über den Verlauf der Experimente und über die Ergebnisse</li> <li>➤ Vertiefung und Systematisierung ausgewählter Aspekte durch den Lehrer (besondere Berücksichtigung der Funktion der Weichmacher in PVC-Kunststoffen, Anwendung des „Struktur-Eigenschaften-Konzeptes“)</li> </ul>

Für die Phase des „Freien Arbeitens“ sollte umfangreiches Lernmaterial angeboten werden, also nebst Schulbüchern und Lexika aus verschiedenen Schulfächern auch Einzelinformationen aus dem Bereich Verbraucherschutz, Umweltschutz und Technik. Als Medien eignen sich auch Fachzeitschriften sowie Zeitungsartikel, gerade zum vorliegenden Thema. Der Lehrer sollte zumindest einen verbindlichen Kernbereich an Themen und Experimenten vorgeben. Weitere Themen sollten von den Schülern ergänzt werden dürfen. Die Schüler haben die Möglichkeit, unter mehreren Angeboten frei zu wählen. In arbeitsteiliger Gruppenarbeit könnten also beispielsweise folgende Themen erarbeitet werden:

#### Experimente:

- Nachweis von PVC in verschiedenen Packmitteln (und an einem Beispiel von PVDC) durch die Beilsteinprobe (V 2.10.1, V 2.10.3, V 2.12.2)
- Stoffliche Identifizierung von PVC-haltigen Folien: Kaugummi-Blisterverpackung, Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers (V 2.10.1)
- Herauslösen des Weichmachers aus einer Frischhaltefolie (Champignon-Verpackung) mit Ethanol (V 2.10.3)
- Vergleich einer PVC-Folie mit und ohne Weichmacher: Haptik, Geräusch, FTIR-Spektroskopie (V 2.10.3)
- Quantitative Untersuchung einer Deckeldichtung mit dem SCHÖNIGER-Verfahren (V 2.10.4)
- Herauslösen eines Weichmachers aus einer Deckeldichtung mit Hilfe von Olivenöl (V 2.10.2)

- Herauslösen des Weichmachers aus Deckeldichtungen (Metallschraubdeckel für Joghurtglas und Mineralwasserflasche, Frischhaltefolie) mit Aceton (V 2.10.6)
- Nachweis von Phthalaten als Weichmachersubstanz mit Hilfe der Dünnschichtchromatografie (V 2.10.6)
- Nachweis von Phthalaten als Weichmachersubstanz durch Herstellung einer fluoreszierenden Substanz (V 2.10.5)
- Nachweise von anderen Kunststoffen aus Verpackungen: PET, PP und PS (V 2.2, V 2.3)

#### Referate:

- PVC im Spiegel der Presse
- Einsatzgebiete von PVC – auch außerhalb des Verpackungsbereiches
- Weichmacher – Funktion und Gefährlichkeit
- Zwischenmolekulare Kräfte im PVC-Material
- PVC unter dem Aspekt „Synthetische Polymere – Struktur und Eigenschaften von makromolekularen Stoffen“
- Herstellung von PVC
- Substitution von PVC durch andere Kunststoffe

Zur abschließenden gemeinsamen Vertiefung und Systematisierung sollte der Lehrer das „Struktur-Eigenschaften-Konzept“ in den Vordergrund stellen. Zur Wiederholung oder Bearbeitung des Themas „Polymerisation“ bietet dieses Basiskonzept Gelegenheit. Letztendlich aber sollte das Thema „Synthetische Polymere – Struktur und Eigenschaften von makromolekularen Stoffen“ nochmals vertieft werden.

Ein Blick auf den Kontext dieser Unterrichtseinheit zeigt, dass offensichtlich stoffliche Vorteile einer Substanz in der Öffentlichkeit völlig in den Hintergrund getreten sind. PVC zeigt sehr gute Eigenschaften hinsichtlich der Verarbeitbarkeit. In der Fachliteratur liest man außerdem: „Die Durchlässigkeit von PVC-Folien für Sauerstoff macht sie besonders für die Verpackung von frischen Fleischwaren geeignet. Für die Verpackung von Obst und Gemüse ist die Durchlässigkeit der PVC-P-Folien für Sauerstoff und Kohlendioxid ebenfalls erwünscht. Das Kürzel PVC-P besagt, dass die PVC-Folie Weichmacher enthält. Ihre Bedeutung für die Verpackung von Lebensmitteln ist jedoch in letzter Zeit stark zurückgegangen“ [18, S. 117]. Die Schüler sollten dahingehend informiert werden, dass in PVC-Folien die Phthalsäureester mittlerweile durch ungefährliche Weichmachersubstanzen ersetzt wurden, z.B. durch Citronensäureester.

### **11.9 Thema 9: „Welche Verpackung für unsere Schulmilch?“ (Projektunterricht / projektorientierter Chemieunterricht)**

Ein derartiges Vorhaben bietet sich z.B. für die 10. Jahrgangsstufe im Wahlpflichtunterricht an. Nach der von DEMUTH skizzierten und erläuterten Projektmethode als „4-Stufen-Plan“ wird in der „Stufe der Anregung“ ein „in der Lebenswelt angesiedeltes Problem“ der Startpunkt für den Ablauf des Projektes sein

#### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Kenntnisse über Metalle, Säuren, Halogene, Kohlenwasserstoffe, Makromoleküle

#### Stufe der Anregung (1)

Ein durchaus realistisches Problem für eine Schule mit ökologischem Profil und dem Anspruch auf authentische Vorbildfunktion für ein nachhaltiges Wirtschaften könnte z.B. darin bestehen, sich fundiert mit der Frage auseinanderzusetzen, in welcher Verpackung die Schulmilch bzw. der Kakao ausgegeben werden sollen. Zur Auswahl stehen die 1-Liter-Mehrweg-

Glasflasche mit Weißblech-Nockenverschluss sowie der 0,2-Liter-Getränkekartons mit Aluminiumschicht. Eine Entscheidung soll getroffen werden. Vorher sollen die Schüler jedoch eine fachliche Analyse über die Materialien dahingehend erstellen, in wie fern diese Materialien den ökologischen Ansprüchen, dem Schutz des Füllgutes sowie der Praktikabilität im Alltag gerecht werden. Um die Schüler verstärkt zu motivieren und ihnen zu bestätigen, dass sie in das Schulleben eingebunden sind, könnte auch von der Schulleitung, die ja eine Entscheidung treffen muss, der Auftrag an die Schüler direkt gegeben werden.

#### Stufe der gemeinsamen Planung (2)

Zunächst sollten sich die Schüler vorstellen, welches Szenario im Alltag abliefe. Man gehe der Einfachheit halber davon aus, dass jeder Schüler, der Milch oder Kakao trinkt sich in eine Liste einträgt, womit er sein Konsumverhalten für 1 Schuljahr festlegt. Für jede Woche werden einige Schüler zum Milchdienst eingeteilt. Diese Institution sorgt dafür, dass alle Klassen mit der gewünschten Getränkmenge versorgt werden. Bei einer Anzahl von 15 Schulmilch-Abonnenten sähe das Szenario für die Glasflasche (1 L) folgendermaßen aus: Vor Unterrichtsbeginn wird ein Kunststoff-Getränkekasten mit mindestens 3 Glasflaschen Milch/Kakao in das Klassenzimmer gestellt. In den freien Schächten des Getränkekastens befinden sich 15 gewaschene und trockene Kunststoff-Becher. Im anderen Fall müssten 15 Getränkekartons (0,2 L) in einer Schachtel aus Wellpappe oder in Resten einer Schrumpffolie morgens in den Klassenraum gestellt werden. Die Bereitstellung von Trinkbechern ist nicht erforderlich, da an jede Einzelpackung ein Strohhalm – von einer Folie umhüllt – angeklebt ist.

Es sollten nun Vorschläge zur Planung gesammelt werden. Wenn eine fundierte Entscheidung zwischen den beiden Verpackungsarten getroffen werden soll, dann sollte auch die ganze Fülle an Unterschieden zwischen den beiden Materialien erfasst werden. Als Ausgangspunkt sollte das wertvolle Nahrungsmittel dienen, dann erst folgt die Bewertung der Verpackungen aus stofflicher und ökologischer Sicht. Folgendes Konzept erscheint daher geeignet, aus ganzheitlicher Sicht das Thema „Glasflasche oder Milchkarton?“ zu strukturieren (Tab. 34).

Tabelle 34: Eine mögliche Strukturierung des Projektunterrichtes zum Thema „Wie soll unsere Schulmilch verpackt sein?“

Warum ist Schulmilch gut für uns?		
Wie wird die Milch verarbeitet und abgefüllt?		
Welchen Gefährdungen sind Milchprodukte ausgesetzt?		
Was muss die Milchverpackung leisten?		
<b>Glas</b>	<b>Vergleich</b>	<b>Karton</b>
	Aus welchen Materialien und Materialkombinationen ist die Verpackung jeweils aufgebaut?	
	Wie werden diese jeweiligen Materialien hergestellt?	
	Können sie in Wechselwirkung mit dem Milchinhalt treten?	
	Was geschieht jeweils mit den Materialien, wenn wir die Milch ausgetrunken haben?	
	Inwiefern fällt das notwendige regelmäßige Spülen der Becher organisatorisch und ökologisch ins Gewicht?	
	Wie sind die jeweiligen Materialien und ihre gesamte „Lebensgeschichte“ aus der Sicht des Umweltschutzes zu bewerten?	
	Auf welche Verpackung trifft letztlich die Entscheidung (mit Begründung)?	

Alle in der Tabelle aufgelisteten Punkte sollten bearbeitet werden. Die wichtigsten Erkenntnisse zu den aufgeführten Punkten sollten übersichtlich zusammengefasst auf einem Poster dargestellt werden. Das Ziel des Projektes besteht also darin, eine begründete Entscheidung für eine der Getränkeverpackungen zu treffen und die wichtigsten Aspekte dieser Verpackungen zu dokumentieren.

Ein Projektplan dient der genauen Strukturierung des Vorhabens. Personelle, inhaltliche, modale, kausale, zeitliche und räumliche Faktoren werden hier festgelegt. Dazu erscheint eine Einteilung in folgende gruppenteilige Aktivitäten sinnvoll: Ausarbeitung von Themen für Referate, Erproben von Experimenten, Durchführung verschiedener Recherchen zu praktischen Zusammenhängen, Anfertigung von Skizzen und Fotografien zu Dokumentationszwecken. Nachfolgend werden Themenbereiche und entsprechende Aktivitäten vorgestellt.

#### Arbeitsaufträge

##### Themenbereiche: Dokumentation und Design:

- Fotos werden von den Verpackungsmaterialien vor und nach dem Gebrauch gemacht.
- Die Angaben auf den Etiketten werden notiert. Welche Schlüsse lassen sich daraus ziehen? Ist die äußere Aufmachung informativ? Ist sie ansprechend? (Inhalte, Mindesthaltbarkeitsdatum, Hersteller, Werbung)

## Referate

### Themenbereich: „Milch/Kakao“

- Warum ist Milch gesund für uns? / Welche Inhaltsstoffe sind wichtig?
- Was geschieht mit der Milch in der Zeit zwischen dem Melken und dem Einkauf im Supermarkt bzw. dem Verteilen in der Schule?
- Wie wird Kakao hergestellt?
- Wodurch wird die Frische bzw. Qualität von Milch gefährdet?
- Was muss geschehen, damit Milch und Kakao einige Tage haltbar sind?

## Recherchen

### Themenbereich: „Praktische Dinge/Beobachtungen“

- Wie lang ist der Weg, den die Schulmilch von der Molkerei bis zu unserer Schule zurücklegt?
- Wo und wie wird die Milch vor dem Verteilen in der Schule gelagert?
- Welche praktischen Dinge sind hervorzuheben? Ist die Verpackung wieder verschließbar? Lässt sie sich bequem und ohne großen Zeitaufwand handhaben? Ist die Getränkeverpackung gegen Umfallen gesichert? Welche Besonderheiten fallen dir jeweils beim Öffnen auf?
- Was geschieht mit den eingangs erwähnten Verpackungen, wenn die Schüler ihre Milch getrunken haben? Bleiben Reste? Werden diese später noch verwertet? (Überprüfung über einen längeren Zeitraum)
- Wer spült die Becher, falls die Glasflasche bevorzugt wird?

## Referate

### Themenbereich: „Materialien“

- Glas und seine Eigenschaften
- Herstellung von Behälterglas
- Wie wird Glas recycelt?
- Geschichte des Glases
- Die gesamte Lebensgeschichte einer Mehrweg-Glasflasche (Erzählung in der Ich-Form)
- Warum wird nicht nur Weißglas, sondern auch Braunglas verwendet?
- Herstellung des Schraubdeckels aus Weißblech
- Wie kommt es, dass der Deckel dicht schließt?
- Wie werden Trinkbecher und Flaschenkasten hergestellt?
- Wie wird Papier/Karton hergestellt?
- Aufbau eines Getränkekartons, mit und ohne Aluminium / Wodurch halten die Schichten zusammen?
- Herstellung von Aluminium/einer Aluminiumfolie
- Herstellung von Karton
- Polyethylen: Eigenschaften und Verarbeitung
- Welche anderen Verpackungen für Milch findet man im Supermarkt?
- Wie wird Glas recycelt?
- Wie wird der Schraubdeckel aus Metall recycelt?
- Wie wird der Getränkekarton recycelt?
- Geschichte des Getränkekartons
- Lebensgeschichte eines Getränkekartons (Erzählung in der Ich-Form)

## Referate

### Themenbereich: „Funktionen“

- Welche Funktionen haben Lebensmittelverpackungen?
- Warum muss Milch z.B. vor Licht und Sauerstoff geschützt werden?

- Warum knackt der Deckel der Glasflasche beim ersten Öffnen?

### Referate

#### Themenbereich: Ökologie

- Wie viele Verpackungseinheiten sind jeweils bei angenommenen 100 Abonnenten nötig, damit jeder Schüler, der sich in die Milch/Kakao-Liste eingetragen hat, pro Tag durchschnittlich 0,2 Liter Milch bekommt? Mache ein Foto der beiden Verpackungsmaterialien, auch bei einer kleineren Abonnentenzahl.
- Welche Masse an Verpackung ist jeweils nötig, um 100g Milch/Kakao zu verpacken?
- Berechne, welches Volumen jeweils 1000g Getränk benötigen, wenn sie transportiert werden.
- Welche Unterschiede bestehen zwischen Einweg- und Mehrweg-Verpackungen?
- Was versteht man unter einer „Ökobilanz“?
- Welche Unterschiede bestehen zwischen der „Ökobilanz“ von Glas und von Verbundkarton?

### Experimente:

#### Die Glasflasche:

- Schmelzen von Flaschenglas im Mikrowellenofen (V 3.3)
- Alkalische Reaktion der Glasgrieß-Suspension im Vergleich zu Borosilicat-Glas (V 3.2.2)
- Elektrische Leitfähigkeit der Glasgrieß-Suspension (V 3.2.1)
- Papiernachweis am Etikett (V 2.8.1, V 2.8.2)
- Zersetzung des Metalldeckels mit konz. Salzsäure (entsprechend V 2.9)
- Nachweis der Eisen-Ionen (Anhang von V 1.7.3, V 1.6)
- Herausschneiden der Dichtungsmasse des Deckels und Durchführung der Beilsteinprobe (V 2.10.1, V 2.10.3)
- Nachweis des Weichmachers in der Dichtungsmasse (V 2.10.2, V 2.10.4, V 2.10.5, V 2.10.6)
- Nachweis der Sauerstoffdichtigkeit eines wiederverschließbaren Glases mit Nockenverschluss und Dichtungsmasse – wegen der einfacheren Handhabung am Beispiel eines Joghurtglases (V 4.1.1)
- Nachweis der Lichtdurchlässigkeit von Glas ebenfalls am Beispiel eines Joghurtglases (V 4.5)

#### Der Getränkekarton

- Zerlegung des Getränkekartons mit Toluol (V 2.7)
- Recycling der Polyethylen-Schicht, Gießen einer Folie (V 2.7)
- Messung der Schichtdicken von Aluminium und Karton (V 2.7)
- Ermittlung der Massenanteile der Bestandteile (V 2.7)
- Cellulosenachweis (V 2.8.1, V 2.8.2)
- Überprüfung des Kartons auf Holzbestandteile (Lignin, V 2.7.1)
- Aluminiumnachweis mit Alizarin S (V 1.2.1)
- Zersetzung der Aluminiumschicht mit Salzsäure (V 1.1, V 2.7)
- Bestimmung der Aluminiumschichtdicke durch ein volumetrisches Verfahren (V 1.3.2)
- Zusammenschmelzen des Getränkekartons zu einer Platte
- Ermittlung des Materials des Trinkhalmes und seiner Hülle (V 2.2, V 2.10.1)
- Ermittlung des Materials der Schrumpffolie / Modellversuch zur Schrumpffolie (V 2.15, V 2.2)
- Nachweis von Cellulose am Umverpackungs-Karton (V 2.8.1, V 2.8.2)

Es sollte den Schülern möglichst eine Vielfalt an Informationsquellen zur Verfügung stehen: Schulbücher, Lexika, Zeitungsartikel, Fachbücher, Fachzeitschriften, Broschüren der Glashersteller, Broschüren der Getränkekartonhersteller, Fachinformationen zum Thema „Milch“ und „Kakao“, Fachinformationen zum Thema „Lebensmittelhygiene“, Gesetzestexte, Informationsschriften des Verbraucherschutzes, Ökobilanzen so wie Experimentieranleitungen.

Die Stufe der Ausführung (3)

Den Lernenden selbst sollte es nun überlassen sein, in kleinen Arbeitsgruppen ein bis zwei in der Planungsphase gewählte Themen zu bearbeiten. Sie sind gehalten, innerhalb der Gruppe zu arbeiten, sich auszutauschen und Zwischenergebnisse vorzulegen. Denkbar wäre es, im Rahmen von Besprechungen anhand einer Grafik die thematische Einordnung der aktuellen Arbeitsschwerpunkte bzw. Fortschritte in der Umsetzung des Arbeitsplanes darzulegen. Derartige Grafiken könnten z.B. die drei folgenden Abbildungen 38-40 zur Qualitätssicherung des Nahrungsmittels sowie zur experimentellen Erschließung der Materialien sein.

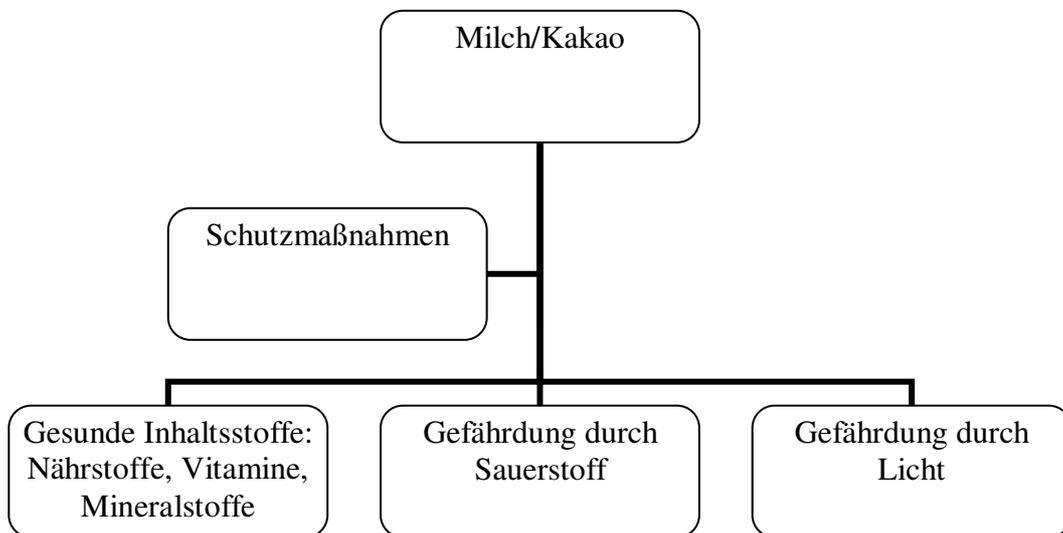


Abbildung 38: Anordnung der Gedanken zur Gefährdung der Qualität des Lebensmittels

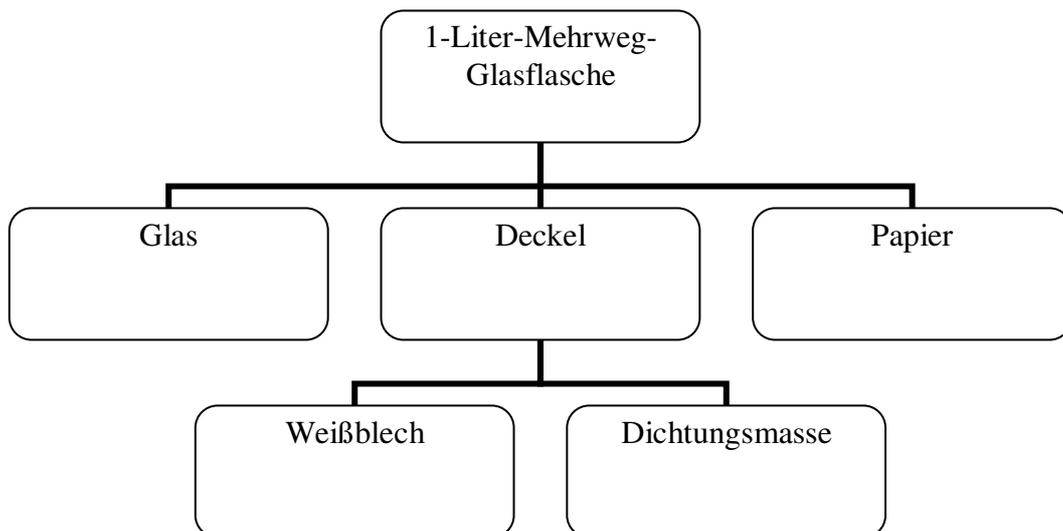


Abbildung 39: Experimentell zugängliche Substanzgruppen der Glasflasche. Nicht berücksichtigt sind Trinkbecher und Getränkekasten.

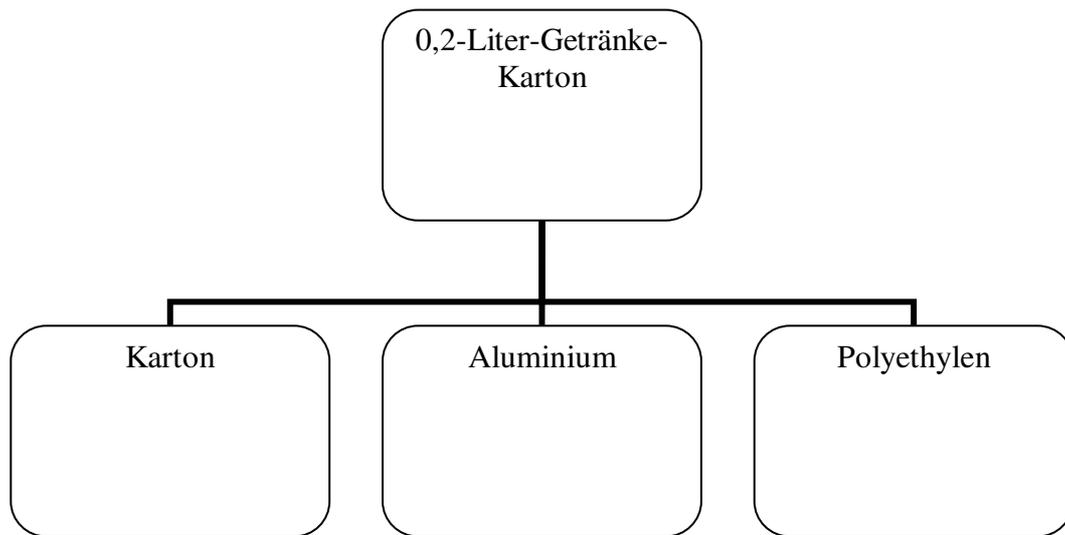


Abbildung 40: Experimentell zugängliche Substanzgruppen des Verbundkartons. Nicht berücksichtigt sind Trinkhalm, umhüllende Folie sowie Umverpackung (Karton oder Schrumpffolie).

Angesichts eines hohen Maßes an Selbstständigkeit und Eigeninitiative ist es nicht unwahrscheinlich, dass im Rahmen der Erkenntnisgewinnung sich Aktivitätsschwerpunkte und vorgefasste Entscheidungen verlagern bzw. revidiert werden. Prinzipiell ist jedoch davon auszugehen, dass die Lernenden in den Kleingruppen sich zunehmend mit ihrem Thema identifizieren und angesichts ihrer Verantwortung ein hohes Maß an Zielstrebigkeit entwickeln.

#### Die Stufe der Ergebnissicherung (4)

Das bereits in der Stufe der gemeinsamen Planung gesetzte Ziel dieses Projektes ist die Argumentationshilfe und Begründung für die Entscheidung zu der Frage: „Welche ist die richtige Verpackung für unsere Schulmilch?“. Als fassbares Produkt dieser Entscheidungsfindung ist ein Poster sinnvoll, in welchem alltagsbezogene, fachliche und experimentelle Zugänge zur Lösung dieses Problems übersichtlich dokumentiert werden. Als Vorgabe für die Strukturierung könnten die eingangs aufgeführten 10 Punkte dienen. Diese Dokumentation sollte aber auch eine Beurteilung zwischen Plan und Ergebnis ermöglichen. DEMUTH führt dazu aus: „Es hat sich als besonders vorteilhaft erwiesen, in der Projektarbeit ein konkretes Produkt als Ergebnis anzusteuern. Das Produkt ist eine ideale Messlatte für die Arbeit der Projektgruppe. Hier konkretisieren sich Anspruch und Wirklichkeit, gibt es eine Beurteilung, Bestätigung oder auch die Aufforderung, es bei der nächsten Gelegenheit anders und dann besser zu machen“ [45, S. 219].

Zu den Merkmalen, welche die Projektmethode bzw. den projektorientierten Chemieunterricht charakterisieren, gehören auch fachübergreifende Gesichtspunkte. Diese sind gegeben zur Biologie (Nahrungsmittel und ihre Haltbarmachung), zum Kunstunterricht (Zeichnungen, Fotos), zum Deutschunterricht (Dokumentation, Protokoll) sowie zum Fach Erdkunde (Logistik der Verteilung von Nahrungsmitteln).

#### **11.10 Eigene Bewertung zu den Einsatzmöglichkeiten der in diesem Kapitel vorgestellten verschiedenen Unterrichtsverfahren**

Im Rückblick zeigt sich, dass eine umfangreiche Einbeziehung der Schüler und Schülerinnen auch beim Thema „Lebensmittelverpackungen“ in jedem der aufgeführten Unterrichtsverfahren in fast allen Phasen möglich ist. Besonders das „Forschend-entwickelnde Unterrichtsver-

fahren“, der „Expertenunterricht“, „Chemie im Kontext“ der „Wahldifferenzierte Chemieunterricht“ sowie der „Projektorientierte Chemieunterricht“ berücksichtigen Schülervorstellungen und führen zur Erkenntnisgewinnung über eine experimentelle Phase mit mehr oder weniger ausgeprägter Schülerbeteiligung. Anhand der exemplarisch ausgewählten Themen und ihrer jeweiligen Zuordnung zu einem der Entwürfe wird deutlich, dass zahlreiche Experimente mit unterschiedlicher methodisch-didaktischer Funktion zum Einsatz kommen können. Abschließend wird stets in der Phase der Abstraktion die gewonnene Erkenntnis auf eine Gesetzmäßigkeit bezogen und eindeutig als Ergebnis formuliert.

Insgesamt deutet sich außerdem an, dass für unterschiedliche Erfordernisse und Zielsetzungen des Chemieunterrichts jeweils ein bestimmtes Unterrichtsverfahren als besonders geeignet erscheint:

- Zur Bearbeitung einer einzelnen deutlich abgegrenzten Problemstellung erscheint das „Forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren“ am besten geeignet.
- Geht es um Fragen mit einem deutlich abgegrenzten fachwissenschaftlichen Kern und gleichzeitig sehr starkem, breit gestreutem Alltagsbezug, so bietet sich das Verfahren „Chemie im Kontext“ an.
- Liegt eine große Zahl an Ausgangsfragestellungen oder Alltagsbezügen bei gleichzeitig zahlreichen Zugangsmöglichkeiten zur Erkenntnisgewinnung vor, dann bieten sich die Unterrichtsverfahren „Expertenunterricht“, „Wahldifferenzierter Chemieunterricht“ sowie „Projektorientierter Chemieunterricht“ an.
- Das „Analytisch-technische Verfahren“ erscheint sinnvoll, wenn zunächst ein kompliziertes Gerät oder ein komplizierter Versuchsaufbau im Mittelpunkt des Unterrichts steht.

Die vorausgehend aufgeführten Unterrichtsverfahren machen deutlich, dass ihr flexibler Einsatz im Chemieunterricht möglich ist, wobei eine Vielzahl an Experimenten zur Verfügung steht.

## 12 Aufgabensammlung zum Thema „Lebensmittelverpackungen“

In diesem Kapitel wird auf weitere Elemente eingegangen, die zur Gestaltung einer Unterrichtsstunde bzw. Unterrichtseinheit erforderlich sind. Zunächst wird eine Reihe von Aufgabenstellungen aufgeführt, welche in der Phase der Wiederholung und Vertiefung des jeweiligen Unterrichtsverfahrens eingesetzt werden können. Zu den Erwartungshorizonten der einzelnen Aufgaben sind Lösungen formuliert.

### Voraussetzungen der Lerngruppe:

Sekundarstufe I: Metalle, Stoffmenge, Säuren und Laugen, Atombindung

Sekundarstufe II: Kohlenstoffchemie, funktionelle Gruppen (Aufg. 8, Aufg. 13)

### 12.1 Aufgaben

#### Aufgabe 1: Mehrschichtige, in mehreren Schritten hergestellte Folie

Eine Schlauchbeutelverpackung für Baguettes kann – von außen nach innen betrachtet - folgenden Aufbau haben: Polyamid/Ethylvinylalkohol/Polyamid/Kleber/Polyethylen. Die Sauerstoffdurchlässigkeit der gesamten Folie ist bei 23 °C und 0 % rel. Feuchte niedriger als  $1,5 \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \text{ d bar})$  (Abb. 41).

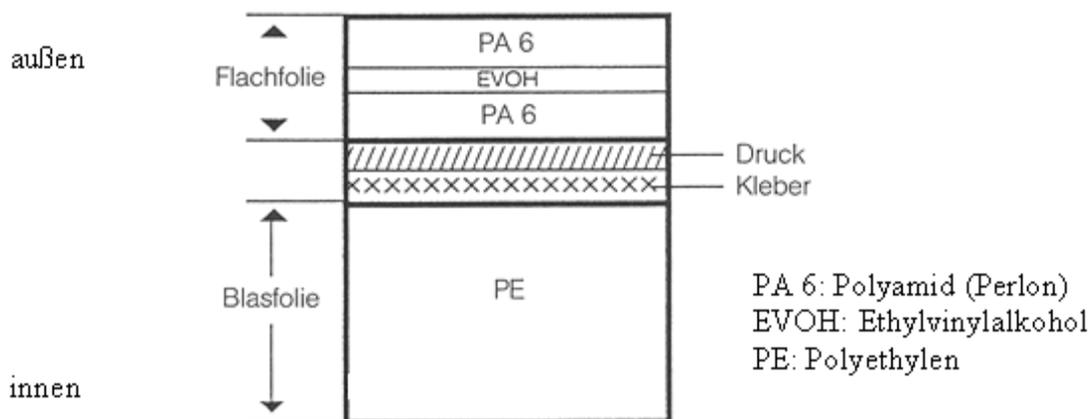


Abbildung 41: Schematische Darstellung einer Mehrschichtfolie und ihrer maximalen Sauerstoffdurchlässigkeit (verändert nach [11, S. 45])

Man erkennt, dass zur Herstellung einer Verbundfolie mehrere Verfahren kombiniert werden können.

- Die 3 äußeren Schichten (Flachfolie) werden gleichzeitig in einem einzigen Arbeitsgang flächig-waagrecht „extrudiert“. Auch der Herstellung der Blasfolie ist eine „Extrusion“ vorgeschaltet. Erläutern Sie, was man allgemein unter „Extrudieren“ versteht.
- Ethylvinylalkohol (EVOH) dient als hervorragende Barriere gegen Sauerstoff. Bei Einwirkung von Feuchtigkeit jedoch wird diese Barrierefunktion stark vermindert [18, S. 138]. Erläutern Sie anhand von Abb. 41, wie diesem Umstand Rechnung getragen wird.
- Man muss davon ausgehen, dass eine  $100 \mu\text{m}$  dicke Polyethylen-Folie (PE-LD) eine Sauerstoffdurchlässigkeit von  $1350 \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \text{ d bar})$  besitzt. Berechnen Sie, wie dick die Polyethylen-Schicht (PE-LD) mindestens sein müsste, wenn nur sie alleine als Sauerstoffbarriere dienen müsste.
- Beurteilen Sie das Ergebnis aus Aufgabe 1 c) aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht.

- e) Als innere Schicht hat das Polyethylen direkten Kontakt zum Lebensmittel. Erläutern Sie, welche Eigenschaften Packstoffe prinzipiell haben müssen, wenn sie eine derartige Aufgabe erfüllen sollen.
- f) Die Polyethylen-Innenschicht (PE-LD) eignet sich auch zur Herstellung einer Heißsiegelnaht, mit welcher die Verpackung geschlossen wird, bevor das Produkt in den Handel kommt. Warum ist dazu Polyethylen mit einer Schmelztemperatur von rund 110°C gut geeignet? Erläutern Sie!

Aufgabe 2: Lebensmittelverpackungen als Abfall in der Schule

Es ist zu ermitteln, welche Abfallmengen durch Lebensmittelverpackungen in einer Klasse an einem Schultag zusammenkommen [69, S. 351].

Aufgabe 3: Pro und contra

Stellen Sie Argumente zusammen, die für und gegen eine Verpackung mit Kunststoffen sprechen [69, S. 351].

Aufgabe 4: Anzahl der Aluminiumatome in einer Kaugummifolie

Die Verpackung eines Kaugummis enthält 80 mg Aluminium. Berechnen Sie die Anzahl der Atome [69, S. 115].

Aufgabe 5: Dicke einer Kaugummifolie

Die Innenverpackung von Kaumassen, also die Kaugummifolie („Kaugummipapier“) enthält an der Außenseite eine Aluminiumfolie, während die Innenseite aus Seidenpapier besteht. Das Seidenpapier ist vollflächig gegen die Aluminiumschicht wachskaschiert [4, S. 282]. Wachs kann hier also als Klebstoff dienen. Das Seidenpapier hat direkten Kontakt zur Kaumasse (Abb. 42).

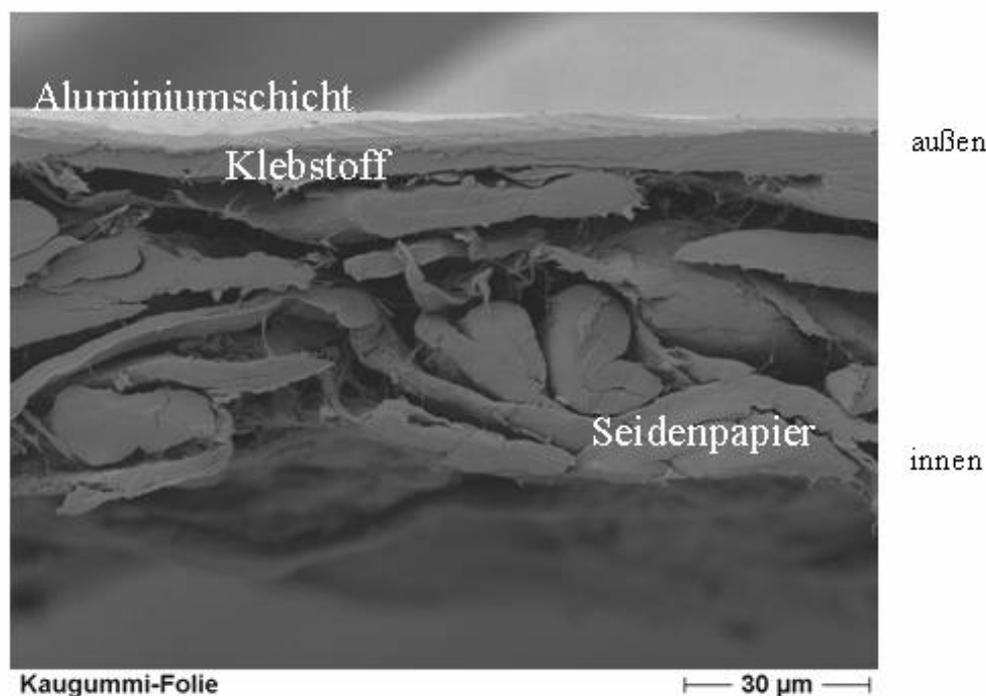


Abbildung 42: Querschnitt durch eine Kaugummifolie zur Übersicht (oben die Außenschicht aus Aluminium, unten die Innenschicht aus Seidenpapier), rasterelektronenmikroskopische Aufnahme

- Als Herstellungsverfahren für diese Folie kommt nur das Kaschieren (Laminieren mit Klebstoff) in Frage. Erläutern Sie, warum hier zur Herstellung der gesamten Folie das Verfahren der Extrusion ausgeschlossen werden kann.
- Ermitteln Sie aus Abb. 42 mit Hilfe des angegebenen Maßstabes die Gesamtdicke der Kaugummifolie.
- Ermitteln Sie aus Abb. 43 mit Hilfe des angegebenen Maßstabes die Dicke der Aluminiumschicht (Außenschicht).
- Geben Sie je ein Reagenz an, mit dem Sie die Aluminiumschicht (außen) und die Papierschicht (innen) qualitativ nachweisen können.

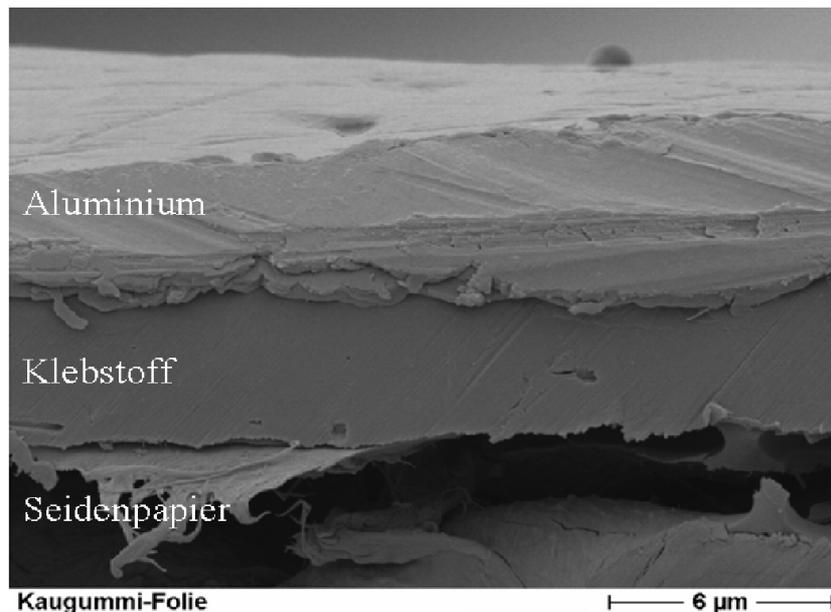


Abbildung 43: Querschnitt durch eine Kaugummifolie bei besonderer Hervorhebung der beiden äußeren Schichten (rasterelektronenmikroskopische Aufnahme)

#### Aufgabe 6: Bewertung des Einsatzes von Aluminium

Reinaluminium wird durch Elektrolyse hergestellt und in Form von Metall-Barren geliefert. Diese werden durch Kaltwalzen in folgende Formen gebracht:

Tabelle 35: Mögliche Formen von Aluminium als Verpackungsmaterial [3, S. 36 f.]

Bezeichnung	Dicke in mm
Bänder	> 0,350
Dünne Bänder	0,350 - 0,020
Folien	< 0,020

- Welche der drei genannten Formen des Aluminiums wird im Getränkekarton eingesetzt?
- Nennen Sie Vorteile und Nachteile des Einsatzes von Aluminium.
- Beurteilen Sie die gesundheitlichen Risiken, welche beim direkten Kontakt von Lebensmitteln mit Aluminium bestehen.

#### Aufgabe 7: Glas contra Polyethylenterephthalat (PET)

Vergleichen Sie die Packstoffe Glas und Polyethylenterephthalat (PET). Beziehen Sie sich dabei auf Getränkeflaschen. Auf dem Markt für Kohlensäurehaltiges Mineralwasser hat Glas beträchtliche Anteile an Polyethylenterephthalat (PET) verloren. Versuchen Sie eine Einschätzung der beiden Packstoffe nach ökologischen und lebensmittelhygienischen Gesichtspunkten zu geben.

### Aufgabe 8: Biologisch abbaubar mit den Eigenschaften von PE

Ecoflex<sup>®</sup> ist ein Kunststoff, der für die Verpackung von Lebensmitteln eingesetzt wird. Dieser biologisch abbaubare aliphatisch-aromatische Copolyester wird von der BASF angeboten. Folien aus Ecoflex<sup>®</sup> weisen ähnliche Eigenschaften auf wie Polyethylen. Der Polyester wird aus den Monomeren Adipinsäure (Hexandisäure), Terephthalsäure (Benzol-1,4-dicarbonsäure) und Butan-1,4-diol hergestellt.

Zeichnen Sie die Strukturformeln der Monomere und einen Ausschnitt aus der Strukturformel des Makromoleküls, an dessen Aufbau alle drei Monomere beteiligt sind. Benennen Sie den Reaktionstyp der Synthese, die diesen Kunststoff liefert.

### Aufgabe 9: Eigenschaftskombinationen einiger Kunststoffe

Aus den aufgeführten Eigenschaften eines Kunststoffes kann man häufig abschätzen, welche Funktionen er erfüllen kann und für welches Packgut er als Packstoff eingesetzt werden könnte. Mit Hilfe der folgenden Tabelle 36, welche einige Angaben über häufig verwendete Kunststoffe enthält, können die Fragen a) bis g) beantwortet werden.

Zunächst sollen die Abkürzungen erläutert werden:

PE-LD: Polyethylen geringer Dichte („low density“)  
PE-HD: Polyethylen hoher Dichte („high density“)  
PP: Polypropylen  
OPP: Orientiertes (zur Stabilisierung gerecktes) Polypropylen  
PA 6: Polyamid 6 (Perlon)  
PET: Polyethylenterephthalat

Tabelle 36: Wichtige Anwendungseigenschaften flexibler transparenter Packstoffe im Vergleich [11, S. 363]  
(++ = sehr gut, + = gut, O = gering)

Anwendungseigenschaften	PE-LD	PE-HD	PP	OPP	PA 6	PET
Weiterreißfestigkeit	+	+	+	O	+	+
Steifigkeit	O	+	+	++	+	++
Tiefe Anwendungstemperaturen	++	++	O	+	+	+
Hohe Anwendungstemperaturen	O	+	++	++	++	++
Wasserdampfdichtheit	++	++	+	++	O	+
Sauerstoffdichtheit	O	O	O	O	++	+
Optische Klarheit	+	O	+	++	O	+

a) Eine Nudelverpackung besteht aus einer transparenten Kunststoff-Folie, welcher der Typencode „5“ zugeordnet ist. Möglicherweise handelt es sich um OPP. Wie heißt der Kunststoff? Welche besonderen Vorteile bietet er für den Verbraucher? Mit welchem mechanischen Verhalten dieser Verpackungsfolie muss man jedoch rechnen, wenn man sie mit Hilfe einer Schere an einer Stelle aufgeschnitten hat?

b) Eine Cornflakes-Verpackung (Beutel im Karton) besteht aus einer mehrschichtigen Folie. Diese besteht sowohl innen als auch außen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Durch welche Eigenschaft des Folienmaterials wird die Knusprigkeit des Füllgutes geschützt?

c) Ein zweischichtiger Siegelrand-Kochbeutel enthält als Außenschicht Polyethylenterephthalat (PET), innen jedoch eine Polyolefinschicht. Erörtern Sie, ob Polyethylen (PE-LD oder PE-HD) bzw. Polypropylen (PP) als Kunststoffe für die Innenschicht geeignet erscheinen.

d) Erläutern Sie, warum selbst dünnwandige Menüschalen aus Polyethylenterephthalat (PET) als „dual-ovenable“ gelten (gleichzeitige Ofen- und Mikrowellenfestigkeit).

e) Als Folie zur Geflügelverpackung für das Tiefkühlfach wird häufig Polyethylen (PE-LD) verwendet. Weisen Sie anhand der Tabelle nach, warum gerade Polyethylen für diesen Zweck zu bevorzugen ist.

f) Schlauchbeutelverpackungen für Schnittkäse bestehen häufig aus Mehrschicht-Folien, welche außen eine Polyamid-Schicht (PA 6) und innen eine Polyethylen-Schicht (PE-LD) enthalten. Welche Eigenschaftskombination ist durch diese Materialkombination zu erwarten?

g) Fleischreifungs-Verpackungen müssen gewährleisten, dass das Füllgut nicht austrocknet und dass Sauerstoff von ihm ferngehalten wird. Überprüfen Sie, ob Verbundfolien der Schichtung Polyamid/Polyethylen (PA/PE-LD) für diese Funktion geeignet erscheinen.

#### Aufgabe 10: Duktilität von Aluminium

Der häufig verwendete Werkstoff Aluminium ist duktil und kann beispielsweise zu Folien von nur 0,004 mm Dicke ausgehämert werden. Erklären Sie diese Eigenschaften mit Hilfe eines Modells für die Bindungsverhältnisse in einem Metall [108].

#### Aufgabe 11: Atomradius und Dichte von kristallinem Aluminium

Aluminium besitzt eine kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur (Abb. 44). Die Kantenlänge der Elementarzelle (Gitterkonstante  $a$ ) beträgt 404 pm. Berechnen Sie den metallischen Atomradius und die Dichte von kristallinem Aluminium.

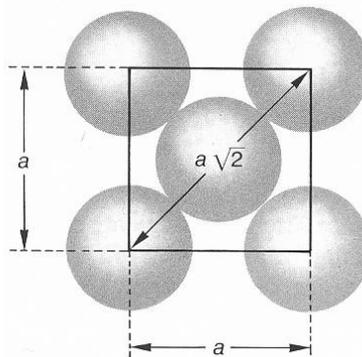


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen Gitterkonstante  $a$  und der Länge der Flächendiagonale eines Würfels (kubisch-flächenzentriertes Gitter) (verändert nach [85, S. 177])

### Aufgabe 12: Die Gitterkonstante von Eisen

Die Gitterkonstante  $a$  (Kantenlänge der jeweiligen Elementarzelle) von Eisen soll berechnet werden. Es handelt sich beim  $\alpha$ -Eisen um ein kubisch-raumzentriertes Gitter. Der Radius eines Eisenatoms wird mit 126 pm angegeben (Abb. 45).

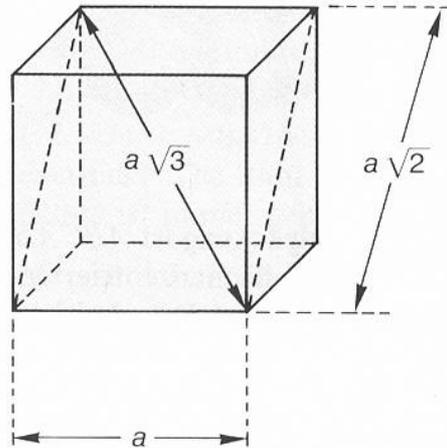


Abbildung 45: Zusammenhang zwischen der Gitterkonstante  $a$  und der Länge der Raumdiagonale beim kubisch-raumzentrierten Gitter von Eisen (verändert nach [85, S. 177])

### Aufgabe 13: Kunststoff-Getränkeflaschen

Mehrweg-Getränkeflaschen werden häufig aus dem Kunststoff Polyethylenterephthalat (PET) hergestellt. Als Ausgangsstoffe für dessen Synthese dienen Terephthalsäure (1,4-Benzoldicarbonsäure:  $\text{HOOC-C}_6\text{H}_4\text{-COOH}$ ) und Ethan-1,2-diol.

Benennen Sie den Typ der Polyreaktion und formulieren Sie einen charakteristischen Strukturformelausschnitt (Repetiereinheit) von PET! Geben Sie die Stoffklasse an, der man PET aufgrund der Monomerverknüpfung zuordnen kann und erläutern Sie das Verhalten dieses Kunststoffs beim Erwärmen [109].

## 12.2 Lösungen

### Lösung zu Aufgabe 1: (Mehrschichtige, in mehreren Schritten hergestellte Folie)

a) Zunächst wird ein Granulat des Kunststoffes hergestellt. Beim Extrudieren (von lat. extrudere, herausschieben) werden in einem kontinuierlichen Verfahren beispielsweise Folien hergestellt. Dazu dreht sich in einem beheizten Zylinder eine Schnecke, die das Kunststoffgranulat einzieht und es zum Werkzeug, der Form befördert. Auf diesem Wege wird es verdichtet und geschmolzen (plastifiziert). Beim Durchgang durch das nachgeschaltete Werkzeug (Düse) nimmt der Kunststoff die gewünschte Form an, die er durch sofortiges Abkühlen beibehält. Durch Breitschlitzdüsen werden bis zu 2,5 m breite Bänder, durch Ringdüsen hingegen Schläuche erzeugt. Dünnwandige weite Schläuche können durch Aufblasen in Folien-schläuche umgewandelt werden. Diese „Blasfolien“ verarbeitet man zu Beuteln oder schneidet sie zu Folien auf [82, S. 236 f.], [69, S. 349].

Von „Coextrusion“ spricht man, wenn mehrschichtige Flach- oder Schlauchfolien gleichzeitig extrudiert werden. Dabei werden die unterschiedlichen Schmelzströme übereinander geschichtet [24, S. 325].

b) Die Sauerstoffdurchlässigkeit steigt bei Ethylvinylalkohol (EVOH) mit Erhöhung der Luftfeuchte stark an [18, S. 138]. Daher darf diese Barrierschicht weder ganz außen liegen noch direkten Kontakt zum Füllgut haben. Sie liegt geschützt zwischen 2 Polyamidschichten.

c) Eine 100  $\mu\text{m}$  dicke Polyethylen-Folie (PE-LD) zeigt eine Sauerstoffdurchlässigkeit von  $1350 \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \text{ d bar})$ . Die in Abb. 50 dargestellte Folie unterschreitet den Wert von  $1,5 \text{ cm}^3 / (\text{m}^2 \text{ d bar})$ . Da Foliendicke und Durchlässigkeit in einem antiproportionalen Verhältnis zueinander stehen, gilt folgender Ansatz:

$$1350 \times 100 \mu\text{m} = 1,5 \times \text{Dicke}(\text{PE} - \text{LD})$$

Durch Umformen erhält man:  $\frac{1350 \times 100 \mu\text{m}}{1,5} = 90000 \mu\text{m} = 90 \text{ mm} = 0,9 \text{ cm}$ .

Bestünde die Folie ausschließlich aus Polyethylen (PE-LD), müsste sie 0,9 cm dick sein, um für Sauerstoff die gleichen Barriereigenschaften wie die gesamte Schlauchbeutelverpackung zu haben.

Während Polyethylen (PE-LD) einerseits eine hohe Sauerstoffdurchlässigkeit zeigt, erweist es sich als sehr gute Barriere gegen Wasserdampf. Dadurch ist das Füllgut gegen Austrocknung geschützt.

d) Durch die Wahl des geeigneten Packstoffes kann Material eingespart werden. Diese Einsparung ist betriebswirtschaftlich sinnvoll, wobei gleichzeitig Ressourcen und Umwelt geschont werden.

e) Um für den Kontakt mit Lebensmitteln geeignet zu sein, dürfen Packstoffe keinesfalls unkontrolliert Substanzen an das Füllgut abgeben. Ein unkontrollierter Übergang von Substanzen aus dem Füllgut in den Packstoff darf ebenfalls nicht stattfinden.

f) Mit seiner niedrigen Schmelztemperatur von etwa  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  ermöglicht der Einsatz von Polyethylen (PE-LD) als Innenschicht auch die Anwendung relativ niedriger Siegeltemperaturen.

### Lösung zu Aufgabe 2: (Lebensmittelverpackungen als Abfall in der Schule)

Die Abfälle sollten nach Art des Packstoffes, also auch nach dem Kunststofftypencode zunächst sortiert und dann abgewogen werden. Folgende Schritte der Auswertung und der Erkenntnisgewinnung könnten sich anschließen:

- Ermittlung der Massenanteile der einzelnen Packstoffe (Papier, Weißblech, Aluminium, Kunststoff) und Erstellen eines Kreisdiagramms
- Einfache Experimente zum Nachweis einzelner Stoffe (insbesondere der bereits differenzierten Kunststoffe)
- Einholen von Informationen über den voraussichtlichen weiteren „Lebensweg“ der ausgedienten Verpackungsmaterialien (Wiederverwendung, Recycling, thermische Verwertung, Deponie)
- Abschätzung der unterschiedlichen Umweltbelastungen durch die einzelnen „Lebensläufe“ verschiedener Lebensmittelverpackungen
- Erstellen eines Konzeptes zur Vermeidung unnötiger Verkaufsverpackungen, zum Gebrauch von Mehrwegsystemen, zur kritischen Überprüfung des Konsumverhaltens auch außerhalb des Schulbereiches.

### Lösung zu Aufgabe 3: (Pro und contra)

Für die Verpackung mit Kunststoffen spricht:

- Geringes Gewicht der Verpackungen
- Feuchtigkeit und Nässe könnenden Verpackungen nichts anhaben.
- Bruchsicherheit
- Gewünschte Funktionen können mit sorgfältig ausgewählten Folienmaterialien gezielt erreicht und kombiniert werden.
- Materialersparnis durch gezielte Kombination geeigneter Folien
- Möglichkeiten des Einschmelzens oder der thermischen Verwertung
- Kunststoffe wie PE sind relativ preiswert.
- Mehrwegsysteme haben sich etabliert: Polyethylenterephthalat (PET), auch Polycarbonat (PC)

Gegen die Verpackung mit Kunststoffen spricht:

- Hitzebeständigkeit kann nicht generell vorausgesetzt werden
- Relativ hohe Rückstellkraft beim „Dreheinschlag“ (Bonbon-Verpackung)
- Restrisiko der Migration von Acetaldehyd aus Polyethylenterephthalat (PET), von Bisphenol A aus Polycarbonat (PC) und von Weichmachern aus Polyvinylchlorid (PVC) in das Füllgut
- In der Regel kein Verrotten auf dem Kompost möglich
- Verbrauch fossiler Rohstoffe (Erdöl)
- Qualitätseinbußen des Materials beim Recycling durch Einschmelzen
- Energieaufwand beim Recycling

#### Lösung zu Aufgabe 4: (Anzahl der Aluminiumatome in einer Kaugummifolie)

Für die Masse einer Stoffportion  $m$  (g), die molare Masse  $M$  (g / mol) und die Stoffmenge  $n$  (mol) gilt folgender Zusammenhang:  $\frac{m}{M} = n$ . Geht man bei Aluminium von einer molaren

Masse  $M = 27$  g / mol aus, dann ergibt sich für eine Aluminiumportion von  $m = 0,080$  g die Stoffmenge  $n(\text{Al}) = \frac{0,080\text{g}}{27\text{g/mol}} = 0,00296\text{mol} \approx 0,003\text{mol}$ .

Geht man von der Loschmidt-Zahl bzw. von der Avogadro-Konstante aus ( $N_A = 6,023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ), dann ergibt sich eine Anzahl von  $0,003 \times 6,023 \times 10^{23} = 1,8 \times 10^{21}$  Aluminiumatomen. Fast 2 Trilliarden Aluminiumatome sind also in der Kaugummifolie enthalten.

#### Lösung zu Aufgabe 5: (Dicke einer Kaugummifolie)

- Coextrusion kann hier als Herstellungsverfahren sicher ausgeschlossen werden, da diese nur funktioniert, wenn mindestens zwei thermoplastische Kunststoffe verarbeitet werden. Aluminium und Seidenpapier jedoch haben keine thermoplastischen Eigenschaften und können daher nur durch einen Klebstoff miteinander verbunden werden.
- Mit dem rasterelektronenmikroskopischen Bild (Abb. 42) kann die Gesamtdicke der Folie ermittelt werden. Sie beträgt etwa 50 bis 60  $\mu\text{m}$ .
- Mit dem rasterelektronenmikroskopischen Bild (Abb. 43) kann die Dicke der Aluminiumschicht ermittelt werden. Sie beträgt etwa 5 bis 6  $\mu\text{m}$ .
- Folgende qualitative Nachweise sind denkbar:  
Aluminium: Reaktion mit Salzsäure oder Natronlauge, Nachweis mit Alizarin S  
Papier: Saure Hydrolyse; Nachweis der Reaktionsprodukte mit Molisch-Reagenz oder Fehlingscher Lösung I und II.

#### Lösung zu Aufgabe 6: (Bewertung des Einsatzes von Aluminium)

- Für Getränkekartons werden Aluminiumfolien verwendet.
- Vorteile: Geringes Gewicht, Lichtundurchlässigkeit, Barriere gegen Sauerstoff im Verbund mit Kunststoffen, gute Verformbarkeit von Folien, Formbeständigkeit, Recyclebarkeit. Nachteile: Hoher Energieaufwand bei der Herstellung von Primäraluminium, Probleme beim direkten Kontakt mit Lebensmitteln
- Saure Lösungen können zur Bildung von Aluminium-Ionen führen, z. B. beim Erhitzen von sauren Lebensmitteln in Aluminium-Kochtöpfen, bei Verwendung von Aluminium-Folie oder durch saure Getränke in Aluminiumdosen. So besteht beispielsweise bei Direktkontakt von sauren Saucen, Tomatenmark und Senf mit Aluminium die Gefahr der Korrosion. Um derartige Füllgüter aufnehmen zu können, muss daher Aluminium beschichtet werden. Im Tierversuch erwiesen sich übliche Aluminiumsalze in Langzeitversuchen als ungiftig. Lösliches Aluminiumcitrat erhöht jedoch stark den Aluminiumspiegel im Plasma und führt zu schweren Vergiftungen mit Nerven- und Knochenschäden [15, S. 30-32].

### Lösung zu Aufgabe 7: (Glas contra Polyethylenterephthalat, PET)

Tabelle 37: Vor- und Nachteile von Glasflaschen und PET-Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke, Vergleich aus ökologischer Sicht [33]

<b>Anforderungen</b>	<b>Polyethylenterephthalat (PET)</b>	<b>Glas</b>
Hoher Produktanteil am Gesamtgewicht	Sehr gutes Verhältnis von Produktgewicht/Verpackungsgewicht	Ungünstiger gegenüber PET
Hohe Stabilität, geringe Bruchempfindlichkeit	Sehr gut, unzerbrechlich	Schlecht, Polymerbeschichtung möglich
Möglichst hohe Umlauffzahlen bei Mehrwegflaschen	ca. 25 Umläufe möglich	ca. 50 Umläufe möglich
Recyclebarkeit („Bottle to bottle“)	50 % und mehr möglich, jedoch 100 %, wenn PET für andere Produkte eingesetzt wird	Fast 100 % möglich

Tabelle 38: Vor- und Nachteile von Glasflaschen und PET-Flaschen für kohlenensäurehaltige Getränke, Vergleich aus lebensmittelhygienischer Sicht [33]

<b>Anforderungen</b>	<b>Polyethylenterephthalat (PET)</b>	<b>Glas</b>
Keine Sorption von Aromastoffen bzw. mögliche Wiedergabe an das Füllgut	Bisher unzureichend	Sehr gute Eigenschaften
Gewährleistung eines hygienisch einwandfreien Zustandes bei Kontakt mit dem Füllgut bei Mehrwegflaschen	Empfindlichkeit für Pilzbefall bei PET erhöht – durch statische Aufladung begünstigt	Sehr gute Eigenschaften
Anwendung einer Reinigungstemperatur, welche Sterilisation bei Mehrwegflaschen ermöglicht	Bei PET werden Werte von 58 °C bis 65 °C angegeben.	Glas kann bis über 200 °C erhitzt werden.
Gute Barriereigenschaften für Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf	Bisher unzureichende Haltbarkeitszeit von Füllgut	Sehr gute Eigenschaften

### Lösung zu Aufgabe 8: (Biologisch abbaubar mit den Eigenschaften von Polyethylen, PE)

Der Copolyester Ecoflex® entsteht durch Polykondensation.

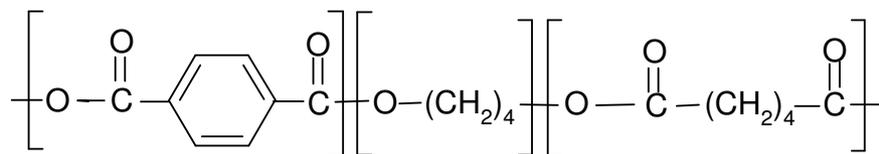


Abbildung 46: Statistischer Copolyester auf Basis von Terephthalsäure /1,4-Butandiol / Adipinsäure (Ecoflex BASF), [110]

### Lösung zu Aufgabe 9: (Eigenschaftskombinationen einiger Kunststoffe)

- a) Es handelt sich um Polypropylen. Das Material bietet eine gute optische Klarheit zur Präsentation des Füllgutes. Die Folie kann jedoch nach dem Öffnen der Packung leicht einreißen, da sie eine geringe Weiterreißfestigkeit besitzt, falls es sich um OPP handelt.

- b) Die Verpackung zeigt bei guter Steifigkeit und guter Weiterreißfestigkeit eine hohe Wasserdampfdichtheit. Dadurch bleibt die Knusprigkeit des Füllgutes erhalten.
- c) Die Innenschicht kann z. B. aus Polypropylen (PP) oder Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) bestehen.
- d) Polyethylenterephthalat (PET) zeigt eine gute Kältebeständigkeit und eine sehr gute Wärmebeständigkeit. Daher können die Menüschaalen direkt aus dem Tiefkühlbereich entnommen und im Mikrowellenherd sowie im konventionellen Umluftherd gleichermaßen erhitzt werden. Außerdem ermöglicht die hohe Steifigkeit des Materials die Herstellung sehr dünnwandiger Schalen.
- e) Polyethylen (PE-LD) ist für tiefe Anwendungstemperaturen geeignet und schützt gleichzeitig vor Wasserverlust. Andere Materialien können (als Monofolie) diese Eigenschaftskombination nicht so gut erfüllen.
- f) Durch die beiden Packstoffe werden die Eigenschaften „Wasserdampfdichtheit“ und „Sauerstoffdichtheit“ eindrucksvoll kombiniert. Außerdem zeigen beide Materialien Weiterreißfestigkeit und vertragen Kühlung.
- g) Polyamid (PA) dient als Sauerstoff-Barriere, Polyethylen (PE-LD) hingegen als Wasserdampf-Barriere.

Lösung zu Aufgabe 10: (Duktilität von Aluminium)

Die Aluminium-Ionen sind in einer möglichst dichten Kugelpackung angeordnet. Die Valenzelektronen füllen den gesamten Raum der Metallstruktur aus (Elektronengas). Die Elektronen sind delokalisiert. Die Struktur wird durch die Anziehungskräfte zwischen Elektronen und positiv geladenen Metallionen zusammengehalten. Die positiven Metallionen können gegeneinander verschoben werden, ohne dass der Zusammenhalt, bedingt durch das Elektronengas, verloren geht [108].

Lösung zu Aufgabe 11: (Atomradius und Dichte von kristallinem Aluminium)

Aus der Flächendiagonale lässt sich der Atomradius ermitteln:

$$r(\text{Al}) = \frac{1}{4} \times a \times \sqrt{2} = 142,8 \text{ pm}$$

Zur Berechnung der Dichte müssen Masse und Volumen berechnet werden. Dazu bestimmt man zunächst die Anzahl der Atome in einer Elementarzelle. Es handelt sich um 4 Atome, wie nachfolgende Rechnung ergibt:

$$\frac{8}{8} + \frac{6}{2} = 1 + 3 = 4$$

Die Masse einer Elementarzelle entspricht also der Masse von 4 Aluminiumatomen:

$$m(\text{Elementarzelle}) = 4 \times \frac{M(\text{Al})}{N_A} = 4 \times \frac{27,0 \text{ g} \times \text{mol}^{-1}}{6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 17,9 \times 10^{-23} \text{ g}$$

Das Volumen einer Elementarzelle berechnet sich aus der Kantenlänge des Würfels, der Gitterkonstante, wobei man mit  $10^{-12} \text{ m} = 10^{-10} \text{ cm}$  die Einheit gleich in  $\text{cm}^3$  angeben kann:

$$V(\text{Elementarzelle}) = a^3 = 404^3 \text{ pm}^3 = 6,59 \times 10^7 \times 10^{-30} \text{ cm}^3 = 6,59 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

Die Dichte des kristallinen Aluminium-Metalls errechnet sich zu

$$\rho(\text{Al}) = \frac{m(\text{Elementarzelle})}{V(\text{Elementarzelle})} = \frac{17,9 \times 10^{-23} \text{ g}}{6,59 \times 10^{-23} \text{ cm}^3} = 2,7 \text{ g / cm}^3$$

Dieser Wert von 2,7 g/cm<sup>3</sup> wird durch die Angaben in den Tabellenwerken bestätigt [85, S. 177-179, 186].

Lösung zu Aufgabe 12: (Die Gitterkonstante von Eisen)

Die Raumdiagonale ist genauso groß wie das Vierfache eines Atomradius von Eisen:

$$4 \times r(\text{Fe}) = a \times \sqrt{3}$$

Durch Umformung und Einsetzen erhält man:

$$a = \frac{4 \times r(\text{Fe})}{\sqrt{3}} = \frac{4 \times 126 \text{ pm}}{\sqrt{3}} = 291 \text{ pm}$$

Dies entspricht mit 1,7%iger Abweichung dem in der Literatur gefundenen Wert [85, S. 177-179, 186].

Lösung zu Aufgabe 13: (Kunststoff-Getränkeflaschen)

Terephthalsäure und Ethan-1,2-diol reagieren in einer Polykondensationsreaktion unter Wasserabspaltung zu PET. Es gehört somit zu den Polykondensationskunststoffen.

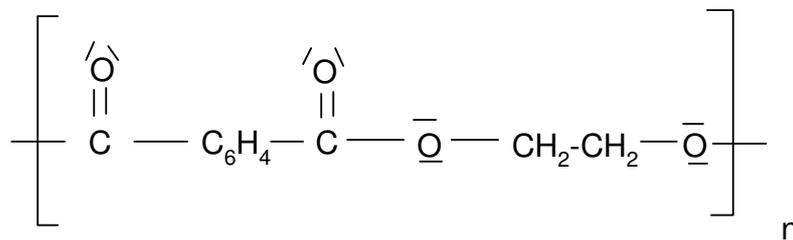


Abbildung 47: Repetiereinheit von Polyethylenterephthalat

Die entstehenden Makromoleküle sind linear gebaut und unvernetzt. Seinem thermischen Verhalten nach gehört PET daher zu den Thermoplasten. Erhitzt man es, so wird es mit zunehmender Temperatur weicher. Im PET werden die Makromoleküle durch van-der-Waals-Kräfte und Dipol-Dipol-Wechselwirkungen zusammengehalten. Beim Erwärmen werden diese Sekundärbindungskräfte teilweise überwunden; die Moleküle können aneinander vorbeigleiten, der Kunststoff erweicht. Beim Erreichen der Zersetzungstemperatur werden Atombindungen innerhalb der Makromoleküle gespalten, sodass infolge Freisetzung von Kohlenstoff Schwarzfärbung auftritt [109].

## 13 Lehrerfortbildung

Im folgenden Kapitel wird über eine Lehrerfortbildung zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ berichtet. Im Zentrum stehen dabei die Voraussetzungen und die Interessen der teilnehmenden Lehrerinnen und Lehrer, das Angebot an Experimenten sowie die Schlüsse, welche aus einem Praktikumsverlauf und dessen Auswertung gezogen werden können.

Am Institut für Didaktik der Chemie der Goethe-Universität werden seit 2002 Lehrerfortbildungen durchgeführt. Auch zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ wurde eine Lehrerfortbildung erprobt. Bevor auf Details dieser Veranstaltung eingegangen wird, soll in diesem Zusammenhang knapp umrissen werden, welche Erkenntnisse über Interessen von Lehrkräften bezüglich deartiger Fortbildungsveranstaltungen vorliegen.

Zu den Erwartungen von Fortbildungsteilnehmer/innen wurde in einer Umfrage von DAUS / MELLE / BADER (2004) am häufigsten das „Kennenlernen schulrelevanter Experimente“ genannt. Damit ist diesem Wunsch auf jeden Fall eine „hohe Bedeutung“ beizumessen [111]. Andererseits zeigt die von DAUS / MELLE / BADER (2004) dokumentierte Fragebogenstudie über das Fortbildungsverhalten von Lehrkräften aus fünf Bundesländern auf, dass Fortbildungsveranstaltungen als Quelle für die Unterrichtsvorbereitung nur einen mittleren Stellenwert besitzen, wohingegen Schulbücher als wichtigste Informationsquelle fungieren [111]. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass Schulbücher – wenn überhaupt – das Thema „Lebensmittelverpackungen“ nur am Rande aufgreifen, und zwar hauptsächlich unter Hervorhebung des Entsorgungs-Problems, fast nie jedoch im Sinne der Funktionalität, also unter dem Aspekt des Struktur-Eigenschafts-Konzeptes der Packstoffe. Unter den Themenwünschen der erwähnten Umfrage nach DAUS / MELLE / BADER (2004) findet man den Begriff „Lebensmittelverpackungen“ selbst zwar nicht, jedoch wurden recht häufig die Themen „Lebensmittelchemie“ und „Kunststoffe“ genannt. Die Erhebung von DAUS / MELLE / BADER (2004) zeigt auch, dass die meisten Fortbildungsteilnehmer/innen mit großem Abstand den „Lehrplan“ als Kriterium zur Unterrichtsgestaltung bevorzugen. Mitinigem Abstand folgen die Kriterien „Alltagsbezug“, „Schülerinteressen“, „Aktualität“ und „Schülerversuche“ [111]. Auch diese Befunde zeigen, dass der auch in der vorliegenden Dissertation auf „Lehrplan“, „Alltagsbezug“, „Schülerinteressen“ und „Schülerversuche“ gelenkte Blick durchaus realistisch und gerechtfertigt ist, wobei die Nachfrage nach einfachen Experimenten stets berücksichtigt werden sollte.

Die Ergebnisse der genannten Erhebung zeigen auch, dass die Forderung nach Verknüpfung von Alltag und Fachwissenschaft nichts von ihrer Aktualität verloren hat. „Die Kluft zwischen Anforderungen der Schule hinsichtlich stärkerer Einbeziehung der Lebenswelt der Schüler in den Unterricht einerseits und andererseits die herkömmliche Ausbildung gilt es zu verringern. Die Vermittlung entsprechender fachwissenschaftlicher Inhalte – ausgerichtet auf das Berufsziel des Lehrers – sollte von der Chemiedidaktik geleistet werden.“ STÜBS (1995) führt als geeignete Inhalte beispielsweise Lebensmittel, Lebensmittelzusatzstoffe, Kunststoffe sowie Recycling auf [112].

Die hier zu bewertende erprobte Fortbildung zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ wurde von sieben Teilnehmern bzw. Teilnehmerinnen besucht, welche hauptsächlich aus dem Gesamtschul- und Berufsschulbereich kamen, jedoch nicht aus dem Sekundarstufe II-Bereich eines Gymnasiums. Die Fortbildung bestand aus zwei einführenden Referaten zu Lebensmittelverpackungen aus fachlicher und fachdidaktischer Sicht. Es folgte ein Praktikum, in dem die Lehrkräfte aus einer größeren Auswahl Versuche zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ erproben konnten.

Die Zielsetzung dieser Veranstaltung bestand darin, den Lehrerinnen und Lehrern ein Konzept zur experimentellen Erschließung von Lebensmittelverpackungen vorzustellen. Besonderer Wert wurde auf Experimente gelegt, die in der Schule problemlos durchgeführt werden

können. Im Mittelpunkt standen der sorgfältige Nachweis gezielt ausgewählter Materialien sowie die Ergründung einiger Funktionen von Verpackungsmaterialien.

Es zeigte sich, dass Versuche mit geringerem Zeitaufwand (einfache Nachweisreaktionen, hydrolytische Zersetzung von Polymeren, Lichtdurchlässigkeit) deutlich bevorzugt wurden. Entsprechend bestand auch eine erhebliche Nachfrage nach einfach durchzuführenden und wenig Zeit beanspruchenden Experimenten. Die nachfolgende Tab. 39 gibt einen Überblick über die in dieser Veranstaltung angebotenen Experimente.

Tabelle 39: Übersicht über die bei der Lehrerfortbildung durchgeführten Experimente. Die Nummer der Versuche bezieht sich auf die in dieser Arbeit aufgeführten Experimentieranleitungen

Thema des Experiments	Erschließbare Themen für den Chemieunterricht	Nummer des Versuchs
<b>Untersuchung eines Verbundes aus Karton, Polyethylen und Aluminium</b>		
Zerlegung eines Getränkekartons	Eigenschaften eines unpolaren thermoplastischen Kunststoffes, Nachweise von Karton und Aluminium	V 2.7, V 2.8.2, V 1.2.1
<b>Untersuchung der Polyamid-Schicht einer Käsefolie (Polyamid-Polyethylen-Verbund)</b>		
Selektive Anfärbung einer Polyamidschicht mit Lebensmittelfarbstoffen	Protolyse-Reaktion, Eigenschaften eines polaren Kunststoffes	V 2.5.2
Nachweis von Polyamid durch den Pyrolysetest	Stickstoff-Nachweis als Ammoniak	V 2.5.1
Anlösen der Polyamidschicht mit Salzsäure	Saure Hydrolyse	V 2.5.3
Schmelzpunktbestimmung von Polyamid	Eigenschaften eines polaren thermoplastischen Kunststoffes	V 2.5.3, V 2.5.7
<b>Untersuchung von Aluminium-haltigen Verbunden (Kaugummi-Folie, Butterwickler)</b>		
Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht durch ein titrimetrisches Verfahren	Redoxreaktion, Komplexchemie	V 1.3.3
<b>Untersuchung einer Milchflasche aus Polycarbonat</b>		
Nachweis von Bisphenol A durch alkalische Hydrolyse von Polycarbonat	Alkalische Hydrolyse	V 2.4.2
<b>Untersuchung von regenerierter Cellulose (Einmachfolie, Babybel®-Käse-Folie)</b>		
Zersetzung von regenerierter Cellulose durch saure Hydrolyse	Aufbau von Polysacchariden, saure Hydrolyse, Fehling-Probe	V 2.8.2
Nachweis von regenerierter Cellulose mit dem Molisch-Test auf Kohlenhydrate	Aufbau von Polysacchariden	V 2.8.1
<b>Untersuchung von Obstschalen aus drei Kunststoff-Sorten</b>		
Nachweis von PET, PP und PS aus Obstschalen	Bau polarer und unpolarer Makromoleküle, Dichte, Protolysereaktion	V 2.2

<b>Thema des Experiments</b>	<b>Erschließbare Themen für den Chemieunterricht</b>	<b>Nummer des Versuchs</b>
Nachweis von Terephthalsäure durch alkalische Hydrolyse von PET	Alkalische Hydrolyse	V 2.1
<b>Vergleich von Flaschenglas (Kalk-Natron-Glas) mit Borosilicat-Glas</b>		
Elektrische Leitfähigkeit von Glasgriß-Suspensionen	Protolyse-Reaktion	V 3.2.1
Test auf alkalische Reaktion	Protolyse-Reaktion	V 3.2.2
<b>Versuche zur Lichtdurchlässigkeit</b>		
Lichtdurchlässigkeit von gefärbtem und ungefärbtem Glas	Redoxreaktion, Komplexchemie (Nachweis von $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen)	V 4.5
<b>Demonstrationsversuche zur Durchlässigkeit von Sauerstoff und <math>\text{CO}_2</math></b>		
Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit einer Modellfolie (Backpapier) mit Hilfe einer Zink-Luft-Batterie	Redoxreaktion, Diffusion, Hinweis auf die Nernst-Gleichung	V 4.1.2
Halbquantitativer Nachweis für die $\text{CO}_2$ -Durchlässigkeit einer PET-Flasche - Ermittlung der pH-Änderung durch Farbumschlag von Bromthymolblau	Aufbau von PET, Diffusion, Protolyse-reaktion, Säure-Base-Indikator	V 4.2.1
Halbquantitativer Nachweis des Verlustes von $\text{CO}_2$ aus PET-Cola-Flaschen durch gravimetrische und volumetrische Messungen	Aufbau von PET, Diffusion, Protolyse-reaktion, Fällungsreaktion	V 4.2.3

### 13.1 Eigene Einschätzung zur Optimierung der angebotenen Veranstaltung

Aus dem Bereich der Verpackungsmaterialien wurden Experimente zu den Themen „Verbunde“, „Aluminium“, „Makromoleküle“ und „Durchlässigkeiten“ (Licht, Sauerstoff, CO<sub>2</sub>) angeboten. Hinsichtlich des Hessischen Lehrplans beziehen sich die Experimente auf folgende Themen:

- Struktur und Eigenschaften polarer und unpolarer Kunststoffe
- Polysaccharide
- Protolysereaktionen
- Saure und alkalische Hydrolyse von Makromolekülen
- Redoxreaktionen
- Komplexchemie
- Diffusion von Sauerstoff und CO<sub>2</sub>
- Lichtdurchlässigkeit.

Rückmeldungen zu dieser durchgeführten Veranstaltung zeigen einerseits, dass auch dieses Thema mit seinen starken Alltagsbezügen bei fortbildungsinteressierten Lehrkräften auf Interesse stößt, was die praktische Umsetzbarkeit im Chemieunterricht betrifft. Andererseits wird jedoch ebenso deutlich, dass die Teilnehmerinnen und Teilnehmer größten Wert auf möglichst einfache Experimente legen. Die umfangreicheren Experimente (Hydrolyse von Polycarbonat, Ermittlung der Schichtdicke einer Aluminiumfolie) wurden nicht von allen teilnehmenden Lehrkräften durchgeführt. Nicht zuletzt in Anbetracht des erwünschten Lehrplanbezuges und des Zeitmangels im Unterricht erscheint es sinnvoll, bei der Planung zukünftiger Fortbildungen zu diesem Thema den einfachen, unkompliziert durchführbaren Experimenten eine gewisse Priorität einzuräumen.

## 14 Zusammenfassende Überlegungen zum Einsatz von Schülerversuchen und Lehrerversuchen im vorliegenden Thema

Zu einer umfangreichen Operationalisierung der einzelnen Themen gehört die Gewichtung der Experimente nach ihrer Einsetzbarkeit im Unterricht. Dazu ist es nötig, den Spielraum des Einsatzes zu erörtern. Zur Gewährleistung einer möglichst großen Eigentätigkeit sind Schülerexperimente ein bedeutendes Element der Unterrichtsgestaltung. Als wichtigste Kriterien für die Eignung eines Experiments als Schülerversuch sind folgende Bedingungen zu nennen: [45, S. 310 f.].

- der Ausschluss von Gefährdungen durch kanzerogene, mutagene und toxische Substanzen
- manuelles Geschick seitens der Lernenden
- die Robustheit der Experimente gegenüber Fehlern bei der Durchführung.

Die Schülerinnen und Schüler lernen und üben, in einem kleinen Team für sich und andere Verantwortung zu übernehmen und dabei gegebenenfalls arbeitsteilig zu handeln. Dies gilt sowohl für die Durchführung der Experimente als auch für eine vergleichende und differenzierende Auswertung. Das Erreichen psychomotorischer und affektiver Lernziele wird durch das Experimentieren in Schülergruppen gefördert. Bieten auch Schülerexperimente die Möglichkeit einer rationellen und Zeit sparenden Aufgabenverteilung, so sind doch die umfangreichere Unterrichtsvorbereitung sowie die schwierigere Beaufsichtigung während des Experimentierens zu berücksichtigen [45, S. 314 f.].

Andererseits können prinzipiell alle im Schulbereich möglichen Experimente im Zweifelsfall als Demonstrationsversuch vom Lehrer durchgeführt werden. Demonstrationsversuche bzw. Lehrerversuche sind im planmäßigen Unterrichtsverlauf angezeigt, wenn folgende Faktoren gelten [113, S. 118 f]:

- begrenzte apparative Voraussetzungen
- ein komplexer Versuchsaufbau
- eine lange Vorbereitungszeit
- die Gefährlichkeit eines Experiments sowie das Risiko von Verletzungen
- der Einsatz stark gesundheitsgefährdender Substanzen, welche nur in kleinsten Mengen verwendet werden sollten.

Im Vergleich zwischen den beiden Alternativen der Durchführung eines Experiments halten es BADER und SCHMIDKUNZ (2002) jedoch für fraglich, ob kognitive Lernziele durch den Einsatz von Schülerversuchen besser als durch Demonstrationsversuche erreicht werden [45, S. 316]. Für den Einsatz von Demonstrationsversuchen spricht im Zweifelsfall, dass sie zeitökonomisch sind, sich in Prüfungssituationen als Teil einer Aufgabenstellung eignen sowie eine Einsparung an Substanzen und Geräten ermöglichen. Dadurch können auch ökologische und finanzielle Vorgaben leichter eingehalten werden [113, S. 119]. Schließlich ist es auch denkbar, dass Schüler selbst Demonstrationsversuche durchführen, wodurch Motivation und Aufmerksamkeit besonders gefördert werden [113, S. 120].

Beispiele für Schülerversuche sind im Bereich der als einfach eingestuften Experimente in Kapitel 7.7 zu finden. Die meisten dieser Experimente erfüllen das Kriterium der einfachen Handhabbarkeit. Ausnehmen sollte man jedoch Versuche, in denen Toluol zum Einsatz kommt, wie z.B. in Versuch 2.6, wo EVOH (Ethylvinylalkohol) selektiv aus einem Kunststoff-Verbund isoliert wird, da es sich nicht in Toluol löst. Es erscheint äußerst sinnvoll, mit dem Lösungsmittel Toluol sparsam umzugehen und es mehrfach zu verwenden, zumal es als Ersatz-Substanz für das nicht mehr zugelassene Benzol gilt. Außerdem sollte man Schülerversuche, in denen konzentrierte Schwefelsäure zum Einsatz kommt, gezielt beaufsichtigen, wie z.B. beim Nachweis von Glucose als Hydroxymethylfurfural mit Molisch Reagenz (V 2.7 und

V 2.8.1). Hier sollte der Lehrer die Portionen an konzentrierter Schwefelsäure selbst verteilen, auch wenn es sich nur um geringe Mengen handelt. Auch der Nachweis von Polycarbonat (PC) sowie Polyamid (PA) mit dem gesundheitsschädlichen Dimethylaminobenzaldehyd (V 2.4.1 und V 2.5.4) sollte nur als Demonstrationsversuch vom Lehrer durchgeführt werden, obwohl es sich um ein vom Ablauf her einfaches Experiment handelt. Besonders der Einsatz von Thioacetamid zur Ausfällung von Metallsulfiden muss wegen der Giftigkeit auf den Lehrerversuch beschränkt bleiben (V 1.7.3). Ferner gehen von Experimenten, bei denen Metallstreifen aus Getränkedosen und Konservendosen ausgeschnitten werden, Verletzungsgefahren für Schüler aus (V 1.4.2, V 1.4.3, V 1.6, V 1.7.1, V 1.7.2). Hier besteht die Möglichkeit, dass der Lehrer geeignete ausgeschnittene Blechstreifen zur Verfügung stellt und der verbleibende Teil des Experiments als Schülerversuch durchgeführt wird. Bei dem Experiment zur Bestimmung des PVC-Gehaltes von Dichtungsmassen mit dem Schöniger-Verfahren hingegen bestehen zwei Möglichkeiten (V 2.10.4). Zur Titration nach Mohr wird die giftige Kaliumchromat-Lösung verwendet. Diese Eigenschaft der Substanz begrenzt den Einsatz auf den Demonstrationsversuch durch den Fachlehrer. Die Alternative besteht in der Titration mit Kaliumhydroxid-Lösung sowie Methylrot als Indikator und kann daher als Schülerversuch geplant werden.

Als Beispiel für einen typischen Lehrerversuch stellt sich die Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Folien mit Hilfe einer Zink-Luft-Batterie dar (V 4.1.2). Die apparativen Besonderheiten, der hohe Zeitaufwand der Vorbereitungen sowie die hohen Anforderungen an das experimentelle Geschick lassen deutlich erkennen, dass hier eine Arbeit von Schülergruppen nicht sinnvoll ist.

Unter dem Aspekt der hier dargestellten Ausführungen werden die in Kapitel 12 aufgeführten Experimentiervorschriften nach ihren Verwendungsmöglichkeiten eingestuft und als Schülerversuch (SV) oder Lehrerversuch bzw. Demonstrationsversuch (LV) gekennzeichnet. Auch eine Zuordnung zur Sekundarstufe I (S I) bzw. Realschule oder zur Sekundarstufe II (S II) wird dort vorgenommen. Der zahlenmäßige Anteil der Schülerversuche beträgt rund 50 %.

## 15 Experimenteller Teil

### 15.1 Metalle

#### **V 1.1: Entfernung der Aluminiumschicht aus größeren Verbunden**

Demonstrationsversuch, SV, SI

Material:

Schere, Kristallisierschale (Durchmesser ca. 20 cm), Glasplatte, Pinzette aus Kunststoff, Mikrometerschraube, FTIR-Spektrometer

Chemikalien:

Folie einer Chipsverpackung (z.B. Verbund Polyolefine/Aluminium/Polyolefine), Salzsäure, w = 18% (ätzend, C)

Dauer: Zersetzung der Aluminiumschicht ca. 5 Tage, Untersuchung der Kunststoffe 30 min

Versuchsdurchführung:

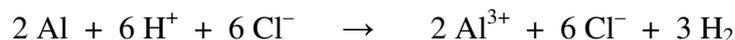
- Unter dem Abzug wird in die Kristallisierschale ca. 2 cm hoch Salzsäure gefüllt.
- Man schneidet die Folie auf die gewünschte Größe zurecht und legt sie in die Säure. Dann wird auf die Kristallisierschale als Abdeckung die Glasplatte gelegt.
- Nach einigen Tagen lassen sich mit der Pinzette die Kunststoffschichten auseinander ziehen. Dann wäscht und trocknet man die Kunststoffschichten sorgfältig und misst ihre Dicke mit der Mikrometerschraube.
- Die Summe der Schichtdicken wird mit der Dicke der unbehandelten Originalfolie verglichen. Zur Identifizierung kann die FTIR-Spektrometrie herangezogen werden.
- Man kann auch versuchen, Folienschichten mechanisch voneinander zu lösen.

Beobachtung:

Nach einigen Minuten beginnt die Gasentwicklung; nach einer halben Stunde lässt sich die Zersetzung des Aluminiums am Rand beobachten. Die Messung der Schichtdicken der übrig gebliebenen Kunststoffschichten ist zwar möglich, jedoch lassen sich daraus keine Erkenntnisse über die Dicke der Aluminiumschicht selbst ableiten. Die FTIR-Spektrometrie ergibt beispielsweise, dass es sich bei den Kunststoffen um Polypropylen und Polyethylen handelt.

Deutung:

Die Säure reagiert mit dem Aluminium, wobei Wasserstoff entsteht.



Es lässt sich z.B. folgende Schichtung ermitteln:

25 µm Polypropylen, bedruckt (außen)

10 µm Polyethylen

Aluminiumschicht

32 µm Polypropylen

Die Dicke der Aluminiumschicht ist zu gering für die Ermittlung von Messwerten.

Entsorgung: Die Lösung, welche Aluminium-Ionen enthält, gibt man nach Neutralisation zu den Schwermetallabfällen.

Literatur: [114, S. 148]

### **V 1.2.1: Nachweis der Aluminiumschicht in einer Verbundfolie mit Alizarin S**

SV, S I

Geräte:

2 Petrischalen (Durchmesser 5 cm), Schere, Lineal, Schmirgelpapier, 2 Pasteurpipetten, Lupe,

Chemikalien:

Aluminiumhaltige Folie (Joghurtdeckel, Butterfolie, Kaugummifolie usw.), Ethanol (leicht entzündlich, F), Natronlauge,  $c = 2 \text{ mol/L}$  (ätzend, C), 0,1%ige wässrige Lösung von Alizarin S (reizend, Xi; 0,1 g Natrium-Alizarinsulfonat auf 100 mL dest. Wasser)

Dauer: 45 min

Durchführung:

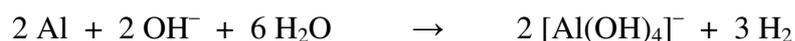
- Die Lackschicht der Metallseite wird mit einem ethanolgetränkten Zellstofftuch sorgfältig abgerieben. Die Metallschicht muss für Reagenzien frei zugänglich sein. Dickere Lackschichten können durch vorsichtiges Reiben mit feinem Schmirgelpapier entfernt werden.
- Man stellt zwei Petrischalen bereit.
- Nun schneidet man ein quadratisches Stück Folie mit einer Kantenlänge von 3 cm aus und legt dieses - mit der Metallschicht nach oben - in die erste Petrischale.
- Auf das Folienstück werden 10 Tropfen Natronlauge gegeben.
- Diese lässt man 30 min lang einwirken. Während dieser Zeit beobachtet man gelegentlich die Reaktion auf der Metalloberfläche mit einer Lupe.
- Gegen Ende der Wartezeit gibt man in die zweite Petrischale ebenfalls 10 Tropfen Natronlauge.
- In beide Petrischalen werden jeweils 5 Tropfen Alizarin S-Lösung gegeben.

Beobachtung:

Auf der Aluminiumschicht entwickelt sich ein Gas. Bei Zugabe von Alizarin S-Lösung entsteht eine Substanz mit leuchtend roter Farbe. Natronlauge allein führt hingegen zu einer Blaufärbung des zugegebenen Reagenzes.

Deutung:

Aluminium reagiert nicht nur mit Säure, sondern auch mit Natronlauge, wobei Wasserstoff entsteht:



$\text{Al}^{3+}$  - Ionen bilden mit dem Farbstoff Alizarin S einen roten Farblack.

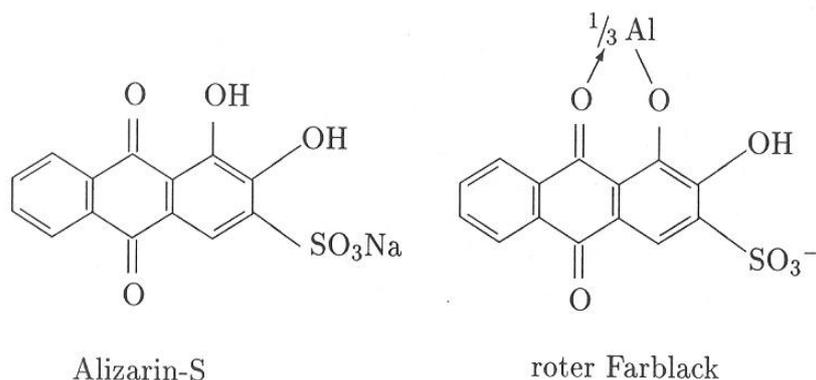


Abbildung 48: Nachweis von Aluminium-Ionen mit Alizarin S [115, S. 92]

Entsorgung: Man reibt die Petrischalen mit einem Zellstofftuch sorgfältig aus und gibt die Feststoffabfälle zum Hausmüll.

Literatur: [115, S. 92]

### V 1.2.2: Herstellung von Thénards Blau aus dem Deckel einer Getränkedose

LV, S I

#### Materialien:

Schmirgelpapier, Küchenmesser, 2 Bechergläser (100 mL), Heizrührer, Tiegelzange, Spatel, Stativmaterial, Trichter, Filtrierpapier, 2 Pasteurpipetten, Indikatorpapier, Saugflasche mit Büchnertrichter und Rundfilter (Durchmesser 55 mm), Brenner, Abzug

#### Chemikalien:

Getränkedose, verd. Salzsäure ( $w = 7\%$  bzw.  $c = 2 \text{ mol/L}$ ), verdünnte Natronlauge ( $w = 7,5\%$  bzw.  $c = 2 \text{ mol/L}$ ), wässrige Lösung von Cobalt(II)-nitrat,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ , ( $w = 0,1 \%$ ; 1 Spatelspitze bzw. 0,01 g auf 10 mL dest. Wasser)

#### Sicherheitsvorschriften:

Verd. Salzsäure (ätzend, C), verd. Natronlauge (ätzend, C), Cobalt(II)-nitrat,  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{ H}_2\text{O}$ , (giftig, T)

Dauer: Zersetzung des Aluminiums ca. 1 h, Herstellung von Thénards Blau 15 min

#### Versuchsdurchführung:

##### Teil A: Reaktion des Metalls mit Salzsäure

- Der Ringpull-Verschluss des Aluminiumdeckels einer Weißblech-Getränkedose wird sorgfältig mit einem Messer oder mit Schmirgelpapier von seiner Lackschicht befreit.
- Dann legt man den Ringpull-Verschluss in ein 100 mL- Becherglas mit 10 mL verdünnter Salzsäure.
- Das Becherglas wird auf einen Heizrührer unter dem Abzug gestellt und die Heizung eingeschaltet.
- Man deckt das Becherglas mit einem Uhrglas ab und wartet bis zur deutlichen Gasentwicklung.
- Nach Abschalten der Heizung verbleibt das Becherglas auf dem Heizrührer. (Eventuell muss bei zu heftiger Gasentwicklung das Erwärmen unterbrochen werden.)
- Man wartet bis zum Ende der Gasentwicklung und filtriert in ein zweites Becherglas.

### Teil B: Herstellung von Thénards Blau

- Zu der erhaltenen sauren Lösung gibt man tropfenweise verdünnte Natronlauge. Es entsteht weißer Niederschlag.
- Wenn ein pH-Wert von 6 erreicht ist (Indikatorpapier verwenden), beendet man die Zugabe von Natronlauge.
- Der entstehende weiße Niederschlag wird durch Saugfiltration abfiltriert.
- Ein Teil des weißen Rückstandes wird mit einem Spatel auf den U-förmigen Rand einer Magnesiumrinne gestrichen.
- Mit Hilfe einer Tiegelzange hält man diese in die rauschende Brennerflamme, bis die Aluminiumverbindung glüht.
- Nach 10 bis 20 Sekunden gibt man mit Hilfe einer Pasteurpipette 1 Tropfen Kobaltnitrat-Lösung auf die Aluminiumverbindung und glüht erneut in der rauschenden Brennerflamme.
- Wenn nach der Abkühlung kein deutlicher Farbeffekt auftritt, wiederholt man den letzten Vorgang und gibt nochmals 1 Tropfen Kobaltnitrat-Lösung auf die Aluminiumverbindung.

### Beobachtung

#### Teil A: Reaktion des Metalls mit Salzsäure:

Eine deutliche Gasentwicklung ist erkennbar, welche sich beim Erwärmen verstärkt.

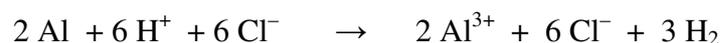
#### Teil B: Herstellung von Thénards Blau:

Bei Zugabe von verdünnter Natronlauge flockt ein weißer Stoff aus, welcher sich gut abfiltrieren lässt. Der weiße Filterrückstand lässt sich bequem mit dem Spatel aufnehmen auf die Magnesiumrinne übertragen. Nach Zugabe von wenig Cobalt(II)-nitrat –Lösung entsteht eine blaue Färbung, welche auch bei weiterem Erhitzen bestehen bleibt.

### Deutung

#### Erläuterung zu Teil A:

Bei der Reaktion von Salzsäure mit Aluminium entstehen Aluminium-Ionen und Wasserstoff:

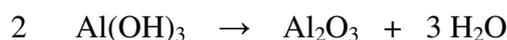


#### Erläuterung zu Teil B:

Der weiße Niederschlag besteht aus Aluminiumhydroxid.



Die Herstellung von Aluminiumoxid durch Glühen verläuft nach:



Die Entstehung von Thénards Blau lässt sich auf folgende Reaktion zurückführen:



### Hinweis:

- Cobalt(II)-carbonat ist für diesen Versuch nicht geeignet, da es nicht wasserlöslich ist.

- Außerdem lässt sich die Reaktion von aluminiumhaltigen Verpackungsteilen mit konz. Salzsäure (w=25%) ohne großen Aufwand in einer Porzellanschale unter dem Abzug demonstrieren. Dabei lässt sich die Gasentwicklung beobachten.

Entsorgung: Filtrate zu den Schwermetall-Lösungen, Filtrerrückstände zu den Feststoffabfällen

Literatur: [81, S. 322], [116, S. 274]

### **V 1.3.1: Ermittlung der Dicke einer Aluminiumschicht mit Hilfe von Teststreifen (Merck)**

SV, S I

Geräte:

Lineal, Schere, 3 Bechergläser (100 mL), Pipette (10 mL), Pipette (1 mL), Pipettierhilfe, kleine Uhrglasschale (Durchmesser 4 cm), Heizrührer, Magnetrührstäbchen, Glastrichter, Faltenfilter, Stativmaterial, Messzylinder (100 mL), Materialien aus dem AluminiumTest (Merckoquant)

Chemikalien:

Kaugummifolie oder Butterfolie, Ethanol (nur bei Verwendung von Butterfolie), verd. Salzsäure,  $c = 2 \text{ mol/L}$  (ätzend, C), Aluminium-Test (Merckoquant), pH-Papier

Dauer: 40 min

Durchführung:

Vorbereitung der  $\text{Al}^{3+}$ -haltigen Lösung

- Auf einem Stück Butterfolie markiert man eine Fläche von 8,8 cm x 4,7 cm und schneidet diese aus. (Diese Maße entsprechen der Fläche einer Kaugummifolie.)
- Man tränkt ein Zellstofftuch mit Ethanol und reibt vorsichtig die äußere Lackschicht der Butterfolie ab. Auf die gleiche Weise wird die innere Schicht von möglichen Fettresten befreit. (Die Kaugummifolie muss nicht behandelt werden.)
- Das erhaltene Stück wird in möglichst schmale Streifen (1 bis max. 2 mm Breite) geschnitten. Diese gibt man in ein 100 mL-Becherglas. Hier werden mit einer passenden Schere die Streifen weiter zerkleinert.
- Nun werden 10 mL Salzsäure ( $c = 2 \text{ mol/L}$ ) sowie das Magnetrührstäbchen hinzugefügt.
- Das Becherglas wird durch ein passendes Uhrglas abgedeckt und auf den Heizrührer gestellt. Bei laufendem Rührwerk wird erhitzt. (Bei zu starker Gasentwicklung schaltet man die Heizung vorübergehend aus.)
- Wenn die Gasentwicklung deutlich nachlässt, werden Heizung und Rührwerk abgestellt.
- Wenn in den Folienstücken keine Metallreste mehr zu erkennen sind, lässt man etwa 5 min abkühlen und entfernt den Rührmagnet.

Orientierende Bestimmung des Gehaltes an  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen

- Die verbleibenden Papierreste werden abfiltriert. Das saure Filtrat, welches die gelösten  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen enthält, wird 1:100 mit dest. Wasser verdünnt. Dazu überführt man 1 mL des sauren Filtrats mit einer Pipette in den Messzylinder und füllt mit dest. Wasser bis zur 100 mL – Markierung auf.
- Mit dieser erhaltenen verdünnten Lösung wird der Schnelltest auf  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen durchgeführt. Von dieser verdünnten Lösung werden 5 mL in das Reaktionsgefäß aus dem Testbesteck gefüllt.

- Man fügt 2 Tropfen von Reagenz 1 hinzu und schwenkt das Reaktionsgefäß zur besseren Durchmischung etwas, wobei ein pH-Wert von 13 erreicht werden muss (pH-Papier).
- Dann wird der Teststreifen für 1 Sekunde in die Probelösung getaucht (abtropfen lassen). Nun gibt man 1 Tropfen von Reagenz 2 auf das Reaktionsfeld des Teststreifens.
- Man lässt Reagenz 2 für 1 Minute einwirken und entfernt danach den Tropfen durch kurzes Schwenken.
- Nach einer weiteren Minute wird die auftretende Farbintensität mit den rosa Farbfeldern auf der Packung verglichen. Der verdünnten Probelösung lässt sich nun die entsprechende Massenkonzentration an  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen zuordnen.
- Da die ursprüngliche Lösung 1:100 verdünnt wurde, muss der erhaltene Wert mit 100 multipliziert werden.

Ergebnis:

Die eingesetzte Kaugummifolie (oder Butterfolie) hat eine Fläche von  $A = 41,36 \text{ cm}^2$ . Der durch Einsatz dieser Probe erhaltene rosa Farbton entspricht einer Massenkonzentration von  $\beta(\text{Al}^{3+}) = 50 \text{ mg/L}$ . Durch Multiplizieren mit 100 erhält man für die unverdünnte Ausgangslösung eine  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen-Konzentration von  $5000 \text{ mg/L} = 5 \text{ g/L}$ .

Hinweis zur Nachweisreaktion des Schnelltests:

Die Aluminium-Ionen werden mit Hilfe von alkalischer Lösung (Reagenz 1) in Aluminat überführt, welches in Gegenwart von Essigsäure (Reagenz 2) mit dem Ammoniumsalz der Aurintricarbonsäure (Reaktionsfeld des Teststreifens) einen roten Farbstoff bildet. Da nur sechs Testfelder vorliegen (0, 10, 25, 50, 100 und 250 mg/L), kann man hier nur von einer orientierenden bzw. halbquantitativen Gehaltsbestimmung sprechen.

Auswertung des Ergebnisses:

Aus der Prüffolie wurden  $5 \text{ g} \times \frac{10 \text{ mL}}{1000 \text{ mL}} = 0,05 \text{ g}$  Aluminium nachgewiesen. Ausgehend von

der Dichte  $\rho = \frac{m}{V}$  und dem Volumen  $V = A \times d$  gelangt man über  $\frac{m}{\rho} = A \times d$  zur

Schichtdicke  $d = \frac{m}{\rho \times A}$ . Setzt man für die Masse  $m(\text{Aluminium}) = 0,05 \text{ g}$  ein, so erhält man

bei einer Dichte von  $\rho(\text{Aluminium}) = 2,7 \text{ g/cm}^3$  eine Schichtdicke von  $d = \frac{0,05}{2,7 \times 41,36} \text{ cm} = 0,000448 \text{ cm} = 0,00448 \text{ mm} = 4,48 \mu\text{m}$ . Mit einer Aluminium-

Schichtdicke von rund  $4,5 \mu\text{m}$  liegt das Ergebnis in der Größenordnung des Wertes, welcher mit dem titrimetrischen Verfahren (Versuch 1.3.3) ermittelt wird ( $5,7 \mu\text{m}$ ). Beim Einsatz des halbquantitativen Verfahrens ist mit Abweichungen von ca. 20% zu rechnen. Butterfolie und Kaugummifolie haben etwa die gleiche Dicke.

Entsorgung: Die Lösungen werden zu den anorganischen Abfällen mit Schwermetallen gegeben.

Literatur: [117], Bestimmung von Aluminium mit Testbesteck

### V 1.3.2: Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens

LV, S I

#### Versuchsmaterial:

Lineal, Schere, Rundkolben, Pulvertrichter, Messzylinder (50 mL), Trichter, Gasentwicklungsapparatur (Rundkolben, Zwischenstück mit seitlichem Ansatz, Tropftrichter mit Druckausgleich, Stopfen), pneumatische Gasauffangvorrichtung (gebogenes Glasrohr, Kristallisierschale, 100 mL-Messzylinder), Stativmaterial, Schlauchmaterial, Thermometer, Barometer

#### Chemikalien:

H-Milch-Karton, Kaugummifolie, konz. Salzsäure (w = 25%; ätzend, C)

Dauer: Versuchsansatz 30 min, Reaktionszeit 1 Tag

#### Versuchsaufbau:

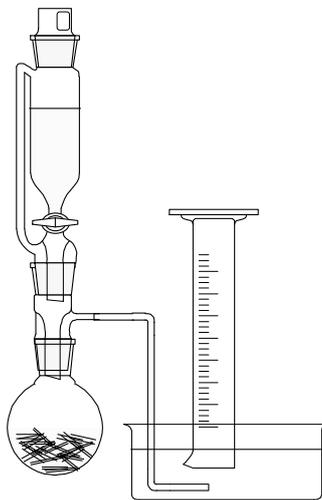


Abbildung 49: Gasentwicklungsapparatur. Im Rundkolben befinden sich ausgeschnittene Stücke des aluminiumhaltigen Getränkekartons, welche über den Tropftrichter mit konzentrierter Salzsäure versetzt werden. Der entstehende Wasserstoff wird pneumatisch aufgefangen.

#### Versuchsdurchführung:

- Aus einem Milchkarton wird eine Fläche mit den Maßen 8,7 cm x 4,7 cm ausgemessen und ausgeschnitten. (Diese Fläche entspricht den Maßen einer Kaugummifolie, welche ebenfalls eine Aluminiumschicht enthält.) Das ausgeschnittene Kartonstück wird in der Länge halbiert. Von diesen beiden Hälften schneidet man kurze schmale Streifen ab, deren Breite etwa 2-3 mm betragen sollte. Mit Hilfe eines Pulvertrichters werden die Kartonestreifen in den Rundkolben überführt.
- Die Gasentwicklungsapparatur wird zusammengesetzt. In den Tropftrichter werden 20 mL konz. Salzsäure eingefüllt.
- Am nächsten Tag wird das entstandene Gasvolumen abgelesen (Temperatur- und Luftdruckmessung).

#### Versuchsergebnisse:

Bis zum folgenden Tag hat sich ein Volumen von 100 mL Gas im Messzylinder angesammelt (Temperatur: 22 °C, Luftdruck: 742 Torr).

### Auswertung:

Über die Stoffmenge des erhaltenen Wasserstoffs soll zunächst die Stoffmenge der eingesetzten Aluminiumportion berechnet werden. Aluminium reagiert mit Salzsäure unter Freisetzung von Wasserstoff:



### Berechnung der Stoffmenge des entstandenen Wasserstoffs:

Zunächst wird das Normvolumen des Wasserstoffs berechnet. Dazu kann eine Tabelle mit „Faktoren zur Umrechnung von Gasvolumina auf Normbedingungen“ aus einem Schulbuch verwendet werden. Da man das Gas über Wasser aufgefangen hat, muss zunächst vom gemessenen Luftdruck der Wasserdampfdruck abgezogen werden. Der Wasserdampfdruck ist temperaturabhängig und kann einer Tabelle entnommen werden. Bei einer Temperatur von 22 °C beträgt der Dampfdruck 26 hPa. Dies ergibt für einen Luftdruck von  $p = 989 \text{ hPa}$  einen korrigierten Wert von  $989 \text{ hPa} - 26 \text{ hPa} = 963 \text{ hPa}$ .

Der Kombination einer Temperatur von 22° C = 295 K und einem Luftdruck von 963 hPa ist ein Faktor von 0,88 zugeordnet. Somit errechnet sich aus 100 mL aufgefangenem Gas ein Normvolumen von  $V_n = 0,88 \times 100 \text{ mL} = 88 \text{ mL}$ . Außerdem lässt sich das Normvolumen über

die allgemeine Zustandsgleichung der Gase berechnen:  $\frac{p_0 \times V_0}{T_0} = \frac{p_1 \times V_1}{T_1}$ . Durch Umformen

und Einsetzen erhält man ebenfalls  $V_0 = \frac{p_1 \times V_1 \times T_0}{T_1 \times p_0} = \frac{963 \text{ hPa} \times 100 \text{ mL} \times 273 \text{ K}}{295 \text{ K} \times 1013 \text{ hPa}} = 88 \text{ mL}$ . Die

Stoffmenge an Aluminium wird über das molare Normvolumen  $V_{m,n} = 22,414 \text{ L/mol}$  berechnet. Für  $88 \text{ mL} = 0,088 \text{ L}$  Wasserstoff ergibt sich folgende Stoffmenge:

$$n(\text{H}_2) = \frac{0,088}{22,414} \times 1 \text{ mol} = 0,00393 \text{ mol}.$$

### Berechnung der Stoffmenge des umgesetzten Aluminiums:

Aus der Reaktionsgleichung ergibt sich folgendes Stoffmengenverhältnis:  $\frac{n(\text{Al})}{n(\text{H}_2)} = \frac{2}{3}$  bzw.

$n(\text{Al}) = \frac{2}{3} \times n(\text{H}_2)$ . Damit erhält man für Aluminium die Stoffmenge von

$$n(\text{Al}) = \frac{2}{3} \times 0,00393 \text{ mol} = 0,00262 \text{ mol}.$$

### Berechnung der Masse des umgesetzten Aluminiums:

Bei einer molaren Masse von 27 g/mol lässt sich die Masse der Stoffportion aus der Stoffmenge berechnen:  $m(\text{Al}) = n(\text{Al}) \times M(\text{Al}) = 0,00262 \text{ mol} \times 27 \text{ g/mol} = 0,07074 \text{ g}$ . Diese Masse an Aluminium muss im ausgemessenen Stück des Milchkartons vorhanden gewesen sein.

### Berechnung der Dicke der Aluminiumschicht:

Über die Dichte von Aluminium, die Masse der Aluminiumportion sowie über die ausgemessene Fläche kann nun die Dicke der Aluminiumschicht berechnet werden. Folgende Zusammenhänge werden genutzt:  $Dichte = \frac{Masse}{Volumen}$  und  $Volumen = Fläche \times Dicke$ . Aus dem Zu-

sammenhang  $\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \times d}$  erhält man durch Umformen  $d = \frac{m}{A \times \rho}$ . Bei einer Folienfläche von  $A = 40,89 \text{ cm}^2$  und einer Dichte von  $\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$  ergibt sich folgende Dicke:

$$d = \frac{0,07074 \text{ g}}{40,89 \text{ cm}^2 \times 2,7 \text{ g/cm}^3} = 0,00064 \text{ cm} = 0,0064 \text{ mm} = 6,4 \mu\text{m}.$$

Für die Aluminiumfolie im Getränkekarton wurde eine Schichtdicke von  $6,4 \mu\text{m}$  ermittelt. Damit hat die Aluminiumfolie eine Stärke, die etwa dem Durchmesser eines roten Blutkörperchens entspricht. Im nachfolgend dargestellten Querschnitt ist die Aluminiumschicht zwischen zwei PE-Schichten deutlich zu erkennen (Abb. 50).

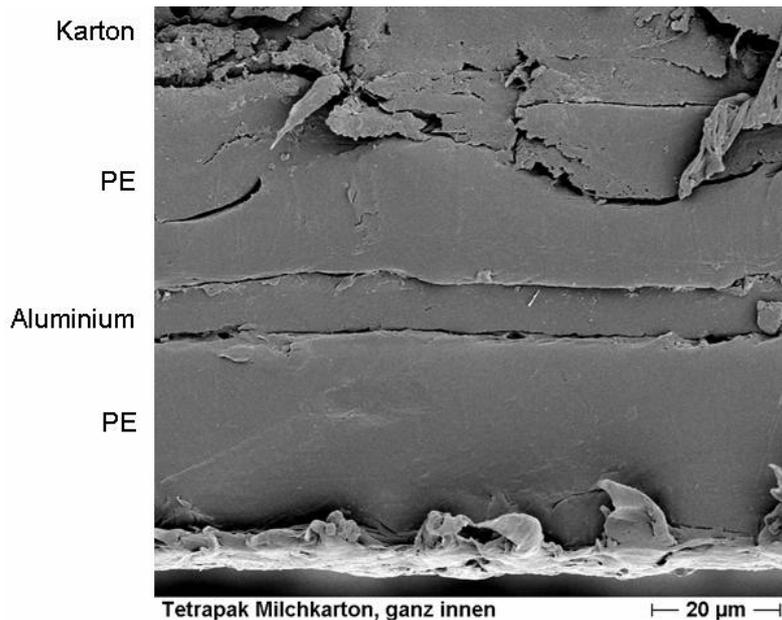


Abbildung 50: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts durch einen Getränkekarton für haltbare Milch. Deutlich ist in der Mitte des Bildes als Streifen die Aluminiumschicht zu erkennen, welche hier in einer Dicke von  $<10 \mu\text{m}$  erscheint. Die Kartonschicht (im Bild oben dargestellt) ist nur teilweise zu sehen. Auch sie ist nach außen von einer PE-Schicht überzogen.

#### Hinweis:

- Will man den Versuch mit einer Kaugummifolie ( $8,8 \text{ cm} \times 4,7 \text{ cm}$ ) durchführen, so setzt man nur  $10 \text{ mL}$  Salzsäure ein. Dann empfiehlt es sich, den Rundkolben während der rasch ablaufenden Reaktion in eine Schale mit kaltem Wasser stellen.
- Außerdem lässt sich die Reaktion von aluminiumhaltigen Verpackungsteilen mit konz. Salzsäure ( $w=25\%$ ) ohne großen Aufwand in einer Porzellschale unter dem Abzug demonstrieren. Dabei lässt sich die Gasentwicklung beobachten.

#### Entsorgung:

Die entstehende Lösung mit Aluminiumionen wird zu den anorganischen Abfällen mit Schwermetallen gegeben, der unzersetzte Rest des Getränkekartons zum Hausmüll.

Literatur: [69, S. 358], Tabelle „Faktoren zur Umrechnung von Gasvolumina auf Normbedingungen“

### V 1.3.3: Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht durch ein titrimetrisches Verfahren

SV, S II

Geräte: Waage (Milligramm-Genauigkeit), Schere, 100-mL-Pipette, Messzylinder, Schnappdeckelglas (Durchmesser etwa 2,5 cm, Höhe max. 6 cm), kleines Uhrglas, 50-mL-Bürette mit kleinem Trichter, größerer Trichter, Filtrierpapier, Heizrührer, 500-mL-Becherglas, 250-mL-Becherglas (schmale Form), 100 mL-Erlenmeyerkolben, Pasteurpipette, eventuell Mikrometerschraube

Chemikalien: Titriplex<sup>®</sup>-III-Lösung (Dinatrium-EDTA-Lösung) (c = 0,1 mol/L), Zinksulfat-Lösung, (c = 0,1 mol/L), Xylenolorange (1 Mikrospatelspitze in 1 mL Wasser gelöst), Salzsäure (w(HCl) = 18 %), verd. Salzsäure (c = 2 mol/L), Natriumacetat (p.a.), pH-Teststäbchen mit Messbereich 4-7, aluminiumhaltige Verbundfolie

Sicherheitsvorschriften: Titriplex<sup>®</sup>-III-Lösung (reizend, Xi), Zinksulfat-Lösung (reizend, Xi; umweltgefährlich, N), Salzsäure (ätzend, C)

Versuchsdauer pro Probe: 1. Tag: 15 min, 2. Tag: 45 min

Durchführung:

Vorbereitung der Al<sup>3+</sup>-haltigen Lösung (1. Tag)

50 cm<sup>2</sup> (bei dünnen Schichten 100 cm<sup>2</sup>) aluminiumhaltige Verbundfolie werden in möglichst schmale Streifen (1 bis 2 mm Breite) geschnitten. Diese gibt man in ein Schnappdeckelglas. Hier sollten mit einer passenden Schere die Streifen nochmals zerkleinert werden. Nun fügt man 10 mL Salzsäure (c = 2 mol/L), bei Getränkekartons jedoch höher konzentrierte Salzsäure (w(HCl) ≈ 18 %) hinzu. Die Öffnung wird durch ein kleines Uhrglas abgedeckt. Man lässt über Nacht reagieren. Die Entwicklung eines Gases (Wasserstoff) ist deutlich sichtbar.

Bestimmung des Gehaltes an Aluminium-Ionen (2. Tag)

Der Inhalt des Schnappdeckelglases wird in ein Becherglas (250 mL) filtriert. Es wird zweimal mit etwas dest. Wasser nachgespült. Die so gewonnene Probenlösung wird mit 50 mL Titriplex<sup>®</sup>-III-Lösung (c = 0,1 mol/L) versetzt. Man fügt 1 mL Salzsäure (c = 2 mol/L) hinzu, kocht kurz auf und stellt die Probe für 10 min auf ein siedendes Wasserbad. Nach dem Abkühlen werden einige Spatelspitzen Natriumacetat hinzugefügt, bis sich ein pH-Wert zwischen 5 und 6 eingestellt hat. 3 Tropfen der wässrigen Xylenolorange-Lösung werden zugefügt und mit Zinksulfat-Lösung (c = 0,1 mol/L) bis zum scharf erfolgenden Umschlag von gelb nach rot titriert.

Auswertung: Aluminium wird zunächst durch Salzsäure zersetzt:



Dann werden die herausgelösten Al<sup>3+</sup>-Ionen mit Titriplex-III-Lösung (EDTA-Lösung) im Überschuss quantitativ gebunden. Die Rücktitration erfolgt mit Zinksulfat-Lösung unter Zusatz von Xylenolorange. Ist der Äquivalenzpunkt Zn<sup>2+</sup>/überschüssige Titriplex-III-Lösung erreicht, erfolgt ein Farbumschlag von gelb nach rot durch Komplexbildung von Zn<sup>2+</sup>-Ionen mit Xylenolorange.

1 mL Titriplex<sup>®</sup>-III-Lösung (c = 0,1 mol/L) entspricht einer Masse an Aluminium von 2,698 mg.

Beispiel 1: Bestimmung des Aluminiumanteils einer Verbundverpackung für haltbare Milch oder Obstsaft

Durchführung: Eine Fläche von 50 cm<sup>2</sup> wird aus einem Stück Getränkekarton ausgeschnitten. Die äußere Schicht der Pappe wird abgezogen, der Rest lässt sich mit Hilfe von Wasser abreiben. Der übrig bleibende Verbund wird nach dem Kleinschneiden in 10 mL Salzsäure (w(HCl) = 18 %) über Nacht stehen gelassen.

Auswertung (Berechnung der Schichtdicke):

Da bekannt ist, dass die ermittelte Masse des Aluminiums auf A = 50 cm<sup>2</sup> verteilt ist, kann bei Kenntnis der Dichte ( $\rho = 2,70 \text{ g/cm}^3$ ) die Dicke der Aluminiumschicht errechnet werden:

Aus  $\rho = \frac{m}{V}$  ergibt sich  $V = \frac{m}{\rho}$ . Setzt man für  $V = A \times d$ , so kann man über  $A \times d = \frac{m}{\rho}$  auflösen

nach  $d = \frac{m}{\rho \times A}$ . Durch Einsetzen erhält man am Beispiel der ersten Probe:

$$d = \frac{0,07352 \text{ g}}{2,70 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 50 \text{ cm}^2} = 0,0005445 \text{ cm} = 0,005445 \text{ mm} = 5,445 \text{ }\mu\text{m}.$$

Die Ergebnisse der Untersuchung zweier Proben sind in der nachfolgenden Tab. 40 zusammengefasst.

Tabelle 40: Bestimmung der Dicke der Aluminiumschicht einer Milchverpackung

Milchkarton 50 cm <sup>2</sup> Probe Nr.	Verbrauch an ZnSO <sub>4</sub> -Lsg. (exp. ermittelt)	Verbrauch an Titriplex-Lsg. (berechnet)	Ermittelte Masse an Aluminium	Dicke der Aluminium- schicht
1	22,75 mL	27,25 mL	73,52 mg (= 0,07352 g)	5,445 $\mu\text{m}$
2	24,95 mL	25,05 mL	67,58 mg (= 0,06758 g)	5,005 $\mu\text{m}$

Die Schichtdicke des Aluminiums aus der ersten Probe beträgt somit 5,445  $\mu\text{m}$ . Sie liegt in der Größenordnung des Durchmessers eines roten Blutkörperchens und ist dünner als ein Menschenhaar.

Beispiel 2: Bestimmung des Aluminiumanteils und der Dicke der Aluminiumschicht einer Butter-Einpackfolie

Die Untersuchung dieser Folie führt zu den in der nachfolgenden Tab. 41 aufgeführten Ergebnissen.

Tabelle 41: Bestimmung des Aluminiumanteils einer Butter-Einpackfolie

Butterfolie Fläche	Verbrauch an ZnSO <sub>4</sub> -Lsg. (exp. ermittelt)	Verbrauch an Titriplex-Lsg. (berechnet)	Ermittelte Masse an Aluminium	Dicke der Aluminium- schicht
20 cm <sup>2</sup>	38,70 mL	11,30 mL	30,487 mg = 0,03049 g	0,0005646 cm = 0,005646 mm = 5,65 $\mu\text{m}$
50 cm <sup>2</sup>	21,15 mL	28,85 mL	77,837 mg = 0,07784 g	0,0005765 cm = 0,005765 mm = 5,77 $\mu\text{m}$

Das Ergebnis zeigt, dass die untersuchten Butterfolien eine Aluminiumschicht der Dicke von ca. 5,7  $\mu\text{m}$  aufweisen.

**Beispiel 3: Untersuchung der Aluminiumschicht einer Chipstüte**

**Durchführung:** Ein Stück Folie (Bahlsen/Lorenz „Crunchips“) der Fläche 100 oder 200  $\text{cm}^2$  wird in maximal 2 mm breite Streifen geschnitten. (Die Streifen dürfen nicht breiter sein, da sonst die Zersetzung des Aluminiums nicht vollständig verläuft!) Das zerkleinerte Material wird wie oben angegeben mit 10 mL verdünnter Salzsäure ( $c = 2 \text{ mol/L}$ ) behandelt. Die Versuche können in diesem Fall auch mit Maßlösungen der Konzentration  $c = 0,01 \text{ mol/L}$  (Titriplex<sup>®</sup>-III-Lösung und Zinksulfat-Lösung) durchgeführt werden. Die nachfolgende Tab. 42 zeigt das Versuchsergebnis von drei Proben.

Tabelle 42: Bestimmung der Dicke der Aluminiumschicht einer Chipstüte

Fläche der Chipsfolie	Verbrauch Zinksulfat-Lsg. (exp. bestimmt)	Verbrauch Titriplex III-Lsg. (berechnet)	Masse Aluminium	Masse der Aluminium-Schicht pro 100 $\text{cm}^2$	Dicke der Aluminium-Schicht
100 $\text{cm}^2$	49,4 mL (0,1 mol/L)	0,6 mL (0,1 mol/L)	1,619 mg	1,619 mg	0,060 $\mu\text{m}$
200 $\text{cm}^2$	49,1 mL (0,1 mol/L)	0,9 mL (0,1 mol/L)	2,428 mg	1,214 mg	0,045 $\mu\text{m}$
200 $\text{cm}^2$	42,7 mL (0,01 mol/L)	7,3 mL (0,01 mol/L)	1,970 mg	0,985 mg	0,036 $\mu\text{m}$

Es ergibt sich eine Aluminium-Schichtdicke von ca. 50  $\mu\text{m}$ .

**Entsorgung:** Lösungen neutralisieren und in den Abfallbehälter „wässrige Schwermetallsalzlösung“ geben.

**Literatur:** Eigene Publikation [28], Broschüre Firma Merck [118], Informationen über Redox-Indikatoren [119, S. 513 f.]

### V 1.4.1: Anodische Oxidation des Aluminiums aus einer Getränkedose durch Elektrolyse

SV, S II

#### Materialien:

Schere, Lineal, Schmirgelpapier, Petrischale (Durchmesser 9 cm), 4 Krokodilklemmen, 2 Kabel, Trafo, Overhead-Folie, Pasteurpipette, Overhead-Projektor

#### Chemikalien:

Getränkedose aus Aluminium, wässrige Lösung von Alizarin S (reizend, Xi; 0,1 g Natrium-Alizarinsulfonat auf 100 mL dest. Wasser;  $w = 0,1 \%$ ), Kochsalzlösung (17,5 g Natriumchlorid auf 50 mL dest. Wasser,  $w = 26 \%$ ), pH-Papier

Dauer: 15 min

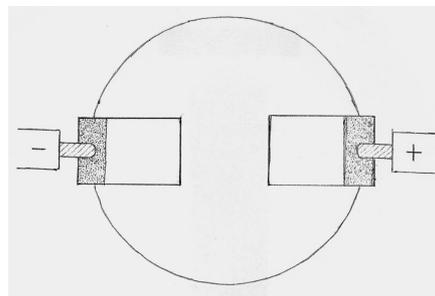


Abbildung 51: Versuchsaufbau V 1.4.1

#### Versuchsdurchführung:

- Aus der Wand der Aluminium-Getränkedose werden zwei Streifen mit der Breite 1,5 cm und der Länge 8,0 cm ausgeschnitten. Dann wird jeweils der Lack auf beiden Seiten sorgfältig abgeschmirgelt.
- Man faltet die beiden Aluminiumstreifen jeweils quer in der Mitte, drückt sie an der Knickstelle über den Rand der Petrischale und biegt die beiden verbleibenden Enden jeweils so, dass sie waagrecht liegen. Das Ende, welches in die Petrischale ragt, sollte dort möglichst flach am Boden anliegen.
- Die Aluminiumstreifen werden in der Petrischale so angeordnet, dass sie sich gegenüber liegen. Um die Metallstreifen stabil in der Petrischale zu befestigen, klemmt man sie mit jeweils einer Krokodilklemme an der Wandung fest (Abb. 51).
- Auf den Overhead-Projektor wird eine Overhead-Folie gelegt und die präparierte Petrischale darauf gestellt. Die nach außen ragenden Teile der Aluminiumstreifen werden jeweils mittels zusätzlicher Krokodilklemme über ein Kabel mit dem Pluspol bzw. dem Minuspol des Trafos verbunden (Polung mit Filzstift auf der Folie markieren).
- In die Petrischale gießt man so viel Kochsalzlösung, dass der Boden und die beiden Metallstreifen gerade bedeckt sind. Dann wird der Overhead-Projektor eingeschaltet. Es wird eine Gleichspannung von 2 V angelegt (1 min lang elektrolysieren).
- In der Nähe des Minuspols und in der Nähe des Pluspols wird jeweils ein Stück pH-Papier in die Kochsalzlösung gehalten.
- Nach diesen Untersuchungen gibt man 3 Tropfen Alizarin S-Lösung auf den Metallstreifen, welcher als Pluspol dient, sowie einige Tropfen an verschiedene Stellen, die in größerer Entfernung zum Pluspol liegen, in die Petrischale.

### Beobachtung:

- Am Pluspol ist nach Zugabe von Alizarin S eine Rotfärbung zu sehen. Die Gasentwicklung ist relativ schwach. Um das Anodenblech herum zeigt sich ein weißer Niederschlag. Das pH-Papier weist einen Wert von ca. 5 nach.
- Am Minuspol ist eine lebhafte Gasentwicklung zu beobachten. Das Indikatorpapier färbt sich blau. Bei Zugabe von Alizarin S tritt eine Violettfärbung auf.

### Deutung:

Am Pluspol wird Aluminium oxidiert, wobei  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen entstehen:



Die entstehenden Aluminium-Ionen geben mit Alizarin S einen roten Farblack. Die Darstellung der Strukturformel findet man unter Versuch 1.2.1.

Die schwache Gasentwicklung an der Anode kann nur darauf zurückzuführen sein, dass neben der Oxidation von Aluminium auch in geringerem Umfang eine Oxidation von Wasser stattfindet, wobei Sauerstoff gebildet wird:

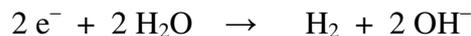


Die Ursache für den Niederschlag an der Anode ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass eine schützende Aluminiumoxidschicht entsteht:



Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei Anwesenheit von Chlorid-Ionen der lösliche Chlorokomplex  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$  entsteht.

Am Minuspol entsteht eine alkalische Lösung. Es bilden sich  $\text{OH}^{-}$ -Ionen, wobei Wasserstoff entsteht:



Zur Erklärung ist folgender Zusammenhang zu beachten: Bei Elektrolysen laufen immer die Reaktionen ab, die die kleinste Zersetzungsspannung erfordern. An der Kathode (Minuspol) wird der Stoff mit dem positivsten Potenzial reduziert. Im vorliegenden Experiment sind dies die Wassermoleküle. An der Anode (Pluspol) wird der Stoff mit dem negativsten Potenzial oxidiert. Im vorliegenden Experiment ist dies Aluminium. Wird jedoch die Aluminiumschicht durch eine Oxidschicht blockiert, so kommt nach den Redoxpotenzialen als nächste Möglichkeit nur die Oxidation von Wassermolekülen in Betracht. Die Redoxpotenziale lassen sich der nachfolgenden Tab. 43 entnehmen:

Tabelle 43: Redoxpotenziale möglicher korrespondierender Redoxpaare zum vorliegenden Experiment [120, S. 142 f.]

<b>Korrespondierendes Redoxpaar</b>	<b>Redoxpotenzial (in V)</b>
$\text{Cl}^{-}/\text{Cl}_2$	$E^{\circ} = + 1,36 \text{ V}$
$\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2$	$E = + 0,82 \text{ V}$ (pH = 7)
$\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$	$E = - 0,41 \text{ V}$ (pH = 7)
$\text{Al}/\text{Al}^{3+}$	$E^{\circ} = - 1,66 \text{ V}$
$\text{Na}/\text{Na}^{+}$	$E^{\circ} = - 2,71 \text{ V}$

Bei den korrespondierenden Redoxpaaren  $\text{Cl}^-/\text{Cl}_2$  sowie  $\text{Al}/\text{Al}^{3+}$  und  $\text{Na}/\text{Na}^+$  wurde zur Vereinfachung jeweils vom Standardpotenzial ausgegangen. Das tatsächliche Redoxpotenzial des korrespondierenden Redoxpaares  $\text{Al}/\text{Al}^{3+}$  ist möglicherweise kleiner als das Standardpotenzial, ist also stärker negativ. Die Redoxpotenziale  $E(\text{H}_2/\text{H}_2\text{O})$  sowie  $E(\text{H}_2\text{O}/\text{O}_2)$  wurden aus den Standardpotenzialen über die Nernst-Gleichung für  $\text{pH} = 7$  berechnet [83, S. 142]. Eine Abscheidung von Aluminium aus der wässrigen Lösung ist nicht möglich, selbst wenn man von einer Überspannung des Wasserstoffs von rund -1 V ausgeht.

Entsorgung: Anorganische Abfälle mit Schwermetallen

Literatur: [58] (Konzeption des Experiments, Angaben zu den Vorgängen an den Elektroden), [115, S. 92] (Nachweis von Aluminium-Ionen), [120, S. 142] (Angaben zu den Redoxpotenzialen)

#### **V 1.4.2: Oxidation von Aluminium aus einer Kaugummifolie durch Luftsauerstoff (Galvanische Zelle)**

SV, S II

Kurzbeschreibung:

In diesem Projektionsversuch (Petrischale, Overheadprojektor) mit Aluminiumfolie als Anode und einem Stahlblech-Streifen als Kathode erhält man eine Spannung von 0,25 V. (Zum Betreiben eines Elektromotors sind Spannung und Stromstärke zu gering.) Als Elektrolyt dient Natriumchlorid-Lösung. Die entstehenden Aluminium-Ionen werden mit Alizarin S nachgewiesen. In der Umgebung der Kathode wird die Lösung alkalisch (Nachweis mit Phenolphthalein-Lösung), was durch die oxidierende Wirkung des Sauerstoffs erklärt werden kann. Eisen(II)-Ionen lassen sich nicht nachweisen. Das Experiment bietet eine Einführung in die Spannungsreihe. Andererseits kann die Spannungsreihe selbst zur Erklärung der Phänomene herangezogen werden.

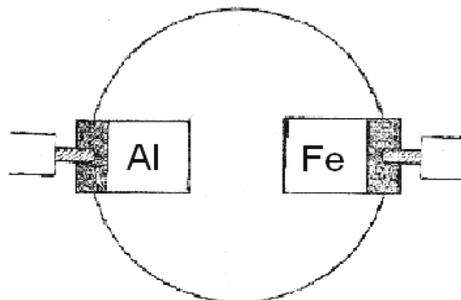


Abbildung 52: Versuchsaufbau zu V 1.4.2

Literatur: [58] (Konzeption des Experiments, Angaben zu den Vorgängen an den Elektroden, galvanische Zellen mit Dosenblech und Dosenverschluss), [115, S. 92] (Nachweis von Aluminium-Ionen), [120, S. 124, 142] (Angaben zu den Redoxpotenzialen)

### V 1.4.3: Aluminium-Sauerstoff-Element mit Blech aus einer Getränkedose

LV, S II

#### Kurzbeschreibung:

Mit Aluminiumblech als Anode und einer Graphit-Elektrode als Kathode erhält man eine Spannung von 1,1 V, womit ein empfindlicher Elektromotor betrieben werden kann. Als Elektrolyt dient Natriumchlorid-Lösung in einem Becherglas. Setzt man hingegen Stahlblech als Anode ein, lässt sich nur eine Spannung von 0,8 V erzielen. Das Experiment bietet eine Einführung in die Spannungsreihe.

Literatur: [120, S. 142] (Redoxpotenziale)

### V 1.5: Umschmelzen von Aluminium im Mikrowellenofen

SV, S I

#### Geräte:

Gekachelter Labortisch, Haushalts-Mikrowellenofen (700 W), AST-Element [121], passender Porzellantiegel, zum Porzellantiegel passender Deckel, zum Porzellantiegel passender Korkstopfen, Tiegelzange, Pulvertrichter, 2 dünne Platten aus Gasbeton (4 cm x 4 cm), Kristallisierschale (10 cm Durchmesser), Hammer, Zellstofftuch

#### Chemikalien:

Aluminiumfolie (zusammengefaltet oder gerollt, Gesamtgröße maximal 2 cm x 2 cm), Natriumchlorid

Dauer: 25 min

#### Durchführung:

- Ein Porzellantiegel wird, von Aktivkohle-Körnern umgeben, in einem AST-Element platziert (Korkstopfen zum vorübergehenden Schutz gegen die Verunreinigung durch Aktivkohle) und zu zwei Dritteln mit Kochsalz gefüllt.
- Man legt ein Stück Gasbeton in den Mikrowellenofen und stellt das AST-Element darauf. (Das AST-Element sollte möglichst im „Hot Spot“ des Mikrowellenofens stehen.) Der Deckel wird auf den Porzellantiegel gelegt.
- Nun wird das befüllte AST-Element für 3 Minuten der Mikrowellen-Strahlung ausgesetzt (höchste Stufe). Anschließend nimmt man mit der Tiegelzange den Deckel kurzzeitig ab und gibt kleine Aluminiumportionen in die entstandene Schmelze.
- Nach jeweils einminütiger Einwirkung der Mikrowellen kann die Aluminiumzugabe wiederholt werden.
- Wenn Aluminiumportionen im gewünschten Umfang eingeschmolzen wurden, lässt man den Tiegel außerhalb des AST-Elements abkühlen.
- Der Porzellantiegel wird in eine mit Wasser gefüllte Kristallisierschale getaucht. Wenn sich das Salz nicht löst, wickelt man den Porzellantiegel in ein Stück Zellstoff-Tuch und zertrümmert ihn mit einem Hammer.

#### Beobachtung:

- Während des Erhitzens entsteht eine leicht bewegliche Salzschnmelze, in welcher die hinzu gegebenen Aluminiumportionen versinken.
- Wird der Tiegel nach dem Abkühlen zerschlagen, ist am Boden ein Regulus sichtbar [122].

#### Auswertung:

Natriumchlorid besitzt eine Schmelztemperatur von 800 °C, während Aluminium wird mit bei 659 °C schmilzt [97, S. 20]. Diese Temperaturen werden innerhalb kurzer Zeit überschritten, da ein Mikrowellenofen im „Hot Spot“ eine Aufheizung auf ca. 1000 °C innerhalb der ersten Minute erzielt [121].

#### Hinweis:

Lackschichten auf dem Aluminium beginnen möglicherweise zu brennen, wenn sie Kontakt zur Schmelze bekommen.

Entsorgung: Die Feststoffabfälle gibt man zum Hausmüll.

Literatur: [97, S. 20] (Tabellenbuch), [121] (ausführliche Beschreibung zu Versuchen mit dem Mikrowellenofen), [122] (Experiment zum Umschmelzen mit dem Gasbrenner)

### **V 1.6: Anodische Oxidation von Eisen aus einer Getränkedose durch Elektrolyse**

LV, S II

#### Kurzbeschreibung:

Für dieses Demonstrationsexperiment wird ein Versuchsaufbau wie bei V 1.4.1 verwendet. Als Elektroden dienen jedoch zwei Weißblech-Streifen. Die am Pluspol gebildeten Eisen(II)-Ionen lassen sich mit rotem Blutlaugensalz nachweisen. Am Minuspol scheidet sich Wasserstoff ab, begleitet vom Entstehen einer alkalischen Lösung. Als Elektrolyt wird Kochsalzlösung verwendet. Das Experiment liefert Hinweise auf die Spannungsreihe. Andererseits können die Versuchsergebnisse mit Hilfe der Spannungsreihe erklärt werden.

Literatur: [58] (Elektrolyse von Kochsalzlösung mit Anoden aus verschiedenen Metallen), [83, S. 142 f.] (Angaben zur Spannungsreihe)

### **V 1.7.1: Untersuchung der Zinnschicht einer Konservendose**

LV, S II

#### a) Elektrolytische Abscheidung von Zinn

#### Geräte:

100 mL-Becherglas (Durchmesser = 5 cm, Höhe = 8 cm), Blechschere, Kombizange, Stativ, Doppelmuffe, Gabelklemme, durchbohrter Stopfen (Durchmesser Stopfen = 2 cm), Wäscheklammer, 2 Krokodilklemmen, 3 Kabel, Trafo, Amperemeter, Messzylinder (100 mL), Pasteurpipette

#### Chemikalien:

Konservendose (innen mit Zinn beschichtet), Eisennagel (Länge ca. 5 cm), Aceton (leicht entzündlich, F; reizend, Xi), konz. Salzsäure, w = 25% (ätzend, C)

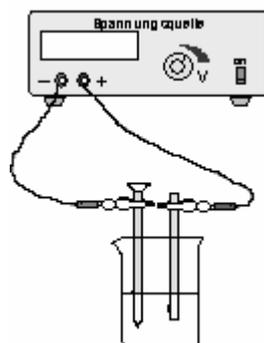


Abbildung 53: Versuchsaufbau zu V 1.7.1, Teil a. Das Weißblech wird als Anode geschaltet, der zu verzinnende Eisennagel als Kathode. Als Elektrolyt dient verdünnte Salzsäure.

Versuchsdauer: 25 min

Durchführung:

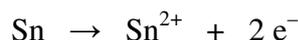
- Aus der Wandung einer Konservendose wird ein Stück (Länge: 10 cm, Höhe: 7-8 cm) herausgeschnitten. Das Blech wird mit einer Kombizange so gebogen, dass es der Wandung des Becherglases möglichst angepasst ist. Dabei sollte die innere Schicht zum Zentrum des Becherglases zeigen. Ein durchbohrter Stopfen wird mit Hilfe von Befestigungsmaterial (Stativ, Doppelmuffe, Gabelklemme) über der Mitte des Becherglases platziert.
- Der Eisennagel wird gründlich gereinigt (Aceton, Zellstofftuch), durch das Loch des Stopfens hindurch gesteckt und mit Hilfe einer Wäscheklammer so fixiert, dass er in das Becherglas möglichst tief hinein ragt. Danach wird er mit Hilfe einer Krokodilklemme über ein Amperemeter mit dem Minuspol des Trafos verbunden, das Blech der Konservendose entsprechend mit dem Pluspol.
- Nun füllt man 80 mL dest. Wasser in das Becherglas und fügt mit einer Pasteurpipette 10 Tropfen konz. Salzsäure hinzu. Es wird eine Spannung von ca. 1 V angelegt, so dass die Stromstärke etwa 0,01 A beträgt (Messbereich 0,03 A wählen) und 10 min lang elektrolysiert. Anschließend wird der Eisennagel unter fließendem Wasser abgespült (Die Elektrolyt-Lösung hebt man für weitere Versuche auf.)

Beobachtung:

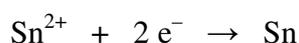
Entsprechend der Eintauchtiefe in die Elektrolytlösung hat sich auf dem Eisennagel eine scharf begrenzte silbrig-graue Schicht gebildet. Die Innenwandung des Dosenbleches hingegen zeigt Korrosionserscheinungen.

Deutung:

Auf dem Eisen hat sich Zinn abgeschieden. Die Zinn-Atome aus der Innenschicht des Dosenbleches (Anode) wurden zunächst oxidiert:



Am Eisennagel (Kathode) wurden die Zinn(II)-Ionen anschließend reduziert, was zu einer Abscheidung führte:



Entsorgung: Weißblech-Reste zum Hausmüll, Eisennagel für weitere Versuche aufheben

## b) Nachweis der Zinn(II)-Ionen durch die Leuchtprobe

### Geräte:

Porzellantiegel (Durchmesser 3 cm), Pipette (5 mL), Reagenzglas (Fiolax), Reagenzglas-  
klammer, Brenner

### Chemikalien:

Konz. Salzsäure,  $w = 25\%$  (ätzend, C), Zink-Granalien (leicht entzündlich, F), Elektrolyt mit  
Zinn(II)-Ionen aus dem Vorversuch

Versuchsdauer: 5 min

### Durchführung:

- In den Porzellantiegel werden ein Körnchen Zink und 3 mL Salzsäure gegeben.
- Man füllt ein Reagenzglas zur Hälfte mit kaltem Wasser und taucht es kurz in die Elektro-  
lyt-Lösung aus Versuch a).
- Dann wird das Reagenzglas kurz in den Porzellantiegel mit der Salzsäure gehalten und  
gleich darauf in die Brennerflamme.

### Beobachtung:

An den benetzten Stellen des Glases entsteht eine blaue Fluoreszenz.

### Deutung:

Die Fluoreszenz entsteht nur bei Anwesenheit von Zinn und rührt vom Zinn(II)-chlorid her.

Entsorgung: Restliche Zinkgranalien kommen zum Feststoffabfall, die Zinkchlorid-Lösung  
aus dem Porzellantiegel gibt man zum anorganischen Abfall mit Schwermetallen.

## c) Nachweis der Zinn(II)-Ionen als Molybdänblau

### Geräte:

Porzellantiegel (Durchmesser 3 cm), Pasteurpipette

### Chemikalien:

Elektrolyt-Lösung mit Zinn(II)-Ionen aus dem Vorversuch, Ammoniummolybdat Tetrahydrat  
(gesundheitsschädlich, Xn)

Versuchsdauer: 5 min

### Durchführung:

In den Porzellantiegel werden wenige Körnchen Ammoniummolybdat Tetrahydrat gegeben.  
Anschließend fügt man einen Tropfen der sauren Elektrolyt-Lösung hinzu.

### Beobachtung:

Es tritt sofort eine Blaufärbung auf.

### Deutung:

Bei Anwesenheit von Zinn(II)-Ionen entsteht Molybdänblau. Dabei handelt es sich um Mo-  
lybdän-Mischoxide.



Entsorgung: Die fest gewordene Agar-Agar-Substanz aus der Petrischale gibt man zum Hausmüll, rotes Blutlaugensalz hingegen zu den anorganischen Abfällen mit Schwermetallen.

Literatur: [60] (Grundkonzeption der elektrolytischen Abscheidung von Zinn), [119, S. 713] (Nachweis von Zinn(II)-Ionen als Molybdänblau), [115, S. 88] (Nachweis von Eisen(II)-Ionen), [83, S. 142 f.] (Redoxpotenziale), [116, S. 341] (Entstehung der Fluoreszenz)

### **V 1.7.2: Ermittlung des Zinngehaltes von Weißblech durch Titration mit Iodlösung**

LV, S II

Materialien: Blechschere, Waage, Becherglas (100 mL), dazu für die Abdeckung passendes Uhrglas, Rührstäbchen, Heizrührer, Abzug, Tiegelzange, Becherglas (250 mL), säurefeste Pinzette aus Kunststoff, Weithals-Erlenmeyerkolben (250 mL), Trichter, Faltenfilter, Bürette mit Stativmaterial, 1 Pipette (10 mL), 1 Pipette (2 mL), 2 Pipetten (5 mL)

Chemikalien: Konservendose (verzinkt), konzentrierte Salzsäure,  $w = 25\%$  (ätzend, C), kleines Marmorstück (passend in 250 mL-Becherglas), Spezialindikatorstäbchen pH 0 – 2,5 (Merck, Art. 9540), Stärkelösung ( $w = 0,5\%$ ): 0,5 g lösliche Stärke wird mit wenig Wasser angerührt und anschließend in 100 mL siedendem Wasser gelöst; Maßlösung: 0,1 N Iodlösung,  $c(\text{I}_2) = 0,05 \text{ mol/L}$  (gesundheitsschädlich, Xn; umweltgefährdend, N), Maßlösung: Natriumthiosulfat-Lösung,  $c(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 0,1 \text{ mol/L}$

Dauer: 45 min

#### Versuchsdurchführung:

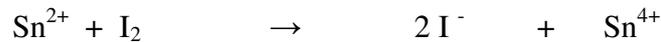
- Aus einer Konservendose wird ein 9 cm<sup>2</sup> großes Stück ausgeschnitten und gewogen. Seine Masse liegt im Bereich von 1,30 g. Dieses Weißblech-Stück wird in maximal 0,5 cm breite Streifen geschnitten. Von diesen Streifen schneidet man wiederum kleine Stücke ab, welche in einem 100 mL-Becherglas gesammelt werden.
- Nach Zugabe von 10 mL konz. Salzsäure wird das Becherglas mit einem passenden Uhrglas abgedeckt und mit dem Heizrührer (Abzug) so lange erhitzt und gerührt, bis eine lebhafte Gasentwicklung an den Metallstückchen einsetzt. (Falls das Schäumen zu stark wird, schaltet man die Heizung vorübergehend ab.)
- Nach Beendigung der Gasentwicklung wird das Becherglas mit Hilfe der Tiegelzange von der Herdplatte genommen und mit dest. Wasser bis zur 50 mL-Markierung aufgefüllt. Den Inhalt des Becherglases gießt man in ein 250 mL-Becherglas.
- Zu der nun merklich abgekühlten sauren Lösung wird ein Stück Marmor gegeben, welches man für 10 min mit der Lösung reagieren lässt. Der pH-Wert sollte danach bei etwa 1,5 liegen (Indikatorstäbchen).
- In einen Erlenmeyerkolben wird abfiltriert. Nach Zugabe von 2 mL Stärkelösung und 5 mL Iodlösung (Überschuss) schwenkt man um fügt mit Hilfe einer 5 mL-Pipette – unter fortgesetztem leichtem Schwenken des Erlenmeyerkolbens - tropfenweise so viel Thiosulfat-Lösung zu, bis die Blaufärbung gerade verschwindet. Dann wird an der Pipette der Verbrauch an Thiosulfat-Lösung abgelesen.

#### Ergebnis:

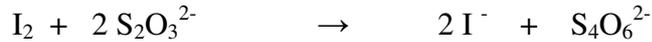
Es wurden 5,0 mL Iod-Lösung im Überschuss eingesetzt. Nach Zugabe von 2,6 mL Thiosulfat-Lösung verschwindet die Blaufärbung.

Auswertung:

Iod wird im Überschuss zur  $\text{Sn}^{2+}$ -haltigen Lösung gegeben:



Der Überschuss an Iod, welches mit Stärke einen blauen Komplex ergibt, wird bis zum Verschwinden der Blaufärbung mit Thiosulfat-Lösung titriert:



Nach der Formel für die Stoffmengenkonzentration  $c = \frac{n}{V}$  bzw.  $n = c \times V$  beträgt die Stoff-

menge der eingesetzten Iod-Lösung  $n(\text{I}_2) = 0,05 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,005 \text{L} = 0,00025 \text{mol}$ . Die Stoffmenge an Thiosulfat-Ionen, welche für die Rücktitration nötig waren, betrug  $n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,0026 \text{L} = 0,00026 \text{mol}$ .

Zunächst muss die Stoffmenge an überschüssigem Iod ermittelt werden, welche nicht mit  $\text{Sn}^{2+}$ -Ionen reagiert hat. Dazu ist folgendes Stoffmengenverhältnis erforderlich:  $\frac{n(\text{I}_2)}{n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})} = \frac{1}{2}$ .

Somit gilt:  $n(\text{I}_2) = \frac{1}{2} \times n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})$ . Der Überschuss an Iod-Lösung betrug somit

$n(\text{I}_2) = \frac{1}{2} \times 0,00026 \text{mol} = 0,00013 \text{mol}$ . Für die Reaktion mit den  $\text{Sn}^{2+}$ -Ionen müssen also  $0,00025 \text{ mol} - 0,00013 \text{ mol} = 0,00012 \text{ mol}$   $\text{I}_2$  verbraucht worden sein. Da das Stoffmengenverhältnis  $\frac{n(\text{Sn}^{2+})}{n(\text{I}_2)} = \frac{1}{1}$  beträgt, müssen entsprechend  $0,00012 \text{ mol}$   $\text{Sn}^{2+}$ -Ionen in der Lösung vorhanden gewesen sein.

Mit Hilfe der molaren Masse von Zinn  $M(\text{Sn}) = 118,7 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$  lässt sich nach  $n = \frac{m}{M}$  bzw.

$m = n \times M$  die Masse an Zinn in der eingesetzten Weißblech-Probe berechnen:

$m(\text{Zinn}) = 0,00012 \text{mol} \times 118,7 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,014 \text{g}$  Die Richtigkeit des hier vorgestellten Rechen-

weges wird durch Literaturstellen bestätigt, wonach 1 ml verbrauchte Iodlösung einer Masse von 5,935 mg Zinn entsprechen [123, S. 309], [124, S. 194].

Setzt man die Masse des Zinns zur Masse des eingesetzten Weißblechs in Beziehung, so ergibt sich für Zinn ein Massenanteil von  $\frac{0,014 \text{g}}{1,30 \text{g}} = 0,011 = 1,1\%$ . Der durchschnittliche Zinn-

anteil sämtlicher Weißblechverpackungen wird mit 0,4% angegeben. Bei Weißblechgetränkedosen liegt dieser Wert deutlich niedriger, bei Konservendosen höher [125].

Sind beide Seiten des Bleches verzinkt, ergibt sich für obiges Beispiel eine Fläche von  $2 \text{cm} \times 9 \text{cm} = 18 \text{cm}^2$  Weißblech. Auf diese Fläche kann nun die ermittelte Masse an Zinn bezogen werden. Der Einsatz von Zinn in Weißblech wird häufig in  $\text{g/m}^2$  angegeben. Aus der pro-

portionalen Zuordnung  $\frac{0,014 \text{g}}{18 \text{cm}^2} = \frac{m(\text{Zinn})}{10000 \text{cm}^2}$  ergibt sich:

$m(\text{Zinn}) = \frac{0,014 \text{g} \times 10000 \text{cm}^2}{18 \text{cm}^2} = 7,78 \text{g}$ . Für Zinnaufgaben bei Konservendosen werden An-

gaben zwischen 1,5 und 5,6  $\text{g/m}^2$  gemacht. Für Getränkedosen hingegen werden Werte zwi-

schen 1,0 und 2,8 g/m<sup>2</sup> genannt [3, S. 35]. Somit entspricht der gefundene Wert annähernd dem Literaturwert für Konservendosen.

Entsorgung: Reste der Iod-Lösung werden mit Natriumthiosulfat-Lösung zu Iodid reduziert. Die Lösung wird mit Natriumhydrogencarbonat neutralisiert und kommt zu den wässrigen Schwermetall-Abfällen. Restliche Natriumthiosulfat-Lösung und Lösungen mit Zinn-Ionen werden bei Bedarf neutralisiert und kommen ebenfalls zu den wässrigen Schwermetall-Abfällen.

Literatur: Allgemeine Informationen über Konservendosen [3], Konzeption des Versuchs [123], [124]; Broschüre des Informationszentrums Weißblech IZW [125]

### **V 1.7.3: Trennung von Zinn- und Eisen-Ionen aus Weißblech durch Fällung als Sulfide mit Thioacetamid**

LV, S II

#### Geräte:

Stabile Schere, Waage, 2 Bechergläser (100 mL), passendes Uhrglas dazu, Heizrührer, Rührstäbchen, Abzug, Messzylinder (50 mL), Tiegelzange, Becherglas (250 mL), Siedesteinchen, Stativklemme mit ausreichenden Maßen zum Halten eines kleinen Becherglases, Stativmaterial, 3 Pasteurpipetten, Pipette (5 mL) mit Pipettierhilfe, Stativring, Filtertrichter, Filtrierpapier (Faltenfilter mit 185 mm Durchmesser), 2 Porzellanschalen (Durchmesser mindestens 10 cm), 2 kleine Porzellantiegel bzw. weiße Tüpfelplatten, Spatel

#### Chemikalien:

Weißblech aus einer Konservendose mit Zinnbeschichtung, konz. Salzsäure (w = 25%), konz. Natriumcarbonat-Lösung (22g auf 100 mL Wasser, w = 18%), Spezialindikatorstäbchen pH 0 – 2,5 (Merck, Art. 9540), wässrige Thioacetamid-Lösung, c = 0,1 mol/L (0,075 g Thioacetamid in 10 mL dest. Wasser lösen; nicht verbrauchte Lösung kann 3 Tage bei Zimmertemperatur aufgehoben werden), konz. Ammoniaklösung (w = 25%)

Sicherheitsvorschriften: Konz. Salzsäure (ätzend, C), konz. Natriumcarbonat-Lösung (reizend, Xi), Thioacetamid (giftig, T), konz. Ammoniaklösung (ätzend, C; umweltgefährlich, N)

Versuchsdauer: 80 min

#### Versuchsdurchführung:

##### Teil 1: Reaktion des Metalls mit konz. Salzsäure

- 1 g Weißblech wird in möglichst kleine Stücke bzw. Späne geschnitten, die man in einem kleinen Becherglas sammelt.
- Nach Hinzufügen von 10 mL konz. Salzsäure wird das Becherglas auf dem Heizrührer unter Rühren erhitzt (Abdeckung durch ein Uhrglas, Abzug).
- Wenn die Gasentwicklung in Gang gekommen ist, schaltet man die Heizung ab. Das Becherglas wird von der Herdplatte genommen. Es werden 40 mL dest. Wasser hinzugefügt.

##### Teil 2: Einstellen des pH-Wertes

- Unter Umschwenken fügt man tropfenweise Sodalösung zu der sauren Lösung im kleinen Becherglas. Dabei wird der pH-Wert kontrolliert (Spezialindikatorstäbchen).

- Wenn die Gasentwicklung beim Eintropfen nachlässt und ein pH-Wert zwischen 0,5 und 1 erreicht ist, beendet man die Zugabe von Sodalösung.

#### Teil 3: Ausfällung von Zinn(II)-sulfid

- Das große Becherglas wird als Wasserbad vorbereitet (Siedesteinchen), in welchem das kleine Becherglas mit dem Reaktionsgemisch unter Rühren erhitzt wird (Heizrührer, Abzug).
- Dem Reaktionsgemisch werden 5 mL der wässrigen Thioacetamid-Lösung zugefügt (Abdeckung mit Uhrglas). Man lässt 15 min lang sieden. Danach wird das Becherglas aus dem Wasserbad entfernt.
- Nach dem Abkühlen wird der dunkelbraune Niederschlag abfiltriert. Das Filtrat wird in einem 100 mL-Becherglas gesammelt.
- Danach wird das Filtrierpapier mit dem Rückstand in eine passende Porzellanschale gelegt und für spätere Vergleiche aufbewahrt.

#### Teil 4: Ausfällung von Eisen(II)-sulfid

- Das Becherglas mit dem erhaltenen Filtrat wird auf die gleiche Weise unter Rühren im Wasserbad erhitzt.
- Mit einer Pasteurpipette gibt man tropfenweise konz. Ammoniaklösung zum Reaktionsgemisch, bis ein grünlich-schwarzer Niederschlag entsteht.
- Wenn sich die Niederschlagsbildung nicht mehr steigern lässt, wird abfiltriert.
- Danach wird das Filtrierpapier mit dem Rückstand in eine passende Porzellanschale gelegt und für spätere Vergleiche aufbewahrt. (Das Filtrat wird so lange unter dem Abzug aufbewahrt, bis kein Geruch nach Schwefelwasserstoff mehr wahrzunehmen ist.)

#### Teil 5: Vergleich der beiden Filterrückstände

- Vom zuletzt erhaltenen noch feuchten grünlich-schwarzen Niederschlag werden mit einem Spatel zwei Proben entnommen und in zwei kleine Porzellantiegel überführt.
- Zu einer der Proben werden einige Tropfen konz. Salzsäure gegeben (Abzug, Geruch).
- Zur anderen Probe werden zunächst einige Tropfen Wasserstoffperoxid-Lösung, dann ein bis zwei Tropfen Kaliumthiocyanat-Lösung gegeben (Farbänderungen).
- Nach ca. 15 min hebt man mit dem Spatel von dem noch feuchten zweiten Niederschlag eine kleine Probe ab und achtet ebenfalls auf mögliche Farbänderungen.

#### Beobachtung, Versuchsergebnisse:

##### Zu Teil 1:

Die Reaktion der Weißblechstücke mit Salzsäure verläuft unter lebhafter Gasentwicklung.

##### Zu Teil 2:

Bei Zugabe von Sodalösung findet ebenfalls ein leichtes Aufschäumen statt. Möglicherweise erreicht man den pH-Bereich zwischen 0,5 und 1 erst nach Zugabe einiger Milliliter Sodalösung.

##### Zu Teil 3:

Ein dunkelbrauner Niederschlag bildet sich im Säuren. Das Filtrat hat einen bläulichen Farbton.

##### Zu Teil 4:

Nach Zugabe von Ammoniak-Lösung zu dem erhaltenen Filtrat bildet sich ein grünlich-schwarzer Niederschlag. Er lässt sich zwar abfiltrieren, jedoch nicht quantitativ.

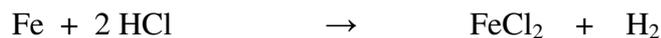
### Zu Teil 5:

Der grünlich-schwarze Niederschlag löst sich in konz. Salzsäure leicht auf, wobei ein Geruch nach faulen Eiern (Schwefelwasserstoff) zu bemerken ist. Gibt man zu dem grünlich-schwarzen Niederschlag Wasserstoffperoxid-Lösung, so findet eine Verfärbung nach Hellbraun statt. Diese Verfärbung findet man auch, wenn man Wasserstoffperoxid-Lösung an einer Stelle auf das Filterpapier mit dem grünlich-schwarzen Niederschlag tropft. Fügt man einige Tropfen Kaliumthiocyanat-Lösung hinzu, so beobachtet man eine intensive dunkelrote Verfärbung. Nach ungefähr einer Viertelstunde hat der noch feuchte zweite Niederschlag eine Farbänderung erfahren. Er sieht nun nicht mehr grünlich-schwarz, sondern hellbraun aus. Entnimmt man davon eine Probe, so erkennt man, dass sich die Verfärbung nach Hellbraun zunächst nur auf die äußere Schicht beschränkt. Darunter ist die grünlich-schwarze Farbe noch deutlich zu erkennen. Aber auch diese färbt sich nach einer weiteren Viertelstunde nach Hellbraun um.

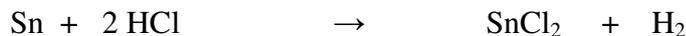
### Deutung:

### Zu Teil 1:

Eisen reagiert mit Salzsäure unter Bildung von Wasserstoff:

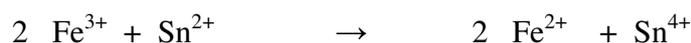


Auch bei der Reaktion von Zinn wird Wasserstoff frei:



Das Zinn(II)-Ion geht sehr leicht in das Sn(IV)-Ion über, indem es zwei Elektronen abgibt. Auch Eisen(II)-Ionen oxidieren sehr leicht zu Eisen(III)-Ionen. Bei Anwesenheit von Zinn(IV)-Ionen in saurer Lösung wird dies aber verhindert [126, S. 549, 355].

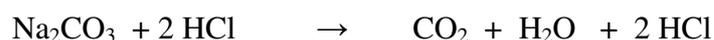
Folgende Redoxreaktion ist hier denkbar:



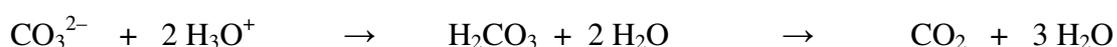
Gleichzeitig werden aber Zinn(IV)-Ionen in saurer Lösung durch metallisches Eisen zu Zinn(II)-Ionen reduziert [116, S. 343].

### Zu Teil 2:

Natriumcarbonat reagiert mit der Salzsäure:



Zur Verdeutlichung der Protolysereaktion lässt sich die Reaktion auch auf die beteiligten Ionen beschränken:



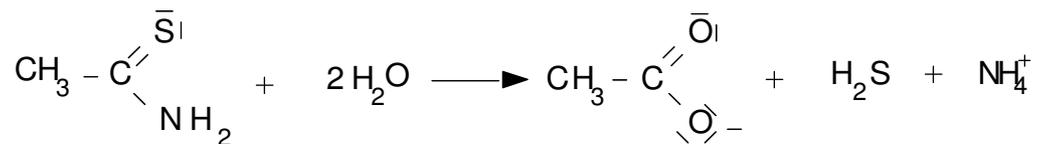
Hierdurch werden die Oxonium-Ionen abgefangen, worauf der pH-Wert etwas größer wird.

### Hinweis:

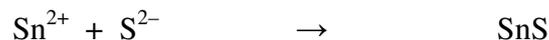
Es ist damit zu rechnen, dass sich in der Lösung die aus dem Dosenblech hervorgegangenen Ionen  $\text{Sn}^{2+}$  und  $\text{Fe}^{2+}$  befinden. Der Test auf  $\text{Fe}^{3+}$  Ionen mit Kaliumthiocyanat-Lösung verläuft hier negativ. Auf mögliche Zinn(IV)-Verbindungen und Polysulfide wird hier nicht näher eingegangen.

### Zu Teil 3:

Beim Erhitzen der Thioacetamid-Lösung wird Schwefelwasserstoff frei gesetzt. Durch Thioacetamid wird Schwefelwasserstoff „direkt am Ort der zu fällenden Ionen“ gebildet [127, S. 48]:



Die Freisetzung erfolgt bevorzugt in saurer Lösung, welche durch vorherige Reaktion des Dosenblechs mit konz. Salzsäure ohnehin gegeben ist [123, S. 276]. Aus dem Schwefelwasserstoff gehen Sulfid-Anionen hervor, welche mit den Zinn(II)-Ionen reagieren. Bei einem pH-Wert um 0,5 wird nur dunkelbraunes  $\text{SnS}$ , also Zinn(II)-sulfid ausgefällt [128, S. 797]:



### Zu Teil 4:

Werden Eisen(II)-Salzlösungen mit Ammoniumsulfid versetzt, so fällt Eisen(II)-sulfid als grünlich-schwarzer Niederschlag aus [128, S. 1140]. Entsprechend kann man den Vorgang als Ionengleichung formulieren:



### Zu Teil 5:

Der Niederschlag aus Eisen(II)-sulfid oxidiert in feuchtem Zustand an der Luft zu rotbraunem Eisen(III)-hydroxid und Schwefel [128, S. 1140]. Aus frisch hergestelltem Eisen(II)-sulfid kann durch Zugabe von Salzsäure Schwefelwasserstoff abgespalten werden. Die Entstehung von Schwefelwasserstoff lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben [85, S. 385]:



Mit Hilfe von Wasserstoffperoxid werden Eisen(II)-Ionen zu Eisen(III)-Ionen oxidiert. Letztere lassen sich mit Thiocyanat-Ionen durch Bildung eines intensiv rot gefärbten löslichen Komplexes nachweisen [116, S. 272]:



Es handelt sich um einen empfindlichen Nachweis.

### Anhang:

Ionennachweise können folgendermaßen geführt werden:

Fe<sup>2+</sup> Ionen: Wird eine Lösung von rotem Blutlaugensalz mit der Lösung eines Eisen(II)-salzes versetzt, so entsteht beim Molverhältnis 1:1 das kolloidal gelöste „lösliche Berlinerblau“ K[Fe<sup>II</sup>Fe<sup>III</sup>(CN)<sub>6</sub>]. Die Reaktion lässt sich folgendermaßen formulieren:

:



Fe<sup>3+</sup> Ionen: Hier kann die sehr empfindliche Thiocyanat - Reaktion durchgeführt werden.



Bei der Reaktion der schwach HCl-sauren Fe<sup>3+</sup> -Lösung mit wenig KSCN-Lösung entsteht eine tiefrot gefärbte Verbindung.

Sn<sup>2+</sup> Ionen: Außer durch Zinn(II)-Teststäbchen und durch die Leuchtprobe können diese Ionen auch nachgewiesen werden durch ihre Fähigkeit, schwerlösliche Molybdato-phosphate zu Molybdänblau zu reduzieren [116, S. 341-343].

Entsorgung: Filterpapier mit Rückständen in getrocknetem Zustand zum Feststoffabfall, übrig bleibendes Filtrat zu den Schwermetallsalz-Lösungen

Literatur: Hinweise zur qualitativen Analyse [115], [127], Hinweise zur Sulfidfällung [124], [128], [123], [116], Hinweise zu quantitativen Betrachtungen [85]

## 15.2 Makromoleküle und Kohlenstoffverbindungen

### V 2.1: Nachweis von Terephthalsäure durch alkalische Hydrolyse von PET

SV, S II

Geräte:

Schere, Waage, Rundkolben (250 mL, NS 29), Pulvertrichter, Messzylinder (50 mL), Magnetrührer, Rührstäbchen, Heizpilz, Stativmaterial, Rückflusskühler (Dimrothkühler), Becherglas (250 mL), Nutsche mit Guko-Einsatz, Büchnertrichter (Durchmesser 70 mm), 2 passende Rundfilter, Spatel, Porzellanschale (Durchmesser ca. 10 cm), Trockenschrank

Chemikalien:

PET-Schale oder PET-Flasche, Ethanol (leicht entzündlich, F), Natriumhydroxid (ätzend, C), konz. Salzsäure (w = 25 %; ätzend, C)

Versuchsdauer: 60 Minuten

Durchführung:

- 5 g einer PET-Schale werden in möglichst kleine Stücke geschnitten und in einen Rundkolben überführt. Man fügt man 30 mL Wasser, 15 mL Ethanol und 7 g Natriumhydroxid hinzu.
- Unter Rückfluss wird für 40 min unter Rühren erhitzt (Heizpilz auf mittlerer Stufe).
- Danach wird die noch heiße Lösung aus dem Rundkolben vorsichtig in ein Becherglas mit 50 mL heißem Wasser dekantiert. Nach dem Abkühlen fügt man in kleinen Portionen Salzsäure bis zur neutralen Reaktion zu.

- Der Niederschlag wird über eine Nutsche abgesaugt, mehrfach mit dest. Wasser gewaschen, in eine Porzellanschale überführt und im Trockenschrank bei 110 °C getrocknet.

Beobachtungen:

Beim Ansäuern entsteht ein weißer, feinkörniger Niederschlag, welcher in Wasser unlöslich ist.

Auswertung:

Durch alkalische Hydrolyse von PET entsteht wasserlösliches Natriumterephthalat. Daraus bildet sich durch Ansäuern Terephthalsäure. 1,2-Ethandiol bleibt in der wässrig-alkoholischen Lösung zurück.

Die nachfolgende Abb. 54 zeigt die beiden Reaktionsschritte, die zur Terephthalsäure führen.

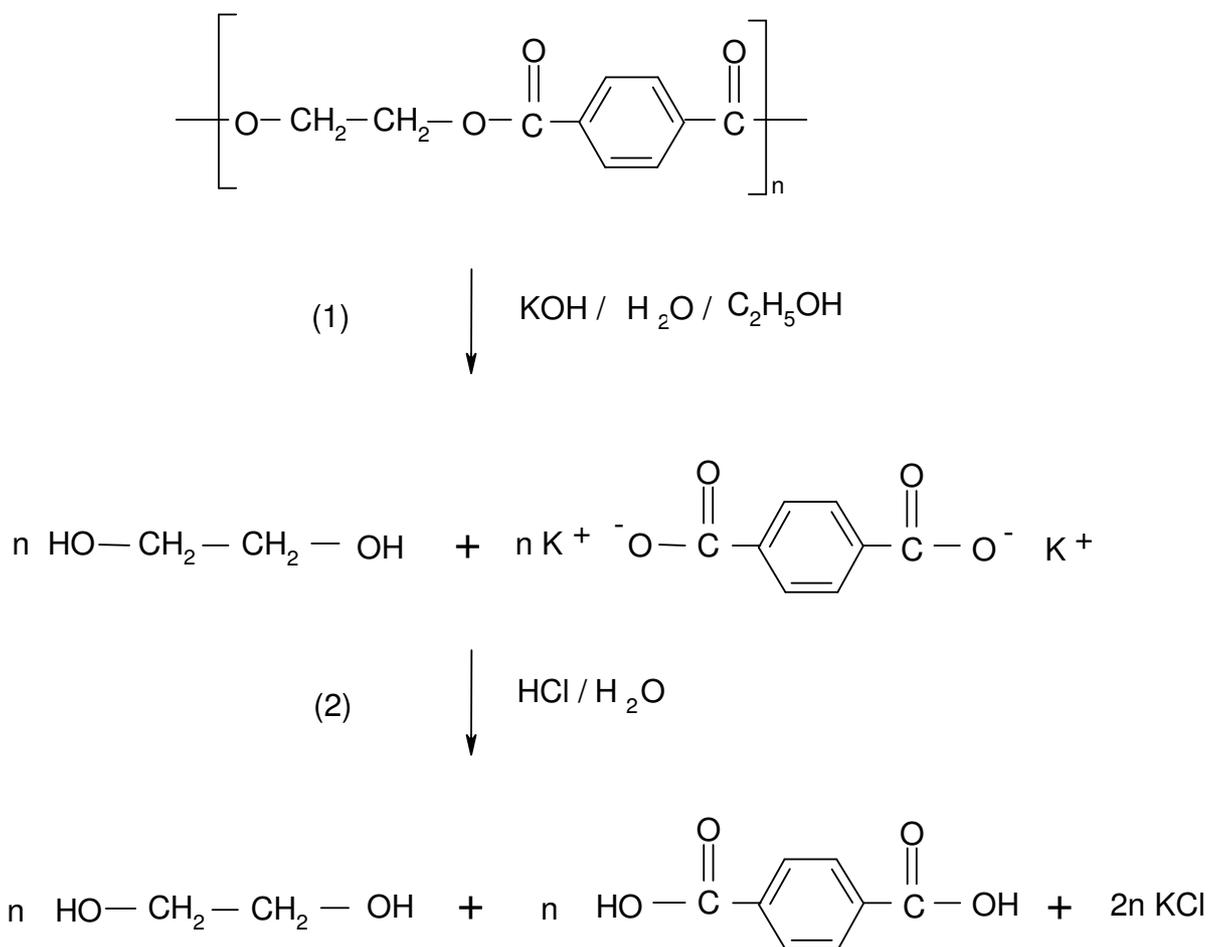


Abbildung 54: Alkalische Hydrolyse von Polyethylenterephthalsäure (1) und Ausfällen der Terephthalsäure durch Protonieren des Terephthalat-Anions (2)

Entsorgung: Das Filtrat kann zu den Säuren und Laugen gegeben werden oder – mit viel Wasser verdünnt - über den Ausguss entsorgt werden. Möglicherweise nicht umgesetztes PET wird abfiltriert und zum Hausmüll gegeben.

Literatur: [65], [129, S. 2-5], [130, S. 103]

## V 2.2: Untersuchung von Obstschalen (Nachweis von PET, PP und PS)

SV, S II

Geräte: Schere, 3 Bechergläser (250 mL), Kunststoffpinzette, spitze Pinzette, Brenner, Stativmaterial, Gabelklemme, Tiegelzange, Abzug, 3 Pyrolyse-Röhrchen, 3 Kristallisierschalen (Durchmesser 50 mm), Messzylinder (25 mL)

Chemikalien: Obstschalen aus PET, PP und PS, Universalindikatorpapier, Aceton (leicht entzündlich, F)

Versuchsdauer: 15 – 20 Minuten

Durchführung: Die Ergebnisse aus a) bis d) werden jeweils in eine Tabelle (Tab. 44) eingetragen.

- a) Aus jeder Kunststoff-Schale wird ein etwa 1 cm x 5 cm großer Streifen geschnitten (Proben A, B, C). Diese werden unter dem Abzug mit der Tiegelzange in die Brennerflamme gehalten. Das Brennverhalten wird beobachtet.
- b) Aus jeder Kunststoff-Schale wird ein sehr schmaler Streifen geschnitten (Proben A, B, C). Die Streifen werden jeweils in ein Glührohrchen geschoben, welches unter dem Abzug mit einer Stativklemme waagrecht befestigt wird. Man erhitzt mit dem Bunsenbrenner. Mit einem angefeuchteten Indikatorpapier überprüft man den pH-Wert der Pyrolyse-Dämpfe.
- c) Aus jeder Kunststoff-Schale wird ein etwa 2 cm x 2 cm großes Quadrat geschnitten (Proben A, B, C), welches frei von Fett sein muss. Die Kunststoff-Plättchen werden jeweils in eines der 3 bereit stehenden Bechergläser mit dest. Wasser gegeben, mit der Pinzette eingetaucht und kurz im Wasser geschwenkt. Man beobachtet nun sorgfältig, ob das Kunststoffstück schwimmt oder sinkt.
- d) Man stellt 3 Kristallisierschalen unter den Abzug und füllt jeweils 5 mL Aceton ein. Aus jeder Kunststoff-Schale wird ein etwa 2 cm x 6 cm großer Streifen geschnitten (Proben A, B, C). Diese werden jeweils in eine der 3 kleinen Kristallisierschalen gelegt. Das Verhalten der Kunststoffproben wird nach 5 min überprüft.

Tabelle 44: Identifizierung dreier verschiedener Verpackungskunststoffe nach vier Kriterien

Beobachtung:

<b>Untersuchte Eigenschaft</b>	<b>Probe A</b> (.....)	<b>Probe B</b> (.....)	<b>Probe C</b> (.....)
a) Brennverhalten (Geruch)			
b) pH-Wert der Pyrolysedämpfe			
c) Schwimmverhalten in Wasser (Dichte)			
d) Zustand nach 5 min in Aceton			

Beispiel einer Auswertung:

<b>Untersuchte Eigenschaft der Probe (mit Nummer nach Verpackungsverordnung)</b>	<b>PET (1)</b>	<b>PP (5)</b>	<b>PS (6)</b>
a) Brennverhalten (Geruch)	rollt sich zusammen, brennt sehr lebhaft, rußt, tropft (süßlich, aromatisch)	brennt ruhig, rußt nicht, Tropfen brennen (Paraffin)	brennt relativ lebhaft, rußt sehr stark, tropft (süßlich)
b) pH-Wert der Pyrolysedämpfe	pH 3	pH 5-6	pH 5-6
c) Schwimmverhalten in Wasser (Dichte)	sinkt $\rho = 1,38-1,41 \text{ g/cm}^3$	schwimmt $\rho = 0,85-0,92 \text{ g/cm}^3$	sinkt $\rho = 1,04-1,08 \text{ g/cm}^3$
d) Zustand nach 5 min in Aceton	stabil	stabil	instabil

Die drei untersuchten thermoplastischen Kunststoffe können anhand der unterschiedlichen Kriterien identifiziert werden.

Hinweise: Die hier eingesetzten Verpackungen findet man in allen Supermärkten. Meist ist außer der Abkürzung für den Kunststoff auch dessen Nummer angegeben.

Entsorgung: Acetonreste zu den „Organischen Lösungsmittelgemischen“, Kunststoffe zum Hausmüll

Literatur: [34, Anhang IV (zu § 14), S. 21], [95, S. 34, 38, 40, 108, 110]

Ergänzung: Übersicht über die Eigenschaften einiger Kunststoffe

Erläuterung der Abkürzungen:

- PE Polyethylen (HD: hohe Dichte, LD: niedrige Dichte)
- PP Polypropylen
- PS Polystyrol
- PET Polyethylenterephthalat
- PVC Polyvinylchlorid
- PA Polyamid (PA 6: Perlon, PA 66: Nylon)
- PC Polycarbonat

Die nachfolgend aufgeführten Tabellen (Tab. 45-50) können hilfreich beim Identifizieren von Kunststoffen sein.

Tabelle 45: Vorversuche zur Identifizierung der Kunststoffe [95], [131, S. 840 f.]

Kunststoff	Vorversuche		Verhalten in Wasser
PE	Kratzprobe mit dem Fingernagel bei PE-LD-Folien pos., Folie sehr dehnbar		schwimmt
PP	reißt als Folie leicht weiter		schwimmt
PS	niedrige Schlagzähigkeit, Spröbruch		sinkt
PET	Folien extrem reißfest		sinkt
PVC	Beilsteinprobe pos., grüne Flamme		sinkt
PA	Folien mit großer Stabilität, Färben mit Säurefarbstoffen	Farbreaktion mit p-Dimethylaminobenzaldehyd [95, S. 58 f.]	sinkt
PC			sinkt

Tabelle 46: Rohdichten einiger Kunststoffe (g/cm<sup>3</sup>) [95, S. 34]

PP	PE-LD	PE-HD	PS	PA 6	PA 66	PVC	PC	PET
0,85-0,92	0,89-0,95	0,94-0,98	1,04-1,08	1,12-1,15	1,13-1,16	1,19-1,41	1,20-1,22	1,38-1,41

Tabelle 47: Schmelzbereiche einiger Thermoplaste (°C) [95, S. 45]

PS	PVC	PE-LD	PE.HD	PP	PA 6	PC	PA 66	PET
70-115	75-90	ca. 110	ca. 135	160-170	215-225	220-230	250-260	250-260

Tabelle 48: Reaktion der Dämpfe von Kunststoffen beim Erhitzen einer Probe im Glühröhrchen [95, S. 38]

PVC, PET	PE, PP, PS, PC	PA
pH-Wert, ermittelt mit Universalindikatorpapier		
0,5 – 4,0	5,0 – 5,5	8,0 – 9,5

Tabelle 49: Brennverhalten (Flammenfärbung) [95, S. 40, 42 f.]

Kunststoff	Beobachtungen bei der Brennprobe
PE, PP	brennt ruhig (gelb, blauer Kern), rußt nicht, Tropfen brennen stets
PS	brennt relativ lebhaft (leuchtend), rußt sehr stark, tropft
PET	brennt sehr lebhaft (gelborange) rollt sich zusammen, rußt, tropft
PA	schmilzt und tropft in der Flamme (gelb-orange), erlischt nach Entfernen der Flamme
PVC	erlischt nach Entfernen der Flamme (grüner Saum)
PC	brennt nur in der Flamme sicher (leuchtend), rußt

Tabelle 50: Beständigkeit und Unbeständigkeit der Kunststoffe gegen ausgewählte Lösungsmittel bei 20°C (gewichtet nach [95, S. 108-113], [131, S. 850 f.], [19, S. 237])  
(+ = beständig, O = bedingt beständig, - = unbeständig / löslich)

Kunststoff	Toluol	Aceton	Säure	Lauge
PE	O	O	+	+
PP	O	O	+	+
PS	-	-	+	+
PVC	O	O	+	O
PA	+	+	-	O
PET	+	+	O	-
PC	O	O	O	-

Literatur: [19], [95], [131]

### V 2.3: Herstellung einer Folie aus einem Polystyrol-Joghurtbecher

LV, S II

Geräte:

Schere, Waage, Rundkolben (100 mL), Pulvertrichter, Heizpilz, Magnetrührer, Rührstäbchen, Messzylinder, Rückflusskühler, Trockenrohr mit Calciumchlorid, Stativmaterial, Abzug, Petrischale (Durchmesser 9 cm), Pinzette oder Magnetstab

Chemikalien:

Joghurtbecher mit der Bezeichnung „PS“ (Polystyrol), Toluol (leicht entzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn), Calciumchlorid, wasserfrei (reizend, Xi)

Versuchsdauer: 45 min

Durchführung:

- 0,3 g eines Joghurt-Bechers werden in kleine Stücke geschnitten und in einen Rundkolben überführt. Es werden 5 mL Toluol zugefügt (Abzug).
- Unter Rückfluss und unter Rühren wird bis zum Auftreten des Siedens erhitzt (Heizpilz auf mittlerer Stufe). Gleich darauf gießt man den noch heißen Inhalt des Rundkolbens vollständig in eine Petrischale.
- Man wartet, bis das Lösungsmittel verdampft ist (ca. 30 min). Danach füllt man die Petrischale 1 cm hoch mit dest. Wasser und fährt mit einem Spatel an der Innenkante des Glasgefäßes entlang.

Beobachtung:

Polystyrol löst sich in Toluol in der Siedehitze vollständig auf. Mit dem Spatel lässt sich vom Boden der Petrischale eine runde Kunststoff-Folie ablösen.

Deutung:

Toluol hat eine Siedetemperatur von 110,8 °C. Mit Polystyrol kann mit diesem Lösemittel ein werkstoffliches Recycling durchgeführt werden. Nach dem Verdampfen des Lösemittels liegt Polystyrol in einer neuen Form vor. Die weiße Farbe rührt von Titandioxid her, welches dem Kunststoff als Pigment beigemischt ist.

Entsorgung: Polystyrol-Reste zum Haushaltsabfall

Literatur: [95, S. 97]

**V 2.4.1: Nachweis von Polycarbonat**

LV, S II

Geräte:

Schere, Waage, Fiolax-Reagenzglas (Durchmesser: 16 mm; Länge: 160 mm), Reagenzglas-klammer, Petrischale (Durchmesser 9 cm), Rundfilter (Durchmesser 55 mm), kleiner Spatel, 2 Pasteurpipetten mit Pipettierhütchen, Brenner, Tiegelzange, Abzug

Chemikalien:

Makrolon<sup>®</sup>-Milchflasche bzw. Polycarbonat, Dimethylaminobenzaldehyd (reizend, Xi), Ethanol (leicht entzündlich, F), konz. Salzsäure (w = 25%; ätzend, C)

Versuchsdauer: 10 min

Durchführung:

- 0,2 g der Probe werden in ein Reagenzglas überführt.
- In die Mitte eines Rundfilters, welcher in einer Petrischale liegt, wird eine Spatelspitze Dimethylaminobenzaldehyd (ca. 0,2 g) gegeben (Abzug). Dann gibt man 10 Tropfen Ethanol auf die Mitte des Rundfilters.

- Das Reagenzglas mit der Kunststoffprobe wird in die Brennerflamme gehalten, und die Pyrolysegase werden auf den vorbereiteten Rundfilter geleitet.
- Mit einer Pasteurpipette fügt man 1 Tropfen konz. Salzsäure auf die Mitte des Rundfilters.

Beobachtung:

In der Mitte des Rundfilters zeigt sich ein blauer Fleck.

Deutung:

Bei der Kunststoffprobe handelt es sich um Polycarbonat.

Entsorgung: Man lässt den Rundfilter trocknen und gibt ihn zu den Filterrückständen.

Literatur: [95, S. 58 f.]

**V 2.4.2: Nachweis von Bisphenol A durch alkalische Hydrolyse von Polycarbonat**

SV, S II

Geräte:

Stabile Schere, Küchenmesser, Waage, Erlenmeyerkolben (100 mL, NS 29), Pulvertrichter, Pipette (5 mL), 3 Messzylinder (50 mL), Plastikstopfen (NS 29), Rührstäbchen, Heizrührer, Stativmaterial, Teflon-Manschette (NS 29), Liebig-Kühler als Rückflusskühler (NS 29), Becherglas (400 mL), Glasstab, Erlenmeyerkolben (300 mL), 4 Glastrichter, Filtrierpapier, Büchnertrichter für Rundfilter (90 mm), Filtrierflasche, Gummi-Manschette, Spatel, Porzellanschale (10 cm Durchmesser), Trockenschrank, Schmelzpunkt-Bestimmungsröhrchen, Schmelzpunkt-Bestimmungsgerät

Chemikalien:

Milchflasche aus Makrolon<sup>®</sup> (Polycarbonat), PC-Granulat als Alternative, Natriumhydroxid, Ethanol, konz. Salzsäure (w = 25 %), Impfkristalle von Bisphenol A

Sicherheitsvorschriften: Natriumhydroxid (ätzend, C), Ethanol (leicht entzündlich, F), konz. Salzsäure (ätzend, C), Impfkristalle aus Bisphenol A (reizend, Xi)

Versuchsdauer: 120 min, davon 60 min Sieden unter Rückfluss

Durchführung:

- Aus einer Milchflasche aus Makrolon<sup>®</sup> werden kleine Stücke herausgeschnitten. Davon werden (um eine vollständige Umsetzung mit den nachfolgend aufgeführten Stoffportionen zu erreichen) 2,54 g abgewogen und in einen 100 mL-Erlenmeyerkolben überführt. Es werden 4,0 g Natriumhydroxid und 3 mL dest. Wasser hinzugefügt, und der Kolben wird mit einem Plastikstopfen verschlossen.
- Man schwenkt den Erlenmeyerkolben 4 min lang vorsichtig, wobei die Lösung nicht an den Schliff gelangen sollte (zur Entlüftung den Stopfen gelegentlich anheben). Anschließend wird ein Rührstäbchen hinzu gegeben.
- Der Erlenmeyerkolben wird auf einem Heizrührer befestigt. Anschließend wird der Rückflusskühler aufgesetzt (Teflon-Manschette) und das Rührwerk eingeschaltet. Durch den Kühler fügt man 20 mL Ethanol hinzu.
- Das Reaktionsgemisch wird insgesamt 60 min unter Rückfluss erhitzt.
- Nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur fügt man 25 mL dest. Wasser hinzu und gießt das Reaktionsgemisch in ein Becherglas. Der Erlenmeyerkolben wird mit 25 mL dest. Wasser gespült. Auch dieser Inhalt wird in das Becherglas gegossen.

- Mit dest. Wasser wird auf 150 mL aufgefüllt. (Sollte die Lösung nicht klar sein, muss sie in einen weiteren Erlenmeyerkolben filtriert werden.)
- Man rührt mit einem Glasstab um und fügt vorsichtig 15 mL Salzsäure hinzu. (Sollte keine weiße Substanz ausfallen, gibt man einige Impfkristalle aus Bisphenol A hinzu.)
- Der entstandene Feststoff wird durch Saugfiltration gesammelt. Dabei wird zweimal mit 10 mL dest. Wasser nachgespült.
- Der Filtrerrückstand wird in eine Porzellanschale überführt. Diese stellt man für 30 min in den Trockenschrank bei 120 °C.
- Anschließend wird der Schmelzpunkt der getrockneten Substanz ermittelt.

Beobachtungen:

Nach der Zugabe von Salzsäure fallen weiße Kristalle aus, welche langsam zu Boden sinken. Der Schmelzpunkt liegt bei 155-156°C.

Auswertung:

Polycarbonat wird im alkalischen Medium hydrolysiert, wobei ein wasserlösliches Kaliumsalz entsteht. Durch Ansäuern bildet sich das wasserunlösliche Bisphenol A (Abb. 55).

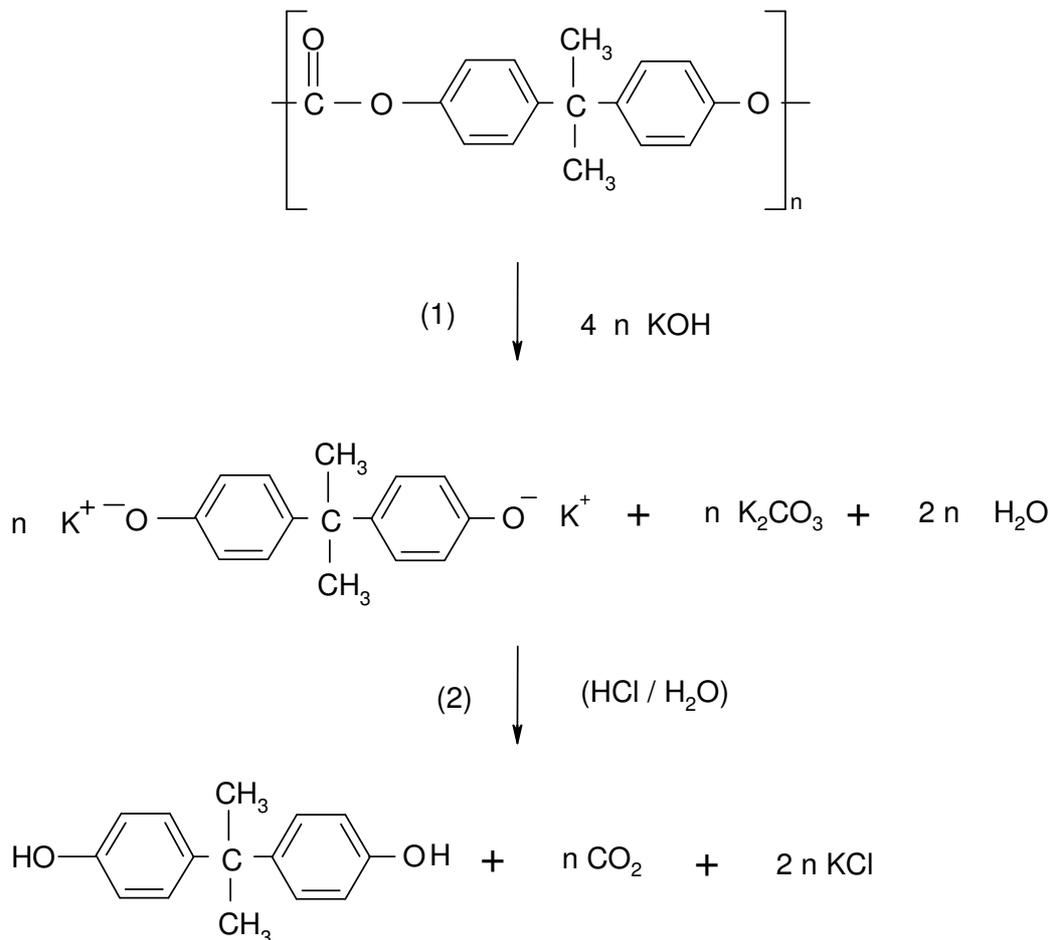


Abbildung 55: Alkalische Hydrolyse von Polycarbonat (1) und Ausfällung von Bisphenol A (2) aus dem wasserlöslichen Kaliumsalz durch Ansäuern

Hinweise: Als Alternative zu einer Milchflasche kann auch eine Kunststoff-Babyflasche verwendet werden.

Entsorgung: Flüssigkeiten zu Säuren und Laugen bzw. verdünnt in das Abwassernetz, Bisphenol A zu den Filtrerrückständen

Literatur: [11, S. 99 f.], [132, S. 440] [130, S. 106], [133]

### **V 2.5.1: Nachweis der Polyamidschicht einer Käsefolie (Polyamid/Polyethylen-Verbund) durch den Pyrolysetest**

SV, S II

Geräte:

Schere, spitze Pinzette, Glühröhrchen, Brenner, Stativmaterial, Gabelklemme

Chemikalien:

Käsefolie, z.B. für Mozzarella (PA/PE), Universalindikatorpapier

Versuchsdauer: 5 min

Durchführung:

- Aus der Käsefolie wird ein sehr schmaler Streifen geschnitten. Dieser wird in ein Glühröhrchen geschoben, welches unter dem Abzug mit einer Stativklemme waagrecht befestigt wird.
- Das Glühröhrchen wird mit dem Brenner erhitzt. Mit einem angefeuchteten Indikatorpapier überprüft man den pH-Wert der Pyrolysedämpfe.

Beobachtung:

Das Indikatorpapier färbt sich blau.

Auswertung:

Wenn die Verbundfolie eine Schicht aus Polyamid enthält, zersetzt sich dieses beim Erhitzen unter Bildung von Ammoniak.

Entsorgung: Hausmüll

Literatur:

[95, S. 38]

### **V 2.5.2: Selektive Anfärbung einer Polyamidschicht mit Lebensmittelfarbstoffen**

SV, S I

Versuchsmaterialien:

1 Becherglas (50 mL, schmal), 2 Bechergläser (250 mL), Spatel, Messzylinder (50 mL), Schere, Lineal, Heizrührer, Pipette (5 mL), Pipettierhilfe, Kunststoff-Pinzette (unempfindlich gegen Säure), Stoppuhr

### Chemikalien:

Käsefolie (Schlauchbeutelverpackung), möglichst mit dem Hinweis „PA/PE“ (möglicherweise vorher testen), Klebeband (z.B. Tesafilm<sup>®</sup>), roter Lebensmittelfarbstoff Cochenillerot A = E 124 (Bezugsquelle: Fa. BRAUNS HEITMANN, Warburg; Art.-Nr. 2110, Inhalt 2 x 4 g Lebensmittelfarbe), Lebensmittelfarbstoff Patentblau V, verd. Essigsäure (c = 2 mol/L; ätzend, C)

Dauer: 10 min

### Versuchsdurchführung:

#### Vorbereitung der Folie:

- Man schneidet ein 10 cm x 10 cm großes Stück aus.
- Dann werden beide Seiten mit einem Streifen Tesafilm<sup>®</sup> beklebt.

#### Vorbereitung der roten Farbstofflösung:

- In ein 50 mL-Becherglas werden ca. 40 mL Wasser gefüllt. Das Farbstoffpulver (ca. 4g Cochenillerot A) wird unter vorsichtigem Umschwenken hinzu gegeben. Man dekantiert von Ungelöstem vorsichtig in das 250 mL-Becherglas, während der Bodensatz im kleinen Becherglas zurück bleibt.
- Mit dest. Wasser wird bis zur 100 mL-Markierung aufgefüllt. Anschließend werden mit der Pipette 5 mL verdünnte Essigsäure hinzugefügt.

#### Vorbereitung der blauen Farbstofflösung:

- In das 250 mL-Becherglas werden 100 mL dest. Wasser gefüllt.
- Eine Spatelspitze des blauen Farbstoffs (Patentblau V) wird hinzugegeben.
- Anschließend fügt man 5 mL verdünnte Essigsäure hinzu.

#### Behandlung der Folie mit einer der Farbstofflösungen:

- Die gewünschte Farbstofflösung wird mit einem Heizrührer zum Sieden erhitzt. Währenddessen gibt man ein etwa 10 cm x 10 cm großes zusammengesrolltes Folienstück in die Farbstofflösung. Bei eingeschaltetem Rührwerk bleibt die Folie für ca. 5 min in der Lösung.
- Mit einer Kunststoff-Pinzette wird die Folie herausgenommen und mit Leitungswasser abgespült.
- Das Klebeband wird auf beiden Seiten entfernt.

### Beobachtung:

Der Teil der aufgerollten Folie, welcher in der heißen Farbstofflösung stand, ist intensiv rot bzw. blau gefärbt. Die Anfärbung wurde auch durch das Leitungswasser nicht entfernt. Auffällig ist, dass ausschließlich die äußere Seite der Folien gefärbt wurde. Dort zeigt sich, dass die vorher beklebte Stelle nicht gefärbt wurde.

### Deutung:

Da die Färbung nur an einer Seite stattfindet, lässt sich der Schluss ziehen, dass diese Lebensmittelfolie aus mindestens zwei unterschiedlichen Kunststoffschichten aufgebaut sein muss. Polyamid ist ein polarer Kunststoff, und die Färbung findet ausschließlich an der Polyamid-Schicht statt.

Die Struktur von Cochenillerot A ist nachfolgend dargestellt. Es befinden sich drei Sulfonsäuregruppen ( $-\text{SO}_3^- \text{Na}^+$ ) als Substituenten in diesem Molekül (Abb. 56).

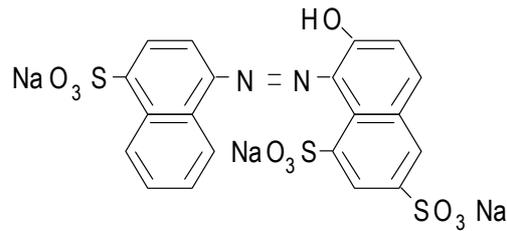


Abbildung 56: Cochenillerot A

**Hinweis:**

Die vorbereiteten Farbstofflösungen können zur Anfärbung weiterer Polyamid-haltiger Folien bereitgehalten werden.

**Entsorgung:** Abwassernetz, Hausmüll

**Literatur:** [25] (eigene Publikation)

**V 2.5.3: Nachweis der Polyamidschicht einer Käsefolie (Polyamid-Polyethylen-Verbund) durch Ablösen mit Salzsäure**

SV, S II

**Geräte:**

2 große Petrischalen, eine davon mit Deckel (Durchmesser mindestens 20 cm), Kunststoffpinzette, Stoppuhr

**Chemikalien:**

Mehrere entfettete Käsefolien (z. B. von Mozzarella-Käse, möglichst mit der Angabe PA/PE), konz. Salzsäure (w = 25 %; ätzend, C)

**Versuchsdauer:** 10 min

**Durchführung:**

- Eine große Petrischale wird etwa 1 cm hoch mit konzentrierter Salzsäure gefüllt. Dann wird ein passender Deckel aufgelegt. Daneben wird eine zweite große Petrischale gestellt, welche mit dest. Wasser gefüllt wird.
- Man schneidet ein rundes Stück aus der Käsefolie (Durchmesser beispielsweise ca. 15 cm), legt es mit Hilfe einer Kunststoff-Pinzette in die Salzsäure (PA-Außenschicht nach unten) und startet die Stoppuhr.
- Nach genau 30 s wird die Folie mit der Pinzette herausgenommen und für etwa 10 s in dest. Wasser gelegt (PA-Außenschicht nach oben).
- Dann breitet man die Folie auf einer glatten, festen Unterlage aus (PA-Außenschicht nach oben). Mit dem Daumnagel oder einem Kunststofflöffel lässt sich die äußere, mittlerweile aufgequollene Schicht abreiben. Die übriggebliebene Kunststoffschicht überprüft man auf ihre Dehnbarkeit.
- Die abgelösten Polyamid-Streifen werden für weitere Versuche mehrfach in dest. Wasser gewaschen, mit einem Zellstofftuch abgetupft und an der Luft getrocknet.

**Beobachtungen:**

- Die Polyamidschicht quillt und lässt sich mechanisch entfernen.

- Die übrig gebliebene Folie lässt sich sehr leicht dehnen.

Auswertung:

Polyamid wird hier aufgrund der kurzen Einwirkungszeit in Salzsäure teilweise gelöst bzw. hydrolysiert. In Wasser fallen die gelösten Anteile wieder aus. Die leichte Dehnbarkeit der verbliebenen PE-Folie zeigt, dass die Zugfestigkeit dieser Verbundfolie auf die Polyamid-Schicht zurückzuführen ist. Die unpolare PE-Folie selbst wird durch Salzsäure nicht angegriffen.

Hinweis:

- Die Verweilzeit der Folie in der konzentrierten Salzsäure muss genau eingehalten werden.
- Der Versuch kann nur dann außerhalb des Abzuges durchgeführt werden, wenn die Petrischale mit der Salzsäure durchgehend abgedeckt bleibt. Nur während des Einbringens und während des Herausnehmens der Folie wird der Deckel kurz angehoben. Bei Einhaltung dieser Vorsichtsmaßnahme stellen HCl-Dämpfe keine Belästigung dar.
- Mit den abgelösten Polyamid-Streifen kann man in einem weiteren Experiment den Schmelzbereich dieses Polyamids bestimmen.

Entsorgung: Reste der Salzsäure zu Säuren und Laugen

Literatur: [25] (eigene Publikation)

#### **V 2.5.4: Nachweis von Polyamid mit Dimethylaminobenzaldehyd**

LV, SII

Geräte:

Schere, Waage, Fiolax-Reagenzglas (Durchmesser: 16 mm; Länge: 160 mm), Reagenzglas-klammer, Petrischale (Durchmesser 9 cm), Rundfilter (Durchmesser 55 mm), kleiner Spatel, 2 Pasteurpipetten mit Pipettierhütchen, Brenner, Tiegelzange, Abzug

Chemikalien:

Lebensmittelfolie (z.B. Käsefolie) mit einer Polyamidschicht, Dimethylaminobenzaldehyd (reizend, Xi), Ethanol (leicht entzündlich, F), konz. Salzsäure (w = 25%; ätzend, C)

Dauer: 5 min

Durchführung:

- 0,5 g der Folie (ca. 5 cm x 5 cm) werden in ein Reagenzglas überführt. (Wenn man isoliertes Polyamid vorliegen hat, reichen 0,2 g.)
- In die Mitte eines Rundfilters (in einer Petrischale unter dem Abzug) gibt man eine Spatelspitze Dimethylaminobenzaldehyd (ca. 0,2 g). Mit einer Pasteurpipette werden ca. 10 Tropfen Ethanol auf die Mitte des Rundfilters gegeben.
- Das Reagenzglas wird in die Brennerflamme gehalten. Die entstehenden Pyrolysedämpfe werden ca. 5 Sekunden lang auf vorbereiteten Rundfilter geleitet.
- Mit einer Pasteurpipette fügt man 1 Tropfen konz. Salzsäure auf die Mitte des Rundfilters.

Beobachtung:

In der Mitte des Rundfilters zeigt sich ein bordeauxroter Fleck.

Auswertung:

Bei der Kunststoffprobe handelt es sich um Polyamid [95, S. 58 f.].

Entsorgung: Man lässt den Rundfilter trocknen und gibt ihn zu den Filtrerrückständen.

Literatur: [95, S. 58 f.]

**V 2.5.5: Trennung der beiden Bestandteile eines PA/PE-Folienverbundes einer Käsefolie mit Hilfe von Essigsäure**

LV, S II

Material:

Schere, Lineal, Petrischale mit Deckel (Durchmesser ca. 10 cm), 3 kurze Reagenzgläser (Länge ca. 5 cm), Pinzette aus Kunststoff (kein Polyamid), Latex-Handschuhe, Kristallisierschale (Durchmesser ca. 15 cm), Mikrometerschraube

Chemikalien:

PA/PE-Folie (Verbundverpackung für Käse), Konzentrierte Essigsäure (ätzend, C), Eiswürfel

Versuchsdauer: Vorbereitung 10 min, Wartezeit 2 Tage, abschließende Untersuchung 10 min

Durchführung:

- Aus der Käsefolie wird ein ca. 3 cm x 3 cm großes Stück ausgeschnitten. Es wird in eine kleine Petrischale gelegt, welche etwa 0,5 cm hoch mit konz. Essigsäure befüllt ist. (Um ein unkontrolliertes Einrollen der Folie zu verhindern, sollte man 2 bis 3 kurze Reagenzgläser auf die Folie legen.)
- Die Essigsäure lässt man für zwei Tage bei aufgelegtem Deckel einwirken.
- Danach wird das Folienstück mit der Pinzette herausgenommen und in eine kleine Kristallisierschale mit Eiswürfeln gelegt, wo es 10 bis 20 Sekunden verbleiben und gut von den Eiswürfeln bedeckt sein sollte.
- Die Folie wird mit beiden Händen kräftig zwischen Daumen und Zeigefinger gerieben (Latex-Handschuhe), bis sich die Schichten voneinander lösen. Dann wird sie unter fließendem Wasser abgewaschen und mit einem Zellstofftuch getrocknet.
- Anschließend kann man getrennte Untersuchungen der beiden Folienteile vornehmen, z.B. die Bestimmung der Foliendicke.

Beobachtung:

Durch das Reiben zwischen Daumen und Zeigefinger kommt es zur Trennung zweier Schichten, von denen die äußere fest und dünn erscheint, die innere hingegen weich und dehnbar. Mit einer Mikrometerschraube können nun die Schichtdicken ermittelt werden. Die Gesamtdicke beträgt 60  $\mu\text{m}$ . Die PA-Außenschicht weist eine Dicke von 13  $\mu\text{m}$  auf, während die PE-Innenschicht 47  $\mu\text{m}$  dick ist.

Deutung:

Die Essigsäure hat bei Raumtemperatur den Haftvermittler aufgelöst bzw. eine der Schichten angelöst. Gegen einen stärkeren Angriff der Essigsäure an der Polyamidschicht spricht, dass an ihr keine eindeutigen Spuren einer möglichen Beeinträchtigung zu erkennen sind.

Entsorgung: Essigsäurereste verdünnen und dem Abwassernetz zuführen

Literatur: [25] (eigene Publikation)

## **V 2.5.6: Identifizierung des aus einem PA/PE-Verbund stammenden Polyamid-Typs durch Ermittlung des Schmelzbereiches**

SV, S II

### Geräte:

Schere, spitze Pinzette, Lupe oder Binokular, Schmelztemperaturbestimmungsröhrchen, Gerät zur Schmelztemperatur-Bestimmung

### Chemikalien:

Mit Hilfe von Salzsäure aus dem PA/PE-Verbund abgelöste, mit Wasser abgespülte, luftgetrocknete PA-Späne (aus V 2.5.4 oder V 2.5.5)

Versuchsdauer: 10 min

### Durchführung:

- Von der getrockneten PA-Schicht werden sehr schmale Streifen abgeschnitten und mit der Pinzette in zwei oder drei der Röhrchen geschoben.
- Diese werden in das Schmelztemperaturbestimmungsgerät gestellt. Man erwärmt und beobachtet das Verhalten des Polyamids ab einer Temperatur von 190 °C.

### Beobachtungen:

Der Schmelzvorgang beginnt bei ca. 215 °C.

### Auswertung:

Es handelt sich um PA 6, dessen Schmelzbereich mit 215-225 °C angegeben wird. In der Literatur wird aber auch PA 66 als mögliches Polyamid aufgeführt. Der Schmelzbereich von PA 66 liegt jedoch höher, nämlich zwischen 250 °C und 260 °C. Da es sich hier um teilkristalline Substanzen mit unterschiedlichen Kettenstrukturen handelt, wird der Begriff „Schmelzbereich“ verwendet. Eine „Schmelztemperatur“ kann nur für die kristallinen Bereiche angegeben werden.

In der Verpackungsindustrie wird unter den Polyamiden am häufigsten PA 6 (Markenname „Perlon“) verwendet. Mit seiner hohen Zähigkeit, Tiefziehfähigkeit, Durchstoßfestigkeit, Transparenz und Abriebfestigkeit zeigt es eine vorteilhafte Eigenschaftskombination.

Entsorgung: Hausmüll

Literatur: [4, S. 79], [11, S. 97], [18, S. 10, 14, 128 f.], [24, S. 489], [95, S. 68]

## **V 2.5.7: Zerlegung von Polyamid (PA 6) durch saure Hydrolyse**

LV, S II

### Kurzbeschreibung:

Eine Polyamid-haltige Käsefolie wird unter Rückfluss mit konz. Salzsäure behandelt. Das dabei entstehende  $\epsilon$ -Aminocaprönsäurehydrochlorid erhält man nach dem Entzug von Chlorwasserstoff mit Hilfe von Kaliumhydroxid sowie nach dem Trocknen mit Sicapent<sup>®</sup> im Exsikkator. Der Nachweis von  $\epsilon$ -Aminocaprönsäurehydrochlorid erfolgt über die Ermittlung der Schmelztemperatur. Sie beträgt 123 °C.

Literatur: [92, S. 293] (Reaktionsmechanismus), [95, S. 68 f.] (Ansatz zur experimentellen Durchführung, Hinweise zum Produkt), [134, S. 3979] (Hinweise zu Salzsäure)

## **V 2.6: Tiefziehfolien und Deckfolien, Mehrschichtfolien mit EVOH**

LV, S II

### Hinweis:

Eine Kunststoffverpackung für Schnittkäse („Fol Epi“) wird untersucht. Es handelt sich um ein wieder verschließbares System aus Deckfolie und Tiefziehschale.

Versuchsdauer: Deckfolie 60 min, Tiefziehfolie 60 min

### Geräte:

Schere, Lineal, Mikrometerschraube, Becherglas (100 mL, schlanke Form), dazu passendes Uhrglas, Messzylinder (50 mL), Wasserbad, 2 Stahlpinzetten (davon eine spitz), Binokular bzw. Lupe, Rundkolben 100 mL, Glastrichter, Rückflusskühler, Heizpilz, Heizrührer, Rührstäbchen, Schmelztemperaturbestimmungsgerät, FTIR-Spektroskop, 2 Petrischalen (Durchmesser ca. 9 cm) mit Deckel, Tiegelszange, Glühröhrchen, Brenner, Stativmaterial, Abzug

### Chemikalien:

Verpackung von Schnittkäse („Fol Epi“): Deckfolie und Tiefziehschale, Toluol (leicht entzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn), Ethanol (leicht entzündlich, F), Aceton (leicht entzündlich, F; reizend, Xi), Universalindikatorpapier

### Teil 1:

#### Ermittlung der Bestandteile der Deckfolie

#### Versuchsdurchführung:

- Aus der Deckfolie wird ein etwa 2 cm x 4 cm großer Streifen ausgeschnitten und für ca. 5 min in 20 mL siedendes Ethanol in ein Becherglas überführt (Wasserbad, Abdeckung mit Uhrglas).
- Mit Hilfe zweier Pinzetten wird die innere Schicht der Folie abgelöst (Binokular). Danach ermittelt man Dicke, Schmelzbereich und mechanische Stabilität dieser Schicht. Die Trennung der beiden übrig gebliebenen Schichten gelingt nicht immer vollständig.
- Aus der Deckfolie wird nochmals ein etwa 2 cm x 4 cm großer Streifen ausgeschnitten und in einen Rundkolben mit 20 mL Toluol überführt. Es wird 10 min lang unter Rückfluss und Rühren erhitzt (Abzug).
- Danach wird das Folienstück in eine Petrischale überführt. (Bei Bedarf können die Toluol-Reste für einen weiteren Versuchsdurchgang verwendet werden.)
- Unter dem Abzug wird die behandelte Folie in Schichten aufgetrennt, die mit einem Zellstofftuch gereinigt werden. Danach lässt sich die Dicke der erhaltenen Folien messen.
- Anschließend wird der Schmelzbereich der Schichten ermittelt.

#### Versuchsergebnis:

- Die innere, am Lebensmittel liegende Schicht lässt sich mit Hilfe von siedendem Ethanol ablösen. Sie hat einen Schmelzbereich von 120°C und ist leicht dehnbar.
- Werden alle Schichten des Verbundes mit siedendem Toluol behandelt, löst sich die innere Schicht auf. Die äußere Schicht zerfällt in zwei Bestandteile, welche hinsichtlich Reißfestigkeit und Schmelzbereich gleiche bzw. ähnliche Eigenschaften zeigen.

### Auswertung:

Heißes Ethanol beeinflusst den Klebstoff zwischen der inneren Schicht und den beiden außen liegenden Schichten und ermöglicht deren leichte Trennung. PE-LD (innen) löst sich in Toluol, PET (außen) hingegen nicht. Toluol beeinflusst die klebende Schicht zwischen beiden PET-Folien und ermöglicht deren leichte Trennung. Die folgende Tab. 51 liefert eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Angaben zum vermuteten Material.

Tabelle 51: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Untersuchung der Deckfolie. Am Lebensmittel (innen) liegt die PE-LD-Folie (Polyethylen geringer Dichte). Während dieses Material selektiv in Toluol löslich ist, erweisen sich die mittlere und die äußere Schicht hingegen als unlöslich. Diese beiden Schichten bestehen aus PET (Polyethylenterephthalat).

<b>Deckfolie</b>				
<b>Schicht</b>	<b>außen</b>		<b>Mitte</b>	<b>innen</b>
Dicke	15 µm	Druckfarbe	40 µm	57 µm
Schmelzbereich	280°C		260°C	120°C
Löslichkeit in Toluol	nein		nein	ja
Dehnbarkeit	nein, sehr stabil		nein, sehr stabil	leicht dehnbar
Material	PET(C)		PET (C)	PE-LD

Die stets am Lebensmittel liegende PE-Schicht kann durch das selektive Lösemittel Toluol aufgelöst werden. Es könnte sich hier auch um ein Copolymerisat oder ein Polymer-Gemisch (Blend) mit EVA handeln (Auskunft Verpackungsmesse „Interpack“ 2005). Die übrig bleibenden, außen liegenden PET-Schichten dienen zur Stabilisierung und als Barriere.

### Teil 2:

#### Ermittlung der Bestandteile der Tiefziehfolie

#### Versuchsdurchführung:

- Aus der Tiefziehfolie wird ein etwa 2 cm x 4 cm großer Streifen ausgeschnitten und für ca. 5 min mit 20 mL siedendem Ethanol im Becherglas behandelt (Wasserbad, Abdeckung mit Uhrglasschale).
- Danach wird mit Hilfe von zwei Pinzetten die dicke äußere, milchig-trübe Schicht vom Rest der Folie abgetrennt (Binokular).
- Der innere Verbund der Tiefziehschale hingegen lässt sich nach der Behandlung mit Ethanol nicht mit der Pinzette aufspalten. Daher überführt man es zur weiteren Untersuchung in ca. 20 mL Toluol und erhitzt 10 min unter Rückfluss.
- Mit den erhaltenen Komponenten werden folgende Untersuchungen durchgeführt: Brennverhalten, Reaktion der Pyrolysedämpfe und Stabilität gegenüber Aceton.

#### Versuchsergebnisse:

Die milchig trübe Schicht (außen), welche noch Reste einer Klebstoffschicht trägt und eine Dicke von etwa 300 µm aufweist, brennt rußend bei süßlichem Geruch, wobei brennende Tropfen abfallen. In kaltem Aceton ist sie löslich. Der Schmelzbereich liegt bei ca. 190 °C. Vom übrig gebliebenen Verbund (innen) lösen sich in Toluol alle Bestandteile bis auf eine dünne Schicht auf. Eine Folie von 20 µm Dicke bleibt übrig. Sie ist weitgehend transparent und knistert beim Verbiegen deutlich. Ihr Schmelzbereich liegt bei 170 bis 180 °C.

### Auswertung:

Die folgende Tab. 52 liefert eine Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und gibt an, welche Schlüsse hinsichtlich des eingesetzten Materials gezogen werden müssen.

Tabelle 52: Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Untersuchung der Tiefziehschale. PE enthält möglicherweise EVA-Einschlüsse (Polymer-Blend). PS enthält möglicherweise Polybutylen-Einschlüsse (Polymer-Blend). Auch ein Copolymerisat ist denkbar.

Tiefziehschale				
Schicht	innen		Gummiartiger Klebstoff	außen
Dicke	80 µm			300 µm
	60 µm	20 µm		
Schmelzbereich	wurde nicht isoliert	175 - 180 °C		190 °C
Löslichkeit in Toluol	ja	nein		ja
Verformbarkeit	wurde nicht isoliert	gering		biegsam, knistert
Material	PE	EVOH		PS
Nachweise	Löslichkeit in Toluol	Pyrolysedämpfe neutral	Brennprobe, Löslichkeit in Aceton	

Die dicke äußere Schicht der Tiefziehschale besteht offenbar hauptsächlich aus PS, möglicherweise um ein Mischsystem aus Polymeren (Polymerblend, Kunststoff-Legierung). Eine der Komponenten könnte ein Polyolefin sein. So wird in der Literatur z.B. auf eine Form verwiesen, welche teilweise Butadien-Gummi enthält und opak aussieht: schlagfestes PS (HIPS = high impact polystyrene) [135, S. 113]. In einer anderen Literaturstelle ist von SB die Rede [136, S. 27]. Der Polyolefinanteil könnte für das Tropfen beim Verbrennen verantwortlich sein. Wenn der innere Verbund mit Toluol behandelt wird, löst sich PE auf. Die am Lebensmittel anliegende Schicht ist stets PE. Übrig bleibt dagegen das in Toluol unlösliche EVOH. Es dient als ausgezeichnete Barriere gegen Sauerstoffeintrag und Aromaverlust. Nachfolgend ist das aufgenommene FTIR-Spektrum der EVOH-Folie aufgeführt (Abb. 57). Darunter befindet sich ein Vergleichsspektrum (Abb. 58).

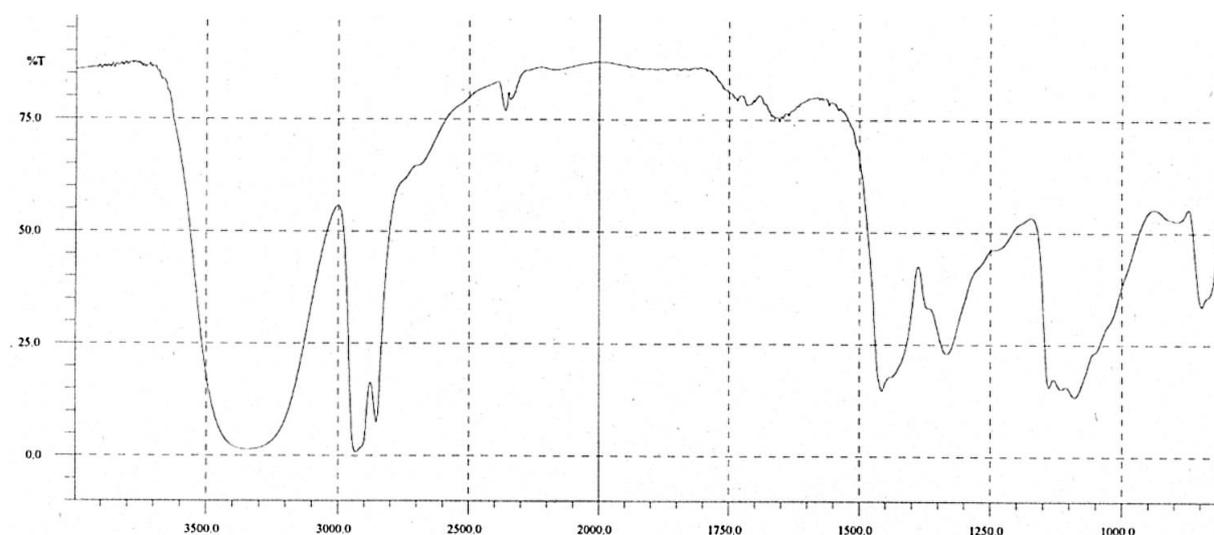


Abbildung 57: FTIR-Spektrum von EVOH. Die Probe stammt aus der Tiefziehschale von Schnittkäse. Die Einheit wird in  $\text{cm}^{-1}$  angegeben.

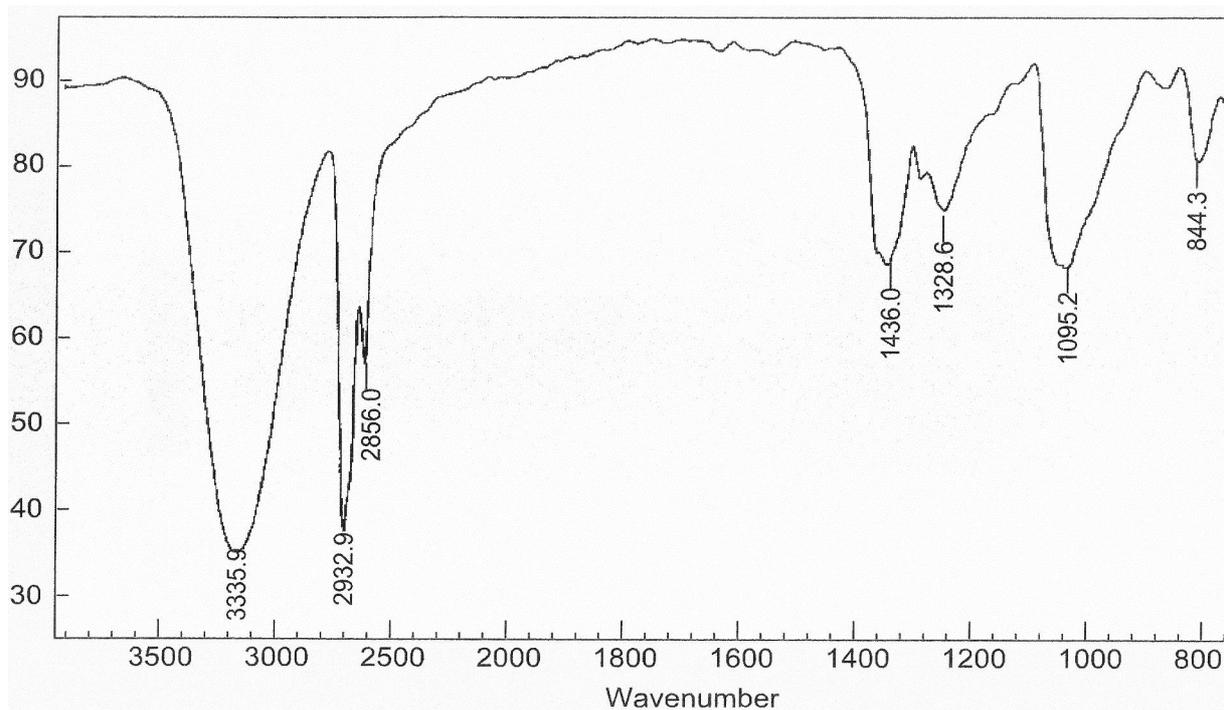


Abbildung 58: FTIR-Spektrum von EVOH. Die Einheit wird in  $\text{cm}^{-1}$  angegeben [137].

Der nachfolgend dargestellte Querschnitt durch die Tiefziehschale einer Käseverpackung zeigt, dass diese im Wesentlichen aus drei Schichten besteht (Abb. 59). Damit werden die oben aufgeführten Angaben zur Schichtung der verschiedenen Materialien bestätigt.

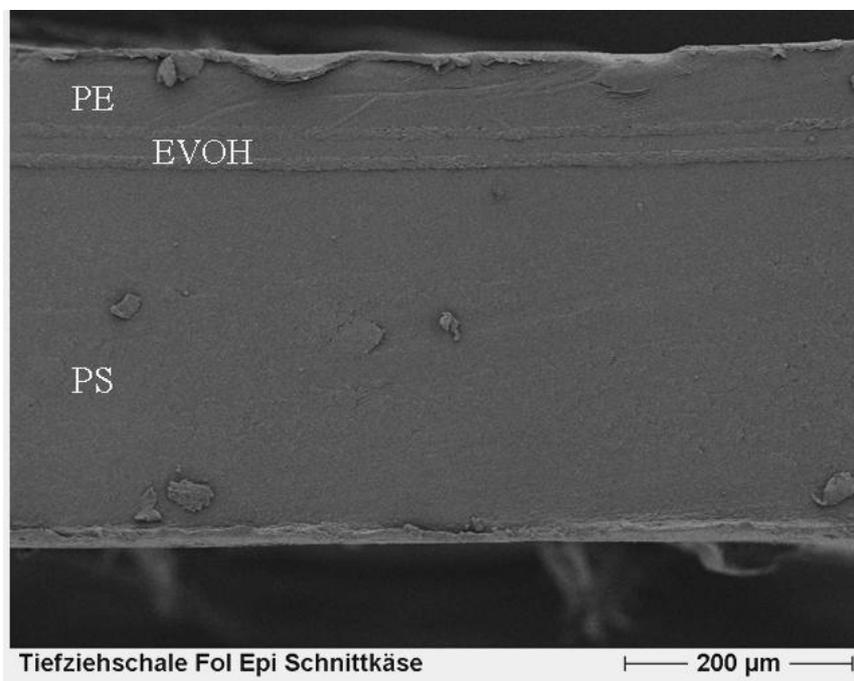


Abbildung 59: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts durch eine Tiefziehschale der Käsesorte „Fol Epi“. Zwischen der außen (hier unten) liegenden Polystyrol-Schicht und der innen liegenden Schicht aus Polyethylen (PE-LD, möglicherweise modifiziert) liegt die nur ca. 20  $\mu\text{m}$  dicke Schicht aus Ethylvinylalkohol (EVOH), offensichtlich beiderseits von Haftvermittlerschichten umgeben.

Entsorgung: Reste von Ethanol, Aceton und Toluol gibt man zu den flüssigen organischen halogenfreien Abfällen.

Literatur: [11, S. 95 f.], [135, S. 113], [136, S. 27], [137]

## **V 2.7: Zerlegung eines Getränkekartons**

LV, S II

Geräte: Schere, Waage, Pulvertrichter, Rundkolben mit Schliff (100 mL, NS 29), Messzylinder (50 mL), Rückflusskühler (NS 29), Trockenrohr mit Calciumchlorid, Magnetrührer, Heizpilz, Rührstäbchen, 2 Petrischalen (9 - 10 cm Durchmesser), 2 Pinzetten, Stativmaterial, Zellstofftuch (20 cm x 20 cm), Spatel

Chemikalien:

Getränkekarton für haltbare Milch, Toluol (leichtentzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn), Calciumchlorid entwässert (reizend, Xi)

Versuchsdauer: Durchführung 30 min, Wartezeit bis zum Erhalt der PE- Folie 60–90 min

Durchführung:

- Etwa 1 g des Getränkekartons wird in kleine Stücke geschnitten (je ca. 1 cm<sup>2</sup>). Diese werden in einen Rundkolben mit 10 mL Toluol überführt (Abzug).
- Es wird 10 min lang unter Rückfluss und Rühren zum Sieden erhitzt (Heizpilz, Trockenrohr). Danach wird der Inhalt des noch heißen Rundkolbens in eine Petrischale gegossen.
- Gleich darauf wird der Rundkolben noch zwei Mal mit je 5 mL Toluol ausgespült. Der Inhalt des Kolbens wird dabei ebenfalls in die Petrischale überführt.
- Mit einer Pinzette nimmt man zügig die festen Restbestandteile (Papier und Aluminiumfolie) aus der ersten Petrischale auf, lässt sie kurz abtropfen und überführt sie in eine zweite Petrischale.
- Dann werden mit Hilfe einer zusätzlichen zweiten Pinzette noch feste zusammenhängende Bestandteile voneinander getrennt und unter dem Abzug auf einem Zellstofftuch zum Trocknen ausgebreitet.
- Wenn das Toluol in der ersten Petrischale vollständig verdampft ist, wird diese ½ cm hoch mit dest. Wasser gefüllt. Mit einem Spatel lässt sich die entstandene Folie vom Glas trennen.
- Nach dem Trocknen kann die Masse der einzelnen Materialien bestimmt werden.
- Die Schichtdicke von Aluminium lässt sich mit der Mikrometerschraube ermitteln.

Beobachtungen: Während des Siedens unter Rückfluss zerfällt die Verbundverpackung in ihre Bestandteile (Papier, Aluminium). Wenn das Toluol in der Petrischale verdampft ist, bleibt eine dünne Kunststoff-Folie zurück, die gut mit dest. Wasser vom Glas abgelöst werden kann.

Auswertung:

Toluol dient als selektives Lösungsmittel für Polyethylen. Von der abdekantierten Lösung bleibt nach dem Verdampfen des Lösungsmittels Polyethylen zurück. Während mit dem Lebensmittel nur die PE-Schicht in Kontakt treten soll, dient die Aluminiumschicht besonders als Sperre für Licht, Fremdaromen und Sauerstoff.

Hinweis:

Durch Wiegen der getrockneten voneinander getrennten Bestandteile kann die Zusammensetzung auch näherungsweise quantitativ bestimmt werden.

Entsorgung: Die anfallenden 20 mL Toluol lässt man unter dem Abzug verdampfen.

Literatur: [62]

### **V 2.7.1: Nachweis des Holzstoffes Lignin in Papier und Karton**

SV, S II

Geräte:

Schere, Petrischale, Pasteur-Pipette

Chemikalien:

Papier, Karton, Holz, Phloroglucin-Salzsäure-Reagenz (0,5 g Phloroglucin in 10 mL Ethanol lösen und 10 mL konz. Salzsäure hinzufügen)

Sicherheitsvorschriften:

Phloroglucin (reizend, Xi), Ethanol (leicht entzündlich, F), konz. Salzsäure (ätzend, C)

Versuchsdauer: 5 min

Durchführung:

Man schneidet ein Stück des Lignin-haltigen Materials aus, legt es in eine Petrischale und gibt einige Tropfen Phloroglucin-Salzsäure-Reagenz hinzu.

Beobachtung:

Bei Anwesenheit von Lignin tritt nach etwa einer Minute eine rotviolette Färbung auf.

Auswertung:

Lignin reagiert als Polymer aus aromatischen Alkoholen mit den funktionellen Gruppen des Phloroglucins, wobei eine Rotfärbung auftritt.

Entsorgung: Organische Abfälle mit Halogenen

Literatur: [138, S. 2509 f.]

### **V 2.8.1: Hinweis auf Cellulose-Bestandteile in Verpackungen durch den Molisch-Test auf Kohlenhydrate**

SV, S II

Geräte:

Schere, Porzellanschale (Durchmesser 10 cm), Glasstab, Pasteurpipette, kleiner Kunststofflöffel aus dem Haushalt

Chemikalien:

Einmachfolie, konzentrierte Schwefelsäure, Molisch-Reagenz (1,5 g 1-Naphthol in 10 mL Ethanol gelöst, w(1-Naphthol) = 19 %), Katzenstreu (kalkhaltig)

Sicherheitsvorschriften:

Konzentrierte Schwefelsäure (ätzend, C), 1-Naphthol (gesundheitsschädlich, Xn), Ethanol (leicht entzündlich, F)

Versuchsdauer: 10 Minuten

Durchführung:

- Es werden 0,2 g Cellophan-Folie (ca. 50 cm<sup>2</sup>) in ca. 1 cm<sup>2</sup> große Stücke geschnitten. Diese werden in eine Porzellanschale gegeben.
- Man fügt 15 Tropfen konz. Schwefelsäure hinzu und rührt mit einem Glasstab 5 min lang vorsichtig um.
- Danach wird 1 Tropfen Naphthol-Lösung zugefügt.

Beobachtung:

Beim Umrühren entsteht eine gelbliche sirupartige Suspension. Beim Zusatz von Naphthol-Lösung tritt eine Rotfärbung auf.

Auswertung:

Die Färbung entsteht durch Bildung eines Triphenylmethanfarbstoffes. Zunächst jedoch entstehen durch die Einwirkung der Schwefelsäure Monosaccharide (Hexosen), die dann zum Teil in 5-Hydroxymethylfurfural übergehen, welches in Abb. 60 dargestellt ist.

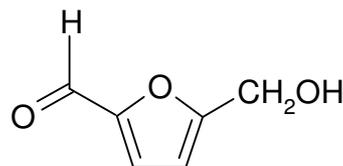
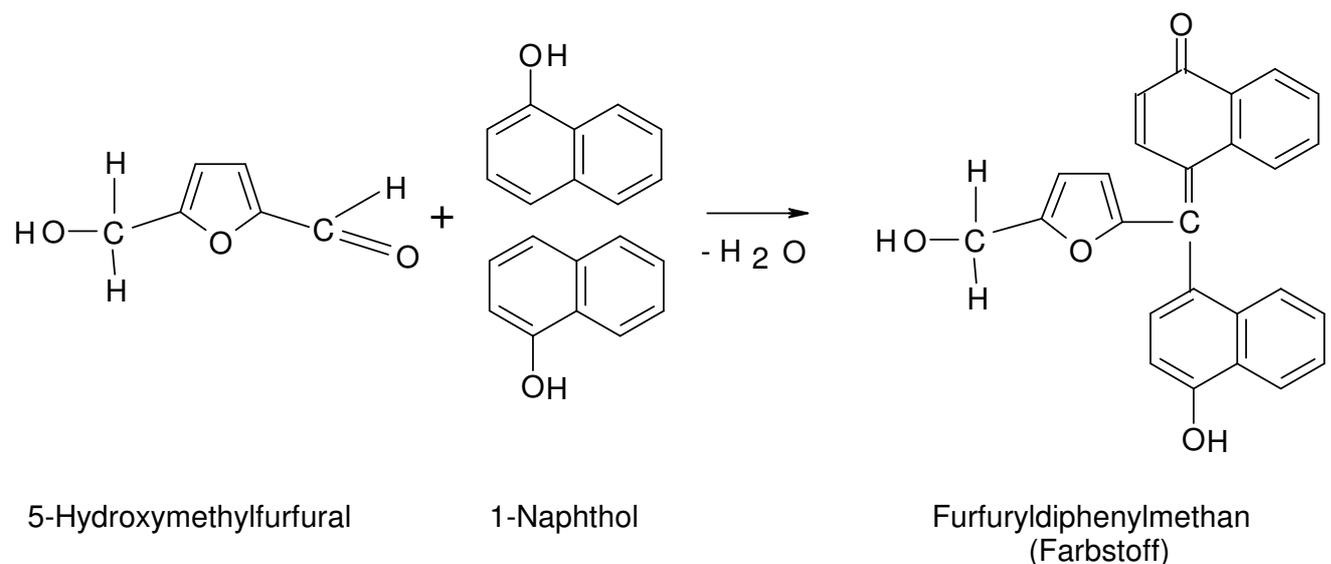


Abbildung 60: Hydroxymethylfurfural

Die entstehende Aldehyde reagiert mit zwei 1-Naphthol-Molekülen zu einem violetten Farbstoff, der von der Grundstruktur her einem Triphenylmethanfarbstoff entspricht (Abb. 61).



5-Hydroxymethylfurfural

1-Naphthol

Furfuryldiphenylmethan  
(Farbstoff)

Abbildung 61: Entstehung des violetten Farbstoffs

Hinweise: Als Ersatz für Naphthol kann auch eine Thymol-Lösung in Ethanol verwendet werden ( $w = 15 \%$ ). Dann entsteht ein orange-roter Farbstoff.

Entsorgung: Man gibt zwei Löffel Katzenstreu in die Porzellanschale und fügt 5 mL Wasser hinzu. Nach dem Ende des leichten Aufschäumens wird der Inhalt der Porzellanschale mit Hilfe eines Löffels in den Hausmüll gegeben.

Literatur: [139], [140], [141], [142], [143, S. 300]

## **V 2.8.2: Zersetzung von regenerierter Cellulose durch saure Hydrolyse**

LV, S II

### Geräte:

Schere, Waage, Becherglas (100 mL), 2 Bechergläser (250 mL), Pipette (5 mL), Messzylinder (25 mL), Pulvertrichter, Siedesteinchen, Glasstab, Stativmaterial, Klemme, Heizrührer, Rührstäbchen, Uhrglasschale (Durchmesser 10 cm), Haushaltshandschuhe, Spatel, kleiner Glastrichter (Durchmesser 10 cm) mit Faltenfilter, Reagenzglas, Reagenzglasständer

### Chemikalien:

2 präparierte Mini-Babybel®-Folien (4 Hälften, lackfrei und entfärbt, Versuchsanleitung aus V 2.12.2) oder –als Alternative- Einmachfolie, konz. Schwefelsäure ( $w = 98 \%$ ; ätzend, C), Natriumcarbonat (reizend, Xi), Universalindikatorpapier, Fehling-Lösung I und II (ätzend, C).

### Hinweis zur Herstellung der Fehlingschen Lösungen I und II:

Fehling I: 34,65 g Kupfersulfat in 500 mL dest. Wasser lösen

Fehling II: 173 g Kaliumnatriumtartrat und 60 g Natriumhydroxid in 500 mL dest. Wasser lösen.

Getrennt aufbewahren, erst unmittelbar vor Gebrauch zu gleichen Teilen mischen.

Versuchsdauer: 45 min

Hinweis: Vorsicht beim Zufügen des Wassers zur Schwefelsäure!

### Durchführung:

- Die vier vorbereiteten Folienhälften (nach V 2.12.2 mit Toluol behandelt) werden in Stücke von jeweils etwa  $1 \text{ cm}^2$  geschnitten (Gesamtmasse ca. 0,5 g) und in ein 100 mL-Becherglas gegeben, welches 3 mL konz. Schwefelsäure enthält. Mit einem Glasstab rührt man 5 min lang vorsichtig und stetig um.
- Dann werden in kleinen Portionen vorsichtig 15 mL dest. Wasser zu der entstandenen sirupartigen Masse hinzugefügt. Das Becherglas mit dem Hydrolyseansatz wird in ein siedendes Wasserbad gestellt. Dort verbleibt es unter Rühren für mindestens 30 min (Becherglas mit Uhrglasschale abdecken).
- Anschließend nimmt man das kleine Becherglas mit Hilfe von Haushaltshandschuhen aus dem Wasserbad. Wenn die Suspension abgekühlt ist, wird sie in das größere Becherglas überführt.
- Es werden einige Spatelspitzen Natriumcarbonat hinzugegeben, bis die Gasbildung schwach wird und der pH-Wert  $>1$  ist (Indikatorpapier). Durch Rühren wird dieser Vorgang beschleunigt. Danach wird abfiltriert und das Filtrat im Reagenzglas gesammelt.
- Das Reagenzglas wird nach Hinzufügen der Fehling-Lösungen in das heiße Wasserbad gestellt. Man achtet auf eine mögliche Verfärbung.

### Beobachtung:

Die Fehlingsche Probe verläuft positiv. Nach Zugabe von Fehling-Reagenz zeigt sich eine Umfärbung über grün nach gelb, bis sich schließlich ein dunkelroter Feststoff bildet, welcher sich im unteren Teil des Reagenzglases absetzt.

### Auswertung:

Cellophan besteht aus regenerierter Cellulose. Durch die saure Hydrolyse bilden sich Oligosaccharide bzw. teilweise einzelne Glucosebausteine. Wenn diese in die offenkettige Form übergehen, liegt jeweils die Aldehydgruppe als freie funktionelle Gruppe vor. Durch deren reduzierende Wirkung kommt es bei der anschließenden Fehlingschen Probe zur Bildung von rotem Kupfer(I)-oxid.

Mit Hilfe konzentrierter Schwefelsäure werden die glykosidischen Bindungen der regenerierten Cellulose angegriffen. Die Spaltprodukte werden mit der Fehlingschen Probe nachgewiesen

Entsorgung: Kupferverbindungen abfiltrieren (zu Filtrerrückständen und Schwermetallsalzlösungen)

Literatur: [3, S. 84], [4, S. 74 f.], [95, S. 38, 40, 45], [144, S. 160 f.], [145, S. 142], [146, S. 17, 124]

## **V 2.9: Nachweis von Epoxidharz als Innenbeschichtung einer Getränkedose**

LV, S II

### Material:

Schere, Lineal, Kristallisierschale (Durchmesser 95 mm), Uhrglas (Durchmesser 100 mm), Kunststoff-Pinzette oder Teesieb aus Kunststoff, Waage, Reagenzglas, 2 Pipetten (10 mL und 1 mL), Pasteurpipette

### Chemikalien:

Innenbeschichtung einer Getränkedose, Salzsäure (w = 18 %), konz. Schwefelsäure (w = 96%), konz. Salpetersäure (w = 65%), Natronlauge (w = 5%)

Sicherheitsvorschriften: Salzsäure (ätzend, C), konz. Schwefelsäure (ätzend, C), konz. Salpetersäure (ätzend, C), Natronlauge (ätzend, C)

Zeitaufwand: Vorbereitung 3 Tage, Nachweis 10 min

### Versuchsdurchführung:

#### Vorbereitung:

- Um die Kunststoffschicht vom Blech zu lösen, werden aus einer Weißblechdose 2 Streifen ausgeschnitten, welche jeweils die Fläche von 2 cm x 5 cm haben. Diese werden in eine Kristallisierschale gelegt, welche ca. 2 cm hoch mit 18%iger Salzsäure befüllt ist (Abzug, Abdeckung mit Uhrglasschale).
- Wenn das Metall mit der Salzsäure reagiert hat, nimmt man mit einer Kunststoffpinzette oder einem Teesieb die verbliebenen Kunststoff-Folien heraus, spült sie mit dest. Wasser ab und trocknet sie vorsichtig mit einem Zellstofftuch.

### Nachweis:

- Etwa 0,1 g der Innenbeschichtung aus einer Getränkedose werden in ein Reagenzglas überführt. Es werden 10 mL konz. Schwefelsäure hinzugefügt.
- Danach gibt man 1 mL konz. Salpetersäure hinzu und wartet 5 min.
- Anschließend wird die Lösung vorsichtig mit 5%iger wässriger Natronlauge überschichtet. Man achtet darauf, ob an der Grenzfläche eine kirschrote Färbung auftritt.

### Versuchsergebnis:

Es tritt eine kirschrote Färbung auf.

### Deutung:

Es handelt sich um ein Epoxidharz auf der Basis von Bisphenol A [95, S. 72]. Die Rotfärbung kann nur auf Veränderungen in den Aromaten zurückzuführen sein. Eine Nitrierung von Benzolringen wird auch für Epoxidharze formuliert [147, S. 91 f.].

Als Epoxidharze bezeichnet man oligomere Verbindungen mit mehr als einer Epoxidgruppe pro Molekül. Die technische Herstellung der Epoxidharze erfolgt überwiegend durch Umsetzung von Bisphenol A mit Epichlorhydrin zu Produkten nachstehender Struktur (Abb. 62, 63):

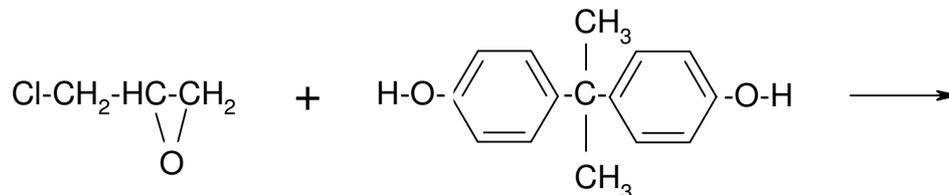


Abbildung 62: Links ist das „Epoxid“ Epichlorhydrin dargestellt, rechts das „Bisphenol A“ [82, S. 238].

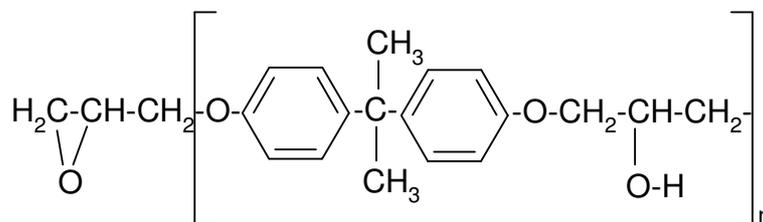


Abbildung 63: Das Epoxidharz ist ein Polyether mit  $n = 5$  bis  $12$ . Am Sauerstoffatom links befindet sich die Vernetzungsstelle für weitere Reaktionen [82, S. 238].

Die Vernetzung der Makromoleküle führt zur Härtung der Epoxidharze. Diese kann durch Reaktion mit Polyaminen oder Polycarbonsäuren erfolgen [82, S. 238]. Die gehärteten Produkte sind spannungsfrei, reißfest, haben hohe Schlagzähigkeit und Abriebfestigkeit sowie gute Beständigkeit gegen Wasser, Säuren, Laugen, Öle und organische Lösungsmittel. Epoxidharze sind physiologisch weitgehend unbedenklich [148, S. 1196]. Die nachfolgende Abb. 64 zeigt die Epoxidharz-Schicht einer Getränkedose.

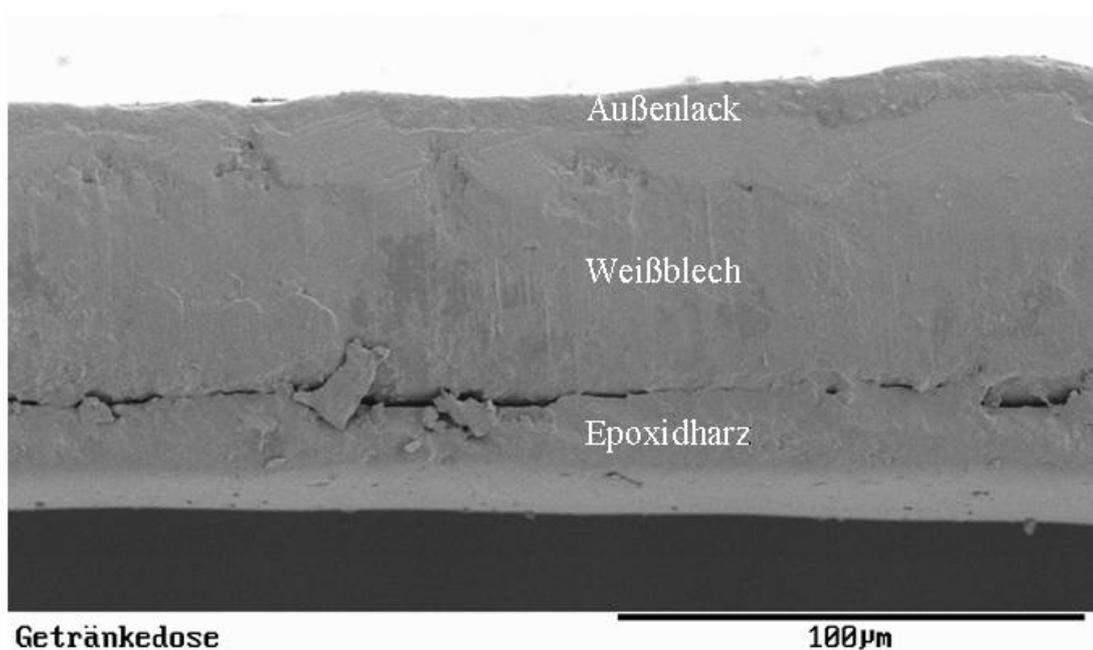


Abbildung 64: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Querschnitts durch eine Weißblech-Getränkedose. Die Innenbeschichtung aus Epoxydharz erscheint im Bild deutlich als untere Schicht. Darüber liegt die 50 bis 60  $\mu\text{m}$  dicke Metallschicht. Auf dieser Metallschicht ist der Außenlack zu erkennen.

Hinweis:

Mit 18%iger Salzsäure gelingt es, in einem geeigneten Standzylinder den gesamten Metallanteil einer Getränkedose vollständig aufzulösen, so dass nur noch die Epoxydharz-Schicht übrig bleibt. Auch dieses Experiment zeigt die enorme Robustheit der Innenbeschichtung (Abb. 65).



Abbildung 65: Die Innenschicht aus Epoxydharz bleibt vollständig erhalten, wenn der metallische Anteil einer Coca-Cola-Getränkedose mit 18%iger Salzsäure aufgelöst wird. Der Außenlack hingegen hält dem Auflösungsprozess, welcher unter Gasentwicklung verläuft nicht stand.

Entsorgung: Säuren und Laugen

Literatur: [82], [95], [148]

**V 2.10.1: Stoffliche Identifizierung des Kunststoff-Stülpedeckels eines Joghurtbechers**

SV, S II

Teil 1: Untersuchung des Brennverhaltens

Materialien: Schere, Tiegelzange, Brenner

Chemikalien: Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers

Versuchsdauer: 5 min

Versuchsdurchführung:

Unter dem Abzug wird mit einer Tiegelzange ein ausgeschnittener Streifen des Deckels in die Flamme des Brenners gehalten.

Beobachtung: Die Probe erlischt außerhalb der Flamme sofort. Ein stechender Geruch ist wahrnehmbar.

Deutung: Die Probe ist nicht oder kaum brennbar. Ein Gas wird frei gesetzt.

Entsorgung: Kunststoffreste in den Hausmüll

Teil 2: Untersuchung der Pyrolysegase

Materialien: Schere, Glühröhrchen, Stativmaterial, Brenner

Chemikalien: Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers, Universalindikator-Papier

Versuchsdauer: 5 min

Versuchsdurchführung:

Eine Probe des Kunststoffdeckels wird in ein Glühröhrchen überführt. Dieses wird in die Brennerflamme gehalten. Die entstehenden Pyrolysegase lässt man auf ein angefeuchtetes Indikatorpapier strömen.

Beobachtung: Es ist sofort eine deutliche Rotfärbung sichtbar.

Deutung: Die Pyrolysegase reagieren sauer.

Teil 3: Untersuchung auf Halogene

Materialien: Schere, Tiegelzange, Brenner

Chemikalien: Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers, Kupferblech (z.B. 3 cm x 3 cm)

Versuchsdauer: 5 min

Versuchsdurchführung:

Auf ein Kupferblech legt man ein Stück der Kunststoffprobe. Mit einer Tiegelzange wird das Kupferblech unter dem Abzug in die Brennerflamme gehalten.

Beobachtung: Die Flamme ist sofort deutlich grün gefärbt. Die „Beilstein-Probe“ verläuft positiv.

Deutung: In der Kunststoff-Probe sind Halogenatome enthalten.

Entsorgung: Kupferreste entweder zur erneuten Verwendung abschmirgeln und reinigen oder zu den Feststoffabfällen geben

#### Teil 4: Untersuchung der Dichte

Materialien: Schere, 3 nummerierte Bechergläser (100 mL), Pinzette, Trichter

Chemikalien: Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers, Natriumchlorid-Lösung ( $\rho=1,195$  g/cm, Magnesiumchlorid-Lösung ( $\rho=1,33$  g/cm<sup>3</sup>; reizend, Xi)

Versuchsdauer: 5 min

#### Versuchsdurchführung:

Es werden drei Bechergläser bereitgestellt. In Becherglas 1 füllt man dest. Wasser ( $\rho=1,0$  g/cm<sup>3</sup>)  $\rho$ , in Becherglas 2 eine Magnesiumchlorid-Lösung ( $\rho=1,33$  g/cm<sup>3</sup>) und in Becherglas 3 eine Natriumchlorid-Lösung ( $\rho=1,195$  g/cm<sup>3</sup>). Mit einer Pinzette wird in jede dieser drei Flüssigkeiten ein ausgeschnittenes Stück des Kunststoffdeckels überführt. Dabei sollte man die Probe vorsichtig schwenken, um mögliche Luftblasen zu lösen.

Beobachtung: Die Kunststoffprobe sinkt in Wasser und in Natriumchlorid-Lösung, schwimmt aber in der Magnesiumchlorid-Lösung.

Deutung: Die Dichte der untersuchten Kunststoff-Probe liegt zwischen 1,195 und 1,33 g/cm<sup>3</sup>.

Entsorgung: Es empfiehlt sich, die beiden Salzlösungen wieder in die Vorratsflaschen zurück zu gießen zur erneuten Verwendung.

#### Teil 5: Verhalten gegenüber Aceton

Materialien: Schere, kleine Petrischale aus Glas mit Deckel (Durchmesser ca. 5 cm), Pinzette

Chemikalien: Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers, Aceton (leicht entzündlich, F)

Versuchsdauer: 5 min

#### Versuchsdurchführung:

Unter dem Abzug befüllt man eine Petrischale 0,5 cm hoch mit Aceton und legt ein Stück des Kunststoff-Stülpedeckels hinein. Nach ein bis zwei Minuten nimmt man mit einer Pinzette die Kunststoffprobe heraus und überprüft ihre Festigkeit.

Beobachtung: Die Kunststoffprobe ist weich-elastisch bzw. gummiartig geworden und reißt leicht ein. Sie sieht milchig-trüb aus. Der Kunststoff ist gequollen.

Deutung: Der Kunststoff ist amorph. Er muss eine dem Lösemittel Aceton ähnliche Polarität besitzen.

Entsorgung: Acetonreste gibt man zu den organischen Lösungsmitteln.

## 6. Untersuchung auf Weichmacher

Materialien: Schere, Becherglas (250 mL), Becherglas (100 mL), Stativmaterial, Siedesteinchen, Heizrührer, Uhrglasdeckel, Pinzette

Chemikalien: Kunststoff-Stülpedeckel eines Joghurtbechers, Ethanol (leicht entzündlich, F)

Versuchsdauer: 15 min

### Versuchsdurchführung:

Das kleine Becherglas wird 1 bis 2 cm hoch mit Ethanol befüllt und die Kunststoffprobe wird hinzugegeben. Es wird mit einer Uhrglasschale abgedeckt und so lange im Wasserbad (großes Becherglas) erhitzt, bis der Kunststoff 3 min lang dem siedenden Alkohol ausgesetzt war. Mit einer Pinzette entnimmt man die Kunststoffprobe und überprüft sie auf Änderungen der mechanischen Eigenschaften hin.

Beobachtung: Die Steifigkeit der Probe hat sich nicht verändert.

Deutung: Die Probe enthält keine durch Ethanol herauslösbaren Weichmacher.

Auswertung: Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass der Deckel PVC enthält. Die ermittelte Dichte ist etwas geringer als der in der Literatur für PVC angegebene Wert (ca. 1,40 g/cm<sup>3</sup>). Es gibt keine Hinweise auf das Vorhandensein von Weichmachern. Mit großer Wahrscheinlichkeit handelt es sich bei dem Deckel nicht um reines PVC, sondern um ein Copolymerisat oder ein Polymerblend [95, S. 32-34, S. 38 f., S. 82-84].

Entsorgung: Ethanolreste werden zu den organischen Lösungsmitteln gegeben.

Literatur: [95] [19, S. 80, 81, 239]

## **V 2.10.2: Herauslösen des Weichmachers aus einer Dichtungsmasse mit Hilfe von Olivenöl**

SV, S II

### Material:

Kleines Küchenmesser, Joghurtglas (0,5 L) mit Metallschraubdeckel, Teelöffel, Zellstofftücher

### Chemikalien:

Dichtungsmasse aus Metallschraubdeckel, Olivenöl

Versuchsdauer: Vorbereitung 5 min, Wartezeit 1 Woche

### Versuchsdurchführung:

- Mit einem kleinen Küchenmesser wird die weiße elastische Dichtungsmasse eines Metallschraubdeckels herausgeschält. Das erhaltene Material, welches bei vollständiger Präparation ringförmig ist, wird in zwei Teile zerschnitten.
- In das Joghurtglas füllt man 0,5 cm hoch Olivenöl und legt die eine Hälfte des erhaltenen Dichtungsmaterials hinein. Mit dem Metalldeckel ohne Dichtungsmasse wird das Jo-

ghurtglas verschlossen. Man lässt das Olivenöl eine Woche lang einwirken. Die andere verbliebene Hälfte der Dichtungsmasse wird in ihrem ursprünglichen Zustand aufbewahrt.

- Nach einer Woche wird mit einem Teelöffel die in Olivenöl aufbewahrte Dichtungsmasse entnommen und vorsichtig mit Zellstoffpapier gereinigt. Anschließend wird die Elastizität von behandelter und unbehandelter Probe verglichen.

#### Beobachtung:

Schon nach wenigen Tagen erscheint die in Öl eingelegte Dichtungsmasse härter und hat an Plastizität und Elastizität verloren.

#### Deutung:

Die Weichmacher-Substanz wurde von dem Olivenöl herausgelöst. Es muss sich um eine fettlösliche Substanz handeln.

#### Hinweis:

Das Plastisol, welches als Dichtungsmasse dient, enthält als Weichmacher Phthalsäureester (Diocetylphthalat).

Entsorgung: Behandelte und unbehandelte Dichtungsmasse sowie Olivenöl gibt man zum Haushaltsabfall.

### **V 2.10.3: Herauslösen des Weichmachers aus einer PVC-Folie**

SV, S II

#### Materialien:

Lineal, Schere, Brenner, Abzug, Waage, Gerät zur Infrarot-Spektroskopie, Becherglas (100 mL), Becherglas (250 mL), Siedesteinchen, Uhrglasdeckel, passend auf 250 mL-Becherglas, Heizrührer, Tiegelzange, Haushaltshandschuh, Zellstofftuch

#### Chemikalien:

PVC-Folie (z. B. Skin-Verpackung einer Schale mit Champignons), Kupferblech, Ethanol (leichtentzündlich, F)

Dauer: 60 min

#### Versuchsdurchführung

##### Nachweis von PVC

- Ein kleines Stück der Folie wird ausgeschnitten (2 cm x 2 cm) und auf einem Kupferblech in der rauschenden Brennerflamme erhitzt (Abzug).
- Man beobachtet die Flammenfärbung.

##### Herauslösen des Weichmachers:

- Aus der Folie wird ein quadratisches Stück herausgeschnitten (10 cm x 10 cm) und halbiert.
- Das andere rechteckige Stück faltet man Z-förmig, überführt es in ein kleines Becherglas und fügt 20 mL Ethanol hinzu. Man erhitzt im Wasserbad (großes Becherglas), so dass das Ethanol ca. 10 min lang siedet (Uhrglas als Abdeckung, Abzug).
- Danach wird das gefaltete Folienstück mit Hilfe der Tiegelzange entnommen und mit einem Zellstofftuch glatt gestrichen. Anschließend werden die Massen der beiden Folien-

hälften miteinander verglichen. Außerdem vergleicht man sie hinsichtlich ihrer Transparenz und achtet auf mögliche Geräusche beim Falten der Folien.

Beobachtung bzw. Messergebnisse:

- Das Erhitzen des Kupferblechs mit der Probe der Folie führt zu einer blaugrünen bis grünen Färbung der Flamme.
- Die Folie ist nach der Behandlung mit Ethanol um etwa 25% leichter geworden.
- Die ursprünglich transparente, weiche Folie ist opak geworden und knistert beim Verbiegen.

Auswertung:

- Der positive Verlauf der Beilsteinprobe lässt auf das Vorhandensein von PVC schließen.
- Die Masse des Weichmachers beträgt etwa ein Viertel der Gesamtmasse der Folie.
- Der weiche Griff bzw. die entsprechende Haptik der Folie geht verloren. Ohne Weichmacher knistert die Folie.

Entsorgung:

- Kupferblech abschmiegeln und für eine Wiederverwendung bereithalten
- Ethanol zu den flüssigen organischen halogenfreien Abfällen

Literatur: [114]

**V 2.10.4: Bestimmung des PVC-Gehaltes von Dichtungsmassen mit dem Schöniger-Verfahren**

Die Titration der Verbrennungsprodukte kann in zwei Varianten durchgeführt werden. Diese sind die Titration nach Mohr (LV, S II) und die Titration mit Kalilauge (SV, S II).

Teil 1: Titration nach Mohr

Material:

Waage, Erlenmeyerkolben (1 Liter), passender Gummistopfen mit sehr dünnem Bohrloch zum Hindurchstecken des Verbrennungslöffels, Verbrennungslöffel, Spatel, Messzylinder, 2 Bechergläser (100 ml), Trichter, Bürette (25 ml), Pasteurpipette

Chemikalien:

Dichtungsmasse aus Metall-Schraubdeckeln (Weichmacher bereits entfernt), chlorfreier UHU-Kleber, etwas Papier als Lunte, Sauerstoff-Flasche, Silbernitrat-Lösung ( $c = 0,1 \text{ mol/L}$ ), Kaliumchromat-Lösung (5%ig), Natriumhydrogencarbonat

Sicherheitsvorschriften:

Silbernitrat-Lösung (ätzend, C), Kaliumchromat-Lösung (giftig, T)

Versuchsdauer: 40 min

### Versuchsaufbau:



Abbildung 66: Apparatur zur Bestimmung von Chlor in organischen Verbindungen [149, S. 13, 44], [150, S. 94-98]

### Versuchsdurchführung:

- Etwa 75 mg der chlorhaltigen organischen Substanz werden genau abgewogen und zusammen mit einer Lunte im Verbrennungslöffel festgeklebt.
- Ein mit 50 mL dest. Wasser gefüllter Erlenmeyerkolben wird gut mit Sauerstoff durchgespült.
- Die Lunte wird entzündet und der Verbrennungslöffel im Stopfen schnell in den Erlenmeyerkolben eingeführt, wobei der Stopfen dicht schließen sollte.
- Nach der Verbrennung wird der Erlenmeyerkolben durch vorsichtiges mehrfaches Umschwenken gründlich geschüttelt, bis die Salzsäurenebel verschwunden sind. Eine Spatelspitze Natriumhydrogencarbonat wird hinzu gegeben.
- Den Inhalt des Erlenmeyerkolbens (50 mL) überführt man in ein Becherglas und fügt 15 Tropfen einer 5%igen Kaliumchromat-Lösung hinzu.
- Mit Silbernitrat-Lösung wird bis zum Entstehen eines rostbraunen Niederschlages titriert.

### Hinweis zur Titration:

Am Äquivalenzpunkt bildet sich ein rostbrauner Niederschlag. Wichtig für ein präzises Erreichen des Äquivalenzpunktes ist es, genau auf den Farbumschlag zu achten und nicht auf die Vertiefung der rostbraunen Farbtonung.

### Versuchsergebnis (Beispiel):

Es wurden 75 mg chlorierter Kunststoff abgewogen. Für die Titration der durch die Verbrennung aus HCl entstandenen Chlorid-Ionen in der Lösung wurden insgesamt 8,4 mL Silbernitrat-Lösung der Konzentration  $c(\text{AgNO}_3) = 0,1 \text{ mol/L}$  benötigt.

Dies entspricht nach der Formel  $n = c \times V$  einer Stoffmenge an Silber-Ionen von  $n(\text{AgNO}_3) = c(\text{AgNO}_3) \times V(\text{AgNO}_3) = 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,0084 \text{L} = 0,00084 \text{mol}$ . Da das

Stoffmengenverhältnis  $\frac{n(\text{Cl}^-)}{n(\text{Ag}^+)} = \frac{1}{1}$  beträgt, kann davon ausgegangen werden, dass die

Stoffmenge an  $\text{Cl}^-$  Ionen in der Lösung ebenfalls  $n(\text{Cl}^-) = 0,00084 \text{ mol}$  beträgt.

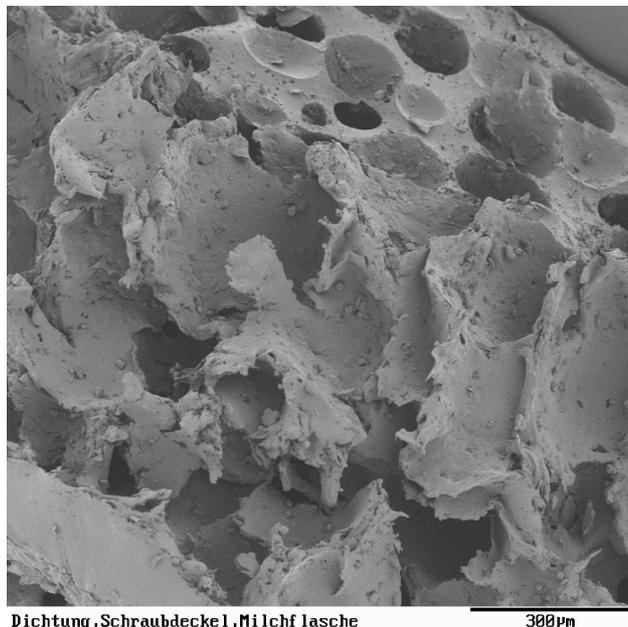
### Auswertung:

Aus der Stoffmenge der Chlorid-Ionen lässt sich der PVC-Gehalt der eingesetzten Probe zu ermitteln. Bei PVC ist von der monomeren Einheit  $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$  auszugehen. Da in dieser monomeren Einheit nur 1 Chloratom enthalten ist, beträgt auch deren Stoffmenge  $n(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-) = 0,00084 \text{ mol}$ . Die Masse an PVC lässt sich über die Beziehung  $m = n \times M$  ermitteln. Mit der molaren Masse der monomeren Einheit von  $M(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-) = 62,45 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$  errechnet sich deren Masse zu

$$m(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-) = 0,00084 \text{ mol} \times 62,45 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0525 \text{ g} = 52,5 \text{ mg} .$$

Der prozentuale PVC-Anteil der eingesetzten Probe beträgt somit  $w(\text{PVC}) = \frac{52,5}{75,0} \times 100\% = 70\%$ .

Da es sich um Copolymere des Vinylchlorids zu handeln scheint, welche als Dichtungsmasse eingesetzt werden, könnte man Polychloroprene vermuten [151, S. 455]. Prinzipiell wäre auch ein PE/PVC - Copolymerisat mit der monomeren Einheit  $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$  denkbar. Dies wird aber nicht eindeutig in der Literatur aufgeführt. Es wird aber auf modifizierte Ethylenpolymerisate verwiesen, deren chemische Abwandlung durch Chlorieren erfolgt [11, S. 89 f.]. In der Literatur findet man Hinweise, dass es sich bei dem Dichtungsmaterial um ein „Plastisol“ handelt, eine Masse, welche nach dem Einspritzen in die Kappe beim Erhitzen auf 170 bis 200 °C aufschäumt [4, S. 104, 178]. Ferner findet man unter dem Begriff „Plastisole“ den Hinweis auf PVC, welches im Weichmacher dispergiert ist [151, S. 455]. Die folgende Abbildung 67 zeigt einen Flächenschnitt durch die Dichtungsmasse, welche in einen Schraubdeckel eingespritzt wurde. Man erkennt, dass es sich nicht um eine kompakte, sondern eine poröse, schaumartige Masse handelt.



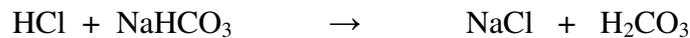
Dichtung, Schraubdeckel, Milchflasche

300µm

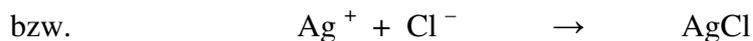
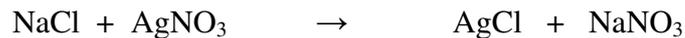
Abbildung 67: Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Flächenschnittes durch die Plastisol-Dichtung (PVC) aus dem Inneren eines Schraubdeckels

### Erläuterungen zur Versuchsdurchführung:

Beim Verbrennen von chlorhaltigen organischen Verbindungen, welche nur aus den Elementen C, H und Cl bestehen, bildet sich außer  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  auch HCl, also Chlorwasserstoffgas. Dieses löst sich in Wasser und wird von Natriumhydrogencarbonat gebunden:



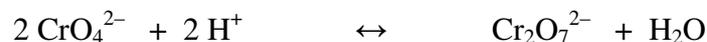
Die Chlorid-Ionen werden von Silber-Ionen gebunden, wodurch die titrimetrische Bestimmung ermöglicht wird:



Da der Punkt der quantitativen Ausfällung der Chlorid-Ionen als AgCl unbemerkt überschritten werden kann, müssen Silber-Ionen sichtbar abgefangen werden, sobald keine freien Chlorid-Ionen mehr in der Lösung vorhanden sind. Silberchromat hat ein größeres Löslichkeitsprodukt als Silberchlorid [150, S. 94-98]. Überzählige Silber-Ionen werden von Chromat-Ionen abgefangen, worauf sofort ein rostbrauner Niederschlag von Silberchromat ausfällt:



Die Zugabe von Natriumhydrogencarbonat, welches zu einer Neutralisation der ursprünglich sauren Lösung führt, verhindert, dass sich ein Chromat/Dichromat-Gleichgewicht einstellen kann, wie es in saurer Lösung geschieht:



Die Bildung von Dichromat-Ionen muss deshalb verhindert werden, weil sie mit Silber-Ionen keinen Niederschlag ergeben. Der pH-Wert sollte daher etwa im neutralen Bereich, also zwischen 6,5 und 10,5 liegen. Wird die Lösung zu stark alkalisch, fällt Silberhydroxid bzw. Silberoxid oder Silbercarbonat aus. Diese Fällungstiteration wird auch als „Titration nach Mohr“ bezeichnet [82, S. 104].

### Entsorgung:

Die bei der Titration anfallenden Salze ( $\text{AgCl}$ ,  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) werden abfiltriert und in den Behälter für Schwermetallabfälle gegeben. Das Filtrat muss wegen möglicher Chromatreste in den Behälter für Schwermetallsalzlösungen.

Literatur: [4], [11], [82], [149], [150], [151]

### Teil 2: Titration mit Kalilauge

#### Material:

Waage, Erlenmeyerkolben (1 Liter), passender Gummistopfen mit sehr dünnem Bohrloch zum Hindurchstecken des Verbrennungslöffels, Verbrennungslöffel, Messzylinder, 2 Bechergläser (100 mL), Trichter, Bürette (25 mL), Pasteurpipette

### Chemikalien:

PVC-Dichtungsmasse aus Metall-Schraubdeckeln, chlorfreier UHU-Kleber, etwas Papier als Lunte, Sauerstoff-Flasche, Methylrot als Indikator (0,02 g Methylrot in 60 mL Ethanol lösen, mit Wasser auf 100 mL auffüllen), Kaliumhydroxid-Lösung ( $c=0,1 \text{ mol/L}$ )

### Sicherheitsvorschriften:

Methylrot (gesundheitsschädlich, Xn), Ethanol (leicht entzündlich, F), Kaliumhydroxid (ätzend, C)

Versuchsdauer: 40 min

Versuchsaufbau: Wie bei der Titration nach Mohr

### Versuchsdurchführung:

- Etwa 75 mg der chlorhaltigen organischen Substanz werden genau abgewogen und zusammen mit einer Lunte in einem Verbrennungslöffel festgeklebt.
- Ein mit 150 mL Wasser befüllter Erlenmeyerkolben wird mit Sauerstoff durchgespült.
- Die Lunte wird entzündet und der Verbrennungslöffel im Stopfen schnell in den Erlenmeyerkolben eingeführt, wobei der Stopfen dicht schließen sollte.
- Nach der Verbrennung wird der Erlenmeyerkolben durch vorsichtiges mehrfaches Umschwenken gründlich geschüttelt, bis die Salzsäurenebel verschwunden sind.
- Vom Inhalt des Erlenmeyerkolbens überführt man 50 mL in ein Becherglas, fügt 20 Tropfen der Methylrot-Lösung hinzu und titriert mit der Kaliumhydroxid-Maßlösung, bis ein Farbumschlag von rot nach gelb erfolgt.
- Die restlichen 100 mL der sauren Lösung aus dem Erlenmeyerkolben können in zwei weiteren Durchgängen ebenfalls titriert werden.

### Hinweis zur Titration:

Am Äquivalenzpunkt findet ein Farbumschlag von rot nach gelb statt (pH 4,2-6,2).

### Versuchsergebnis:

Es wurden 75 mg chlorierter (unbehandelter) Kunststoff abgewogen. Für die Titration von 50 mL der durch die Verbrennung aus HCl entstandenen sauren Lösung wurden 2,0 mL der Kaliumhydroxid-Maßlösung verbraucht, für insgesamt 150 mL Probelösung aus dem Erlenmeyerkolben waren 6,0 mL KOH-Maßlösung erforderlich.

Zum Erreichen des Äquivalenzpunktes wurde an Maßlösung die Stoffmenge  $n(\text{KOH}) = c(\text{KOH}) \times V(\text{KOH}) = 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,006 \text{L} = 0,0006 \text{mol}$  verbraucht. Dies weist auf das Vorhandensein von ebenfalls 0,0006 mol  $\text{H}_3\text{O}^+$ -Ionen und damit auf die Stoffmenge von 0,0006 mol  $\text{Cl}^-$ -Ionen hin, welche beim Verbrennungsvorgang aus dem Kunststoff freigesetzt wurden.

### Auswertung:

Aus der Stoffmenge der Chlorid-Ionen lässt sich der PVC-Gehalt der eingesetzten Probe zu ermitteln. Bei PVC ist von der monomeren Einheit  $-\text{CH}_2-\text{CHCl}-$  auszugehen. Da in dieser monomeren Einheit nur 1 Chloratom enthalten ist, beträgt auch deren Stoffmenge  $n(-\text{CH}_2-\text{CHCl}-) = 0,0006 \text{ mol}$ . Die Masse an PVC lässt sich über die Beziehung  $m = n \times M$  ermitteln.

Mit der molaren Masse der monomeren Einheit von  $M(-\text{CH}_2 - \text{CHCl}-) = 62,45 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$  errechnet sich deren Masse zu

$m(-CH_2 - CHCl-) = 0,0006 \text{ mol} \times 62,45 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,0375 \text{ g} = 37,5 \text{ mg}$ . Der prozentuale PVC-Anteil der eingesetzten Probe (unbehandelt, mit Weichmacher) beträgt somit  $w(\text{PVC}) = \frac{37,5}{75,0} \times 100\% = 50\%$ . Dieses Ergebnis entspricht in anderen Literaturstellen dokumentierten Befunden [150, S. 98].

Entsorgung:

Die bei der Titration anfallenden Lösungen können mit Wasser verdünnt und über das Abwassernetz entsorgt werden.

Literatur: [150]

**V 2.10.5: Nachweis von Phthalsäureestern als Weichmacher in PVC**

LV, S II

Versuchsmaterial: Kleines Küchenmesser, Schere, Waage, 3 Reagenzgläser (Fiolax, 16 cm / 16 mm), Spatel, Pasteurpipette, Reagenzglasklammer, Brenner, 3 Erlenmeyerkolben (250 mL), 3 Glastrichter, 3 Faltenfilter, 3 Bechergläser (50 mL), Messzylinder (50 mL), UV-Lampe (366 nm), Raum mit Verdunklungsmöglichkeit bzw. Abzug

Chemikalien:

Metall-Schraubdeckel mit Platisol-Dichtungsmasse (3-4 Aluminium-Schraubdeckel für Mineralwasser-Glasflaschen, 1 Weißblech-Deckel für Joghurt, PVC-Folie (z.B. zur Verpackung von Champignons), Resorcin, konz. Schwefelsäure, Natronlauge (w = 10 %)

Sicherheitsvorschriften:

Resorcin bzw. 1,3-Dihydroxybenzol (gesundheitsschädlich, Xn; umweltgefährdend, N), konz. Schwefelsäure (ätzend, C), Natronlauge (ätzend, C)

Versuchsdauer: 30 min

Versuchsdurchführung:

- Je 200 mg der beiden fein zerkleinerten Dichtungsmassen sowie der Lebensmittelfolie werden in nummerierte Reagenzgläser überführt (Tab. 53):

Tabelle 53: Ansatz zur Untersuchung der Weichmachersubstanzen in verschiedenen PVC-haltigen Verpackungsmaterialien

Reagenzglas Nr.	1	2	3
Inhalt je 200 mg	Dichtung Aluminium-Schraubdeckel „Gerolsteiner“	Dichtung Schraubdeckel Joghurtglas	PVC-Folie für Lebensmittel

- Zunächst fügt man je eine Spatelspitze Resorcin hinzu, anschließend je 20 Tropfen konz. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Über der Brennerflamme wird erwärmt, bis eine blutrote Färbung auftritt.
- Vorsichtig (!) fügt man mit der Spritzflasche unter dem Abzug jeweils bis zu 4 cm hoch dest. Wasser hinzu und filtriert ab (Filtrat in Erlenmeyerkolben).
- Der Inhalt der Erlenmeyerkolben wird in 3 kleine nummerierte Bechergläser überführt, welche jeweils mit 20 mL Natronlauge befüllt sind. Anschließend werden die optischen

Effekte unter dem Einfluss von UV-Licht der Wellenlänge 366 nm in einem verdunkelten Raum registriert.

Ergebnis:

Die Dichtungsmassen der Schraubdeckel ergeben bei UV-Licht der Wellenlänge 366 nm die gleiche Fluoreszenz und unterscheiden sich damit hinsichtlich des Weichmachers aus der PVC-Lebensmittelfolie (Tab. 54).

Tabelle 54: Fluoreszenzantworten der Weichmachersubstanzen dreier verschiedener Verpackungsmaterialien

Becherglas Nr.	1	2	3
Inhalt: Behandelte Weich- machersubstanz	Dichtung Aluminium-Schraubdeckel „Gerolsteiner“	Dichtung Schraubdeckel Joghurtglas	PVC-Folie für Lebensmittel
Unter UV-Lampe (366 nm):	grün-gelbe Fluoreszenz	grün-gelbe Fluoreszenz	matt blaue Fluoreszenz

Auswertung:

Die grünelbe Fluoreszenz weist auf Phthalsäureester hin. Wo die grünelbe Fluoreszenz nicht auftritt, liegt eine andere Stoffklasse an Weichmachern vor. „Die Schwefelsäure spaltet die vorliegenden Phthalsäureester und führt durch ihre wasserentziehende Wirkung zur Bildung des Phthalsäureanhydrids. Dieses reagiert mit Resorcin zu Fluorescein“ [152]. Der Schichtenaufbau eines Schraubdeckels wird in der folgenden Abbildung dargestellt (Abb. 68). Die PVC- bzw. Plastisol-Schicht liegt im Bild unten, also im Deckelinneren.

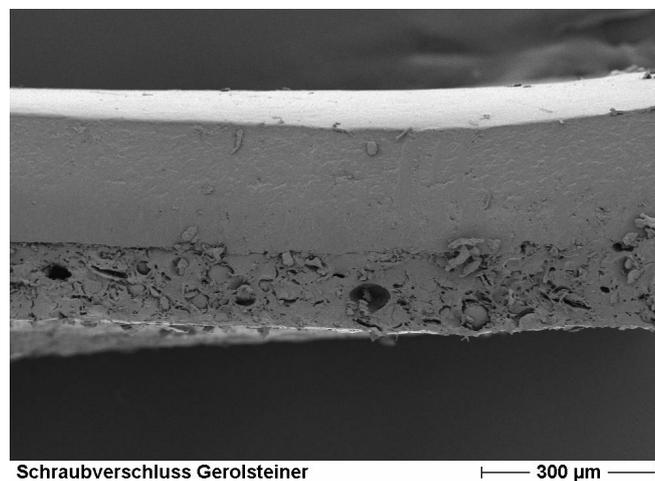


Abbildung 68: Elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnittes von einem Schraubdeckel für Mineralwasser-Glasflaschen der Marke „Gerolsteiner“. Der Deckel besteht aus einer Aluminiumkapsel mit eingespritzter Plastisol-Schicht (PVC). Letztere besitzt eine Dicke von ca. 150 µm und befindet sich unten im Bild. Sie stellt die flächige elastische Innenauskleidung des Deckels dar. Die obere Schicht (außen) zeigt einen Ausschnitt der an der Außenseite lackierten Aluminiumkapsel.

Entsorgung: Feststoffreste gibt man zum Hausmüll, Reste von Lösungen hingegen zu den anorganischen Abfällen mit Schwermetallen.

Literatur: [152]

## V 2.10.6: Dünnschichtchromatografische Untersuchung von Weichmachersubstanzen

SV, S II

Versuchsmaterial: Kleines Küchenmesser, Schere, Waage, 4 Reagenzgläser (Fiolax, 16 cm / 16 mm), Spatel, Pasteurpipette, 2 Messzylinder (50 mL), Becherglas (250 mL), Siedesteine, weicher Bleistift, Lineal, Kieselgel-DC-Platte (8 cm x 4 cm) mit Fluoreszenz-Indikator (254 nm), Kapillarpipetten (5 µL), DC-Laufkammer (Größe ca. 10 cm x 10 cm), UV-Lampe (254 nm), Raum mit Verdunklungsmöglichkeit bzw. Abzug

### Chemikalien:

Metall-Schraubdeckel mit Plastisol-Dichtungsmasse: 3-4 Aluminium-Schraubdeckel für Mineralwasser-Glasflaschen (z.B. „Gerolsteiner“), 1 Weißblech-Schraubdeckel für Joghurtgläser, PVC-Folie (z.B. zur Verpackung von Champignons), Dioctylphthalat (gesundheitsschädlich, Xn), Aceton (leicht entzündlich, F), Isooctan (leicht entzündlich, F), Ethylacetat (leicht entzündlich, F)

### Versuchsdurchführung:

#### Extraktion des Weichmachers

- Je 200 mg der beiden fein zerkleinerten Dichtungsmassen sowie der Lebensmittelfolie werden in nummerierte Reagenzgläser überführt. In Reagenzglas 4 gibt man als Vergleichssubstanz 1 Tropfen des Weichmachers Dioctylphthalat (Tab. 55).

Tabelle 55: Ansatz zur Untersuchung von Weichmachersubstanzen

Reagenzglas Nr.	1	2	3	4
Inhalt	Dichtung Aluminium-Schraubdeckel „Gerolsteiner“	Dichtung Schraubdeckel Joghurtglas	PVC-Folie für Lebensmittel	Dioctylphthalat (1 Tropfen)

- Zu jedem Reagenzglas fügt man 5 mL Aceton hinzu.
- Die Reagenzgläser 1, 2 und 3 werden 25 min in ein Wasserbad von 50°C gestellt. (Es empfiehlt sich, in Reagenzglas 3 einen Spatel zu stellen, damit die Folienstücke auf den Boden des Reagenzglases gedrückt werden.)

### Dünnschichtchromatografie

- Eine kleine Trennkammer wird mit 8 mL Isooctan und mit 2 mL Ethylacetat befüllt (Glasdeckel).
- Auf einer kleinen DC-Platte, welche mit Kieselgel beschichtet ist und einen Fluoreszenz-indikator (254 nm) besitzt, wird eine Startlinie mit vier Startpunkten eingetragen (Abstand vom unteren Rand ca. 1 cm).
- Mit je einer Kapillarpipette wird aus den 4 Reagenzgläsern eine Probe entnommen und je einmal auf dem entsprechenden Startpunkt der DC-Platte aufgetragen. Dann wird die DC-Platte in die Laufkammer gestellt (Laufmittel: 8 mL Isooctan auf 2 mL Ethylacetat).
- Wenn die Laufmittelfront etwa 1 cm vom oberen Rand der DC-Platte entfernt ist, wird die Platte aus der Trennkammer herausgenommen (Laufmittelfront markieren, DC-Platte unter dem Abzug trocknen lassen).

- Die Auswertung der erfolgten Trennvorgänge erfolgt bei geeigneter Verdunklung mit Hilfe einer UV-Lampe (254 nm). Die Substanzflecken werden markiert und die  $R_f$ -Werte ermittelt. Das Ergebnis ist der folgenden Tabelle zu entnehmen (Tab. 56).

### Ergebnisse:

Tabelle 56: Untersuchung von Weichmachersubstanzen in verschiedenen PVC-Proben mit Hilfe der Dünnschichtchromatografie

<b>Probe Nr.</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Herkunft/ Substanz	Dichtung Aluminium-Schraubdeckel „Gerolsteiner“	Dichtung Schraubdeckel Joghurtglas	PVC-Folie für Lebensmittel	Diethylphthalat (1 Tropfen)
Laufmittel	8 mL Isooctan und 2 mL Ethylacetat			
Detektion	UV-Lampe (254 nm)			
$R_f$ -Wert	0,75	0,72	nicht nachweisbar	0,75

### Auswertung:

Bei der Weichmachersubstanz im Aluminium-Schraubdeckel (Probe 1) handelt es sich mit Sicherheit um Diethylphthalat. In der Dichtung des Weißblech-Schraubdeckels (Probe 2) ist höchstwahrscheinlich ebenfalls Diethylphthalat enthalten. Vorversuche mit verschiedenen Phthalsäureestern ergaben, dass nur die  $R_f$ -Werte von Diethylphthalat und Dinonylphthalat, welche untereinander kaum unterscheidbar sind, mit den  $R_f$ -Werten der Weichmacher aus den Dichtungsmassen der Schraubdeckel weitgehend übereinstimmen. Andere untersuchte Phthalate, wie Dimethylphthalat und Dibutylphthalat konnten ausgeschlossen werden, da ihre  $R_f$ -Werte deutlich niedriger lagen als die  $R_f$ -Werte der Phthalate mit langkettigen Alkoholen [153].

Der Weichmacher aus der PVC-Folie für Lebensmittel (Probe 3) ließ sich nicht mit der UV-Lampe (254 nm) nachweisen. Folglich muss es sich um eine andere Weichmacher-Substanz handeln, wie z.B. Citronensäureester.

Entsorgung: Organische Lösungsmittel

Literatur: [153]

## **V 2.11: Acetaldehyd-Freisetzung aus zerkleinerten PET-Flaschen**

LV, S II

Teil 1:

Halbquantitativer Nachweis von Acetaldehyd mit Prüfröhrchen (Dräger)

### Material:

Robuste Schere, Waage, 1-Liter-Flasche aus Duranglas mit Quickfit-Verschluss und Septum, Trockenschrank, Frischhaltefolie

### Chemikalien:

Mehrere 1,5-Liter-PET-Flaschen für kohlensäurefreies Mineralwasser (aus 4 PET-Flaschen mit dem Volumen von 1,5 L erhält man etwa 100 g PET-Material), rezykliertes Granulat (Regranulat), Dräger®-Prüfröhrchen für Acetaldehyd und zugehörige Pumpapparatur

Versuchsdauer: Zerkleinerung und Vorbereitung des PET-Materials 15 min, Wartezeit 1 bis 2 Tage, Nachweis 10 min

### Versuchsdurchführung:

- Eine gut abgespülte und getrocknete PET-Flasche (1,5 L) wird in Stücke von ca. 1 cm<sup>2</sup> zerschnitten (Teile mit Klebstoffresten nicht verwenden). Davon werden zwischen 40 und 100 g in eine 1-Liter-Flasche aus Duranglas überführt, welche mit Hilfe eines Quickfit-Verschlusses und eines Septums verschlossen wird. Die Flasche wird für ein bis zwei Tage in den Trockenschrank gestellt (110 bis 140 °C).
- Nach dieser Zeit lässt man die Flasche auf ca. 30 °C abkühlen und prüft den Inhalt mit dem Dräger-Prüfröhrchen in der zugehörigen Pumpapparatur (Öffnung mit Hand umschließen oder mit Frischhaltefolie abdecken). Nach einer geeigneten Zahl an Pumphüben wird der Acetaldehyd-Gehalt in ppm bestimmt.

### Versuchsergebnisse (Beispiele):

Die nachfolgende Tabelle 57 zeigt die Acetaldehyd-Konzentrationen, welche nach 1 bis 2 Tagen nachgewiesen werden konnten.

Tabelle 57: In der Prüf-Glasflasche nachgewiesene Acetaldehyd-Konzentrationen, wie sie im Trockenschrank durch das Erhitzen von PET-Portionen bei verschiedenen Temperaturen innerhalb von 1 bis 2 Tagen entstanden sind.

Proben-Nr.	PET Markenname	Masse	Temp.	Dauer	Anzahl durchgeführter Pumphübe	Durch 20 Pumphübe wird die Konzentration angegeben.
1	Vittel	40 g	130 °C	20 h	60	10 ppm
2	Vittel	50 g	110 °C	1-2 d	60	10 ppm
3	Volvic	100 g	135 °C	40 h	20	30-40 ppm
4	Volvic	50 g	160 °C	24 h	20	80 ppm
5	Volvic	100 g	140 °C	2,5 h	20	50 ppm
6	Granulat PROPLAST Regranulat	50 g	110 °C	4 d	20	250 ppm
7	Raumluft	Zimmertemperatur			60	0 ppm

### Auswertung:

Den entscheidenden Einfluss auf die Menge des freigesetzten Acetaldehyds hat die Temperatur. Dies zeigt sich deutlich an den Proben 2 und 4. Bei 160 °C wird achtmal soviel Acetaldehyd freigesetzt wie bei 110 °C. Diese Einschätzung wird durch die Ergebnisse der Proben 3 und 5 bestätigt. Probe 5 zeigt, dass man auch in kurzer Zeit zu gut messbaren Ergebnissen kommt, wenn man eine Temperatur von 140 °C wählt. (Die Temperatur darf jedoch nicht höher liegen, da sonst der Dichtungsring an der Mündung der Duranglas-Flasche zersetzt wird.) Probe 6 zeigt, dass durch recyceltes PET-Granulat schon bei der niedrigsten der gewählten Temperaturen (110 °C) unverhältnismäßig große Mengen an Acetaldehyd abgegeben werden. Zusammenfassend und verallgemeinernd gilt, dass nur durch Erhitzen messbare

Mengen an Acetaldehyd frei gesetzt werden. In der Raumluft konnte mit den Dräger-Prüfröhrchen kein Acetaldehyd nachgewiesen werden.

Acetaldehyd, welches sich als Nebenprodukt bei der Polymerisation von Ethylenglykol und Terephthalsäure bildet, kann prinzipiell in jedem PET-Granulat nachgewiesen werden. Durch thermische Belastung erhöht sich der Acetaldehyd-Gehalt. Bei der Herstellung des Kunststoffes gebildetes Acetaldehyd wird im Flaschenmaterial eingeschlossen. Das Ausmaß der Acetaldehyd-Freisetzung ist u.a. abhängig von der Zeit, der Temperatur sowie der Oberfläche des PET-Materials [154].

Entsorgung: PET-Reste in den Hausmüll

Teil 2:

Qualitativer Nachweis von Acetaldehyd mit Schiff-Reagenz (Ergänzender Versuch mit der auf 30°C abgekühlten Probe)

Materialien:

1-Liter-Flasche (Duranglas mit Quickfit-Verschluss und Septum) mit 50 bis 100 g auf 130 bis 140°C erhitzten PET-Stücken aus Teil 1, auf die 1-Liter-Flasche passender doppelt durchbohrter Glasstopfen, 2 gebogene Glasrohre, Aquariumpumpe, Schlauchverbindungen, großes Reagenzglas, passender Reagenzglasständer, Messzylinder (25 mL)

Chemikalien:

1-Liter-Flasche (Duranglas mit Quickfit-Verschluss und Septum) mit auf 135°C erhitzten PET-Stücken aus Teil 1, Schiff-Reagenz (reizend, Xi)

Versuchsdauer: Zerkleinerung und Vorbereitung des PET-Materials 15 min, Wartezeit 1 bis 2 Tage, Nachweis 20 min

Versuchsaufbau:

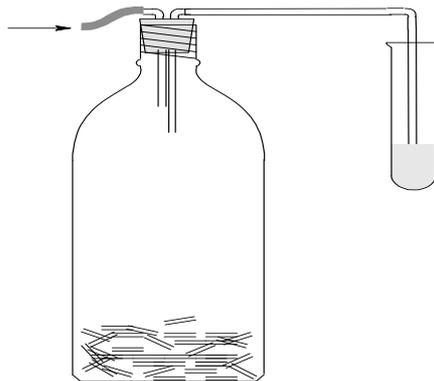


Abbildung 69: Nachweis von Acetaldehyd-Dampf mit fuchsinschwefliger Säure. Mit Hilfe einer Aquariumpumpe wird Luft in die Duranglasflasche gepumpt, in welcher die PET-Stücke erhitzt wurden. Der Acetaldehyd enthaltende Luftstrom wird über ein gebogenes Glasrohr in ein Reagenzglas geleitet, in welchem sich fuchsinschweflige Säure befindet.

Versuchsdurchführung:

- Von der auf ca. 30 °C abgekühlten 1-Liter-Flasche aus Duranglas, welche die wärmebehandelten PET-Stücke enthält, entfernt man den Quickfit-Verschluss mit Septum und setzt einen doppelt durchbohrten Stopfen mit zwei gebogenen Glasrohren auf. Ein gebogenes

Glasrohr wird über ein Schlauchstück mit der Aquariumpumpe verbunden, das andere wird so platziert, dass es weit in das große Reagenzglas hineinragt.

- In den Messzylinder werden 20 mL Wasser und 5 mL Schiff-Reagenz gefüllt. Die Aquariumpumpe wird eingeschaltet.
- Man achtet auf eine Farbänderung der fuchsinschwefligen Säure.

#### Versuchsergebnis:

Nach 1 - 2 Minuten zeigt sich eine Rosafärbung. Wird nur Raumluft durch das Reagenz gepumpt, zeigt sich auch nach 10 min keine Verfärbung des Reagenzes.

#### Auswertung:

In der auf 30° C abgekühlten Probe aus erhitztem PET kann Acetaldehyd nachgewiesen werden. Ein Acetaldehyd-Test der Raumluft verläuft negativ. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Veränderungen im Molekül der fuchsinschwefligen Säure, wenn drei Moleküle eines Aldehyds gebunden werden (Abb. 70).

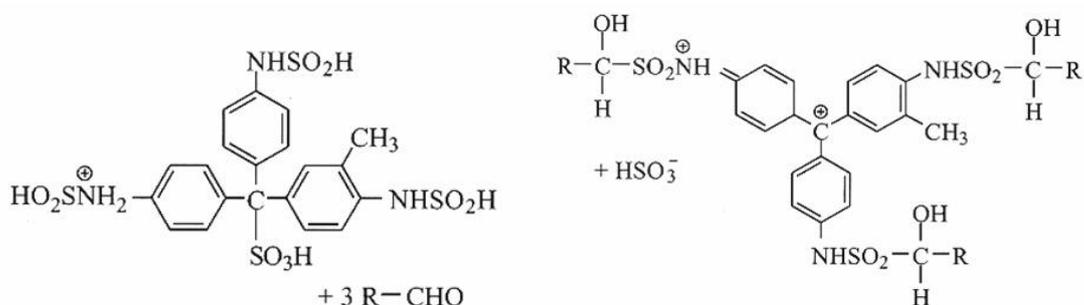


Abbildung 70: Fuchsinschweflige Säure (farblos, links) und das Reaktionsprodukt eines Aldehyds RCHO mit fuchsinschwefliger Säure (rotviolett, rechts), (verändert nach [155, S. 99])

#### Entsorgung: Fuchsinschweflige Säure zu Säuren und Laugen

Literatur: [154], [155, S. 99]

### **V 2.12.1: Isolierung und Nachweis des roten Farbstoffes aus der Paraffinschicht von Babybel-Käse**

LV, S II

#### Geräte:

Reagenzglas, Gabelklemme, Stativmaterial, Becherglas (250 mL), Heizrührer, Glasstab, Pasteurpipette (Länge ca. 23 cm), Messzylinder (50 mL), Scheidetrichter (250 mL) mit Teflonküken, 2 kleine Bechergläser (je 50 mL), kleiner Trichter, kleine Glasflasche (50 mL), Abzug

#### Chemikalien:

Paraffinhülle von kleinem Käseläib „Babybel“, Dimethylformamid (giftig, T), Phosphorsäure, w = 89 % (ätzend, C), Isooctan (leicht entzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn, umweltgefährlich, N), Petrolether, 80-110 °C, (leicht entzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn)

Versuchsdauer: 20 min

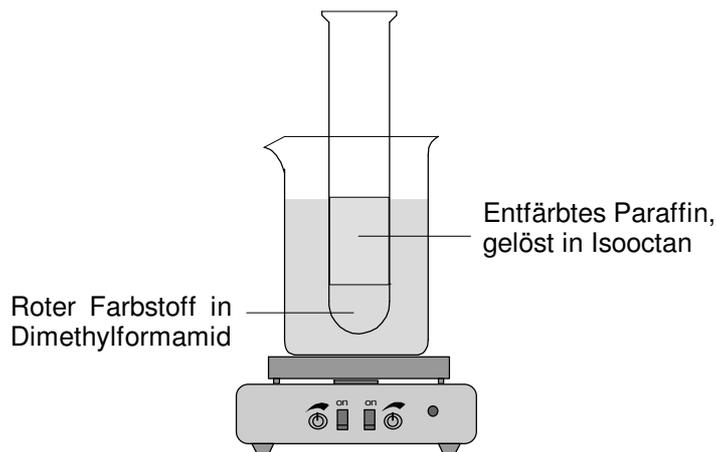


Abbildung 71: Versuchsaufbau zu V 2.12.1

Versuchsdurchführung:

- 1-3 cm<sup>3</sup> der Paraffinumhüllung werden in ein Reagenzglas gegeben. Es werden 2 mL Dimethylformamid, 2 Tropfen Phosphorsäure sowie 3 mL Isooctan hinzugefügt (Abzug).
- Das Gemisch wird auf einem siedenden Wasserbad erwärmt und mit einem Glasstab gelegentlich umgerührt. Wenn sich das Paraffin in der oberen Phase und der Farbstoff in der unteren Phase gelöst haben, lässt man abkühlen.
- Mit einer geeigneten Pasteurpipette wird ein größerer Teil der unteren Phase aufgenommen und in einen mit 10 mL Petrolether beschickten Scheidetrichter überführt.
- Die untere (rote) Phase lässt man in ein kleines Becherglas auslaufen. Dann wird nochmals mit Petrolether gewaschen. Die farbstoffhaltige Lösung (Dimethylformamid) kann in eine kleine Glasflasche gefüllt und für dünnschichtchromatografische Untersuchungen aufgehoben werden.

Versuchsergebnis:

Nach fünfminütigem Erhitzen und Umrühren ist die obere Phase fast vollständig entfärbt. Das Paraffin bleibt in der oberen Phase gelöst. Die untere Phase mit dem roten Farbstoff lässt sich problemlos entnehmen.

Auswertung:

Die selektive Löslichkeit des Farbstoffes in Dimethylformamid einerseits und die Ausbildung einer Phasengrenze zu Isooctan andererseits ermöglichen eine gute Abtrennbarkeit des Farbstoffes von Paraffin.

Zum Färben von Käsewachs kann Litholrubin BK (E 180) verwendet werden. Die Strukturformel des Farbstoffes ist nachfolgend dargestellt (Abb. 72):

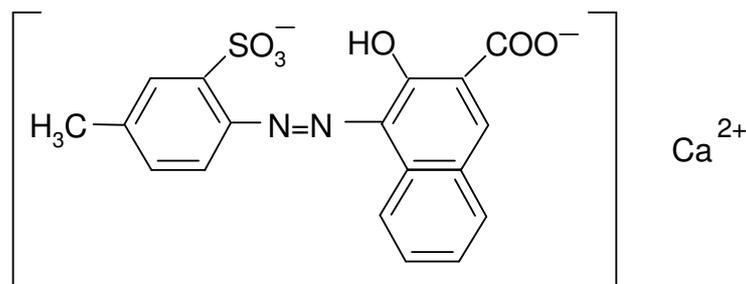


Abbildung 72: Strukturformel von Litholrubin [15, S. 735]

#### Anmerkung:

Die Ergebnisse dünnschichtchromatografischer Untersuchungen des isolierten Farbstoffes weisen auf Litholrubin BK (E 180) hin. Dabei wurden Tartrazin und Patentblau V als Referenzfarbstoffe eingesetzt.

Entsorgung: Nicht verwendete Lösungsmittelreste zu den flüssigen organischen Abfällen geben

Literatur: [15] (Informationen über Litholrubin BK), [156] (Versuchsvorschriften zur Isolierung des Farbstoffes und zur Dünnschichtchromatografie)

### **V 2.12.2: Versuche mit der roten Cellophan-Folie einer Käseverpackung (Babybel®)**

LV, S II

#### Teil 1: Gezieltes Entfernen des Lacks von einer roten Käsefolie aus Cellophan

#### Geräte:

Schere, Zellstofftuch, Rundkolben (100 mL), Messzylinder (50 mL), Rührer, Heizpilz, Rückflusskühler, Trockenrohr mit Calciumchlorid, größere Pinzette, Stativmaterial, Braunglasflasche (100 mL) mit Schraubverschluss, Glastrichter, Abzug

#### Chemikalien:

Netz mit 6-teiligem Mini-Babybel®-Käse, Ethanol (leicht entzündlich, F), Toluol (leicht entzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn), Calciumchlorid wasserfrei (reizend, Xi)

Versuchsdauer: Reinigung mit Ethanol 5 Minuten, Behandlung mit Toluol 20 Minuten

#### Durchführung:

- Die roten Folien von 2 Mini-Babybel®-Käseläuben werden gereinigt (Ethanol, Zellstofftuch) und anschließend mit der Schere halbiert. Die erhaltenen 4 Folienstücke werden gefaltet und in den Rundkolben überführt.
- Nach der Zugabe von 20 mL Toluol erhitzt man unter Rückfluss ca. 10 min lang (Trockenrohr, Heizpilz, Rührwerk).
- Die 4 Streifen lassen sich mit einer Pinzette aus dem Rundkolben herausziehen. Sie verbleiben ausgebreitet so lange unter dem Abzug, bis sie frei von Toluol sind.
- Die Toluollösung wird verschlossen und für Versuchsteil 2 aufbewahrt.

#### Beobachtungen:

Die getrockneten Cellophanfolien haben zwar größtenteils ihre rote Farbe behalten, aber an Glanz verloren. Sie fühlen sich rau an und lassen beim Verbiegen ein deutlicheres Knistern vernehmen.

#### Auswertung:

Die farbstoffhaltigen Cellophan-Folien der Käseverpackung sind beidseitig lackiert. Dazu kann PVDC (Polyvinylidenchlorid) verwendet werden. Durch die Behandlung mit Toluol wird die beidseitige Lackschicht abgelöst.

#### Entsorgung:

- Ethanol und Toluol bei Bedarf zu den flüssigen halogenfreien organischen Stoffen
- Calciumchlorid zu den anorganischen Feststoffabfällen oder verdünnt in den Ausguss

Literatur: [4, S. 74 f.], [18, S. 136 f.]

## Teil 2: Überprüfung der Lackschicht mit der Beilstein-Probe

### Geräte:

Schere, Tiegelzange, Brenner, Pasteurpipette, Abzug

### Chemikalien:

Rote Mini-Babybel®-Folie (unbehandelt), 2 ausgeglühte Kupferbleche, in Toluol (leichtentzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn) gelöster Lack einer Babybel®-Folie in einer Braunglasflasche (100 mL) mit Schraubverschluss, Pasteurpipette, evtl. PVC-Folie oder Dichtungsmasse aus einem Metallschraubdeckel für Joghurt-Gläser

Versuchsdauer: 5 Minuten

### Durchführung:

- Ein kleines Stück (etwa 4 cm<sup>2</sup>) wird von einer unbehandelten roten Folie abgeschnitten und auf einem Kupferblech in die Brennerflamme gehalten (Tiegelzange).
- Danach entnimmt man mit einer Pasteurpipette eine Probe aus der Braunglasflasche mit der Toluol-Lack-Lösung (Versuchsteil 1) und tropft diese auf ein zweites Kupferblech, welches wiederum in die Flamme gehalten wird.
- Man beobachtet jeweils die Flammenfärbung sowie die Intensität des Abbrennens.
- Der Versuch wird mit einem Stück einer PVC-Folie oder einem Stück Dichtungsmasse aus einem Metallschraubdeckel für Joghurt-Gläser wiederholt.

### Beobachtung:

Die Flamme färbt sich intensiv grün. Das Abbrennen verläuft ohne besondere Heftigkeit.

### Auswertung:

Zum Lackieren von Cellophan wird PVDC (Polyvinylidenchlorid) eingesetzt [4, S. 74 f.]. PVDC hat hervorragende Barriereigenschaften gegen Wasserdampf und Sauerstoff. Seine Sperrschichteigenschaften sind unabhängig von der Luftfeuchtigkeit [18, S. 136 f., 194]. Der Aufbau eines Monomers ist in der folgenden Abbildung dargestellt [24, S. 26].

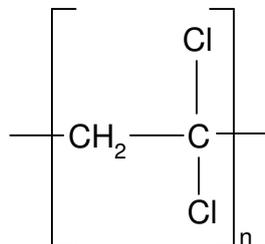


Abbildung 73: Monomer von PVDC

Die grüne Flammenfärbung rührt von flüchtigen Kupferhalogeniden her, die sich aus den Halogenverbindungen des Substrats mit Kupfer im nicht leuchtenden Flammenteil des Brenners bilden [132, S. 368]. Obwohl die Beilsteinprobe als Nachweisverfahren für Halogenverbindungen unspezifisch ist, gibt sie hier in Anbetracht der wenigen als Lack in Betracht kommenden Substanzen eine eindeutige Antwort zugunsten von PVDC.

Entsorgung: Toluolreste in den Abfallbehälter „Organische Lösemittelgemische“ geben.

Literatur: [4], [18], [24], [132], [95]

### Teil 3: Herauslösung des roten Farbstoffes aus der Cellophanfolie der Babybel®-Käseverpackung

#### Geräte:

Heizrührer, Becherglas (250 mL), darauf passendes Uhrglas, Rührstäbchen, Pinzette, Glasflasche (100 mL) mit Schraubverschluss, kleiner Trichter, Haushaltshandschuhe

#### Chemikalien:

2 mit Toluol behandelte, vom Lack befreite Mini-Babybel®-Folien (= 4 Folienhälften) aus Versuchsteil 1

Versuchsdauer: 15 Minuten

#### Durchführung:

- In ein Becherglas mit 50 mL dest. Wasser gibt man die 4 mit Toluol behandelten Folienhälften und erhitzt 5 min lang unter Rühren bis zum Sieden (Uhrglas als Abdeckung).
- Die Folienstücke werden mit einer Pinzette entnommen und mit Wasser abgespült (für V 2.8.2). Die entstandene rote Farbstofflösung wird in eine kleine Glasflasche gefüllt und für weitere Versuche (V 2.12.3) aufbewahrt.
- Um eine möglichst vollständige Entfärbung zu erreichen (für V 2.8.2), sollte der beschriebene Vorgang bei Bedarf wiederholt werden. Die Folien werden schließlich getrocknet.

#### Beobachtung:

Das Wasser, in dem sich die mit Toluol behandelten Folienhälften befinden, hat eine kräftige Rotfärbung angenommen. Die Folienstücke sind weitgehend entfärbt.

#### Auswertung:

Der Lack (Polyvinylidenchlorid, PVDC) ist beidseitig auf die Cellophanfolie aufgetragen. Er bietet eine sehr gute Barriere gegen Wasser. Die Folie ist massiv rot eingefärbt [18, S. 42 f.]. Wird die beidseitige Schutzschicht jedoch entfernt, beginnt die Folie unter Wasseraufnahme aufzuquellen [4, S. 74 f.]. Dann kann der rote Farbstoff, welcher gut wasserlöslich ist, aus der Cellophan-Schicht herausdiffundieren. Die nachfolgende Abbildung zeigt den dreischichtigen Aufbau der Folie. Die Schutzfunktion der beiden Lackschichten wird deutlich (Abb. 74).

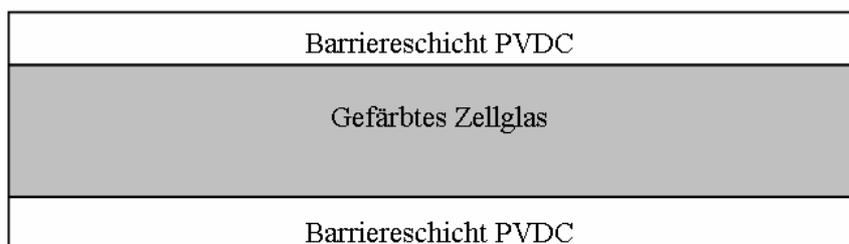


Abbildung 74: Querschnitt durch eine beidseitig beschichtete Babybel-Folie

### Hinweis:

Will man eine noch weiter gehende Entfärbung der lackfreien Folien erreichen, muss man den beschriebenen Versuch mit dest. Wasser wiederholen.

### Entsorgung:

- Die Farbstofflösung setzt man in Versuch V 2.12.3 ein oder gibt sie in den Ausguss.
- Die entfärbten Folien setzt man im Hydrolyseversuch ein (V 2.8.2).

Literatur: [3], [18]

## **V 2.12.3: Selektive Färbung von PET mit dem roten Farbstoff aus der Babybel-Folie**

SV, S II

### Geräte:

Schere, Heizrührer, Rührstäbchen, Pinzette aus Kunststoff, Becherglas (150 mL), Kristallierschale (Durchmesser ca. 5 cm), Polyethylen-Flasche mit Schraubverschluss (100 mL), Trichter

### Chemikalien:

Obstschalen aus PET, PS, PP; verdünnte Natronlauge ( $c = 2 \text{ mol/L}$ ; ätzend, C), Farbstoff-Lösung aus der roten Cellophan-Folie von Babybel<sup>®</sup>-Käse (aus V 2.12.2)

### Versuchsdauer:

Vorbereitung der Kunststoffproben: 20 min, Färbung der Kunststoff-Proben: 10 min

### Durchführung:

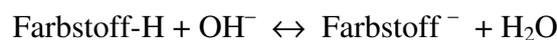
- Aus verschiedenen Obstschalen (PET, PS und PP) werden mit der Schere quadratische Stücke (ca.  $4 \text{ cm}^2$ ) ausgeschnitten. Die Stücke werden für ca. 20 min in eine Kristallierschale gelegt, welche 0,5 cm hoch mit Natronlauge gefüllt ist.
- Die Kunststoffproben werden mit einer Pinzette aus der Natronlauge herausgenommen und direkt in die Farbstofflösung überführt, welche man unter Rühren zum Sieden erhitzt (Becherglas). Darin werden die Kunststoffproben für ca. 10 min belassen. Danach werden sie mit der Pinzette herausgenommen und unter kaltem Wasser abgespült.

### Beobachtung:

PET erscheint hellblau, PS und PP hingegen farblos.

### Deutung:

Der Farbstoff selbst erscheint in wässriger Lösung bei pH 14 violett. Im Alkalischen ist folgende Reaktion zu erwarten (schematisierte Darstellung):



Er kann polare makromolekulare Verbindungen wie PET einfärben.

### Entsorgung:

Natriumhydroxid-Lösung: Zu Säuren und Laugen

Rote Farbstofflösung: Für weitere Färberversuche in einer Polyethylen-Flasche mit Schraubverschluss aufbewahren oder zu Säuren und Laugen geben

## V 2.13: Nachweis von Titandioxid im weißen Joghurtbechern

SV, S II

### Geräte:

Schere, Waage, Porzellantiegel (d = 3,6 cm), Tondreieck, Dreifuß, Brenner, Tiegelzange, Messzylinder (25 mL), Glasstab, Reagenzglas, Reagenzglasständer, kleiner Glastrichter, Faltenfilter, Abzug

### Chemikalien:

Joghurtbecher (weiß) aus Polystyrol oder Polypropylen, Kaliumhydrogensulfat (ätzend, C), verdünnte Schwefelsäure (c = 1 mol/L; ätzend, C), Wasserstoffperoxid-Lösung (w = 3 %; ätzend, C) in Kunststoff-Tropfflasche

Versuchsdauer: 20 min

### Versuchsdurchführung:

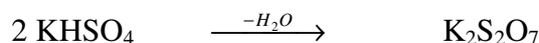
- In einen Porzellantiegel wiegt man 1 g Kaliumhydrogensulfat ein. Vom Joghurtbecher werden 0,25 g ausgeschnitten, in Stücke von ca.  $\frac{1}{2}$  cm<sup>2</sup> zerkleinert und ebenfalls in den Porzellantiegel überführt.
- Unter dem Abzug wird der Porzellantiegel mit dem Brenner auf mäßige Rotglut erhitzt, bis im Porzellantiegel eine klare Schmelze sichtbar wird. (Zu Beginn des Erhitzens verbrennt der Kunststoff, eventuell starke Rußbildung.)
- Nach dem Abkühlen gießt man 5 mL Schwefelsäure auf den Schmelzkuchen, welcher sich im Porzellantiegel abgesetzt hat. Mit einem Glasstab wird so lange umgerührt, bis sich ein möglichst großer Anteil des Schmelzkuchens aufgelöst hat.
- Der Inhalt des Porzellantiegels wird abfiltriert, das Filtrat in ein Reagenzglas überführt. Anschließend wird das Filtrat mit einigen Tropfen Wasserstoffperoxid-Lösung versetzt.

### Beobachtung:

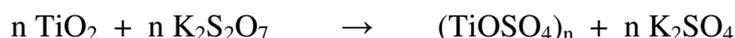
Bei Zutropfen der Wasserstoffperoxid-Lösung entsteht eine gelborange Färbung.

### Deutung:

Beim Verbrennen des Kunststoffes bleibt TiO<sub>2</sub> im Porzellantiegel zurück. Beim Erhitzen von Kaliumhydrogensulfat entsteht unter Wasserabspaltung zunächst Kaliumdisulfat:



Dieses reagiert mit Titandioxid zu Titanoxidsulfat:



In wässriger Lösung bildet Titanoxidsulfat komplexe [Ti(OH)<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>4</sub>]<sup>2+</sup>-Ionen. Schon mit Spuren von Wasserstoffperoxid bildet sich das gelborange gefärbte Peroxotitanylion TiO<sub>2</sub><sup>2+</sup> (aq) [157, S. 153], [116, S. 300].



Entsorgung: Filtrat zu den anorganischen Abfällen mit Schwermetallsalzen, unlösliche Stoffe zu den Feststoffabfällen bzw. Filterrückständen

Literatur: [126], [116], [157, S. 153]

## **V 2.14: Untersuchung der Struktur eines Flaschenkorkens und eines Styropor-Stückes**

SV, S II

### Material:

Mikroskop und Zubehör, Rasierklinge, spitze Pinzette, ggf. Mikro-PC-Okular, 2 Bechergläser (50 mL und 100 mL)

### Chemikalien:

Flaschenkorken (aus der Rinde der Korkeiche hergestellt), flache Styropor-Schale (z.B. von einer Käseverpackung), Aceton (leicht entzündlich, F; gesundheitsschädlich, Xn), Ethanol (leicht entzündlich, F), Sudanrot (0,01 g Sudanrot in 5 mL Ethanol lösen)

Versuchsdauer: Mikroskopieren 20 min, Nachweisreaktionen 10 min

### Versuchsdurchführung (Teil 1):

- Mit einer Rasierklinge werden sehr dünne Schichten des jeweiligen Materials abgeschnitten. Diese Proben werden mit Hilfe einer spitzen Pinzette auf einen Objektträger gelegt und mit einem Deckglas abgedeckt. (Wasser wird hierbei nicht benötigt.)
- Man betrachtet die Strukturen bei 200-facher oder 400-facher Vergrößerung.
- Bei Bedarf kann das Okular durch ein Mikro-PC-Okular ersetzt werden.

### Versuchsdurchführung (Teil 2):

- Mehrere Styropor-Stücke werden in ein 100 mL-Becherglas gestellt, welches 2 cm hoch mit Aceton befüllt ist.
- Ein 50 mL-Becherglas wird 2 cm hoch mit Ethanol befüllt. Man fügt eine kleine Spatelspitze Sudanrot hinzu, schwenkt um und stellt einen Flaschenkorken hinein.

### Ergebnisse (Teil 1):

Beide Strukturen weisen kleine Hohlräume bzw. Zellen auf. Dabei fällt sofort auf, dass die Hohlräume im Styropor wesentlich größer als die im Flaschenkorken sind. Außerdem sind die Hohlräume im Styropor länglich und unregelmäßig gestaltet, während die Zellen des Flaschenkorkens eine kompakte Gestalt mit relativ dicken Wänden besitzen. Diese Strukturen lassen sich in den nachfolgenden Aufnahmen erkennen (Abb. 75, Abb. 76).

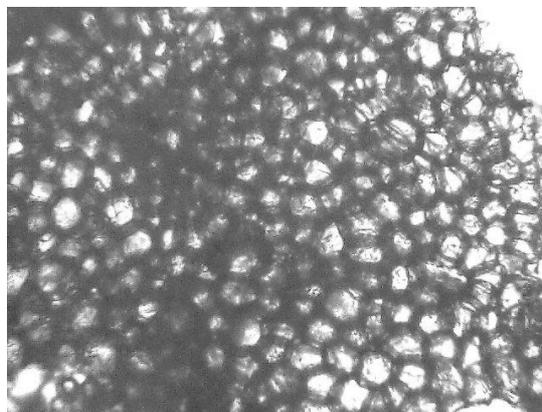


Abbildung 75: Lichtmikroskopische Aufnahme eines dünnen Schnittes durch einen Flaschenkorken

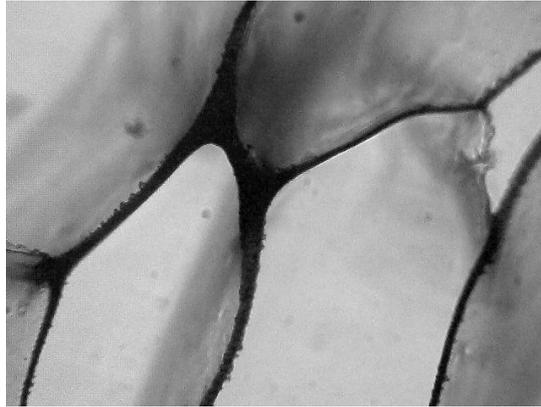


Abbildung 76: Lichtmikroskopische Aufnahme eines dünnen Schnittes durch ein Styropor-Stück bei gleicher Vergrößerung

### Ergebnisse (Teil 2):

- Wenn Styropor in Aceton gestellt wird, löst es sich sofort auf.
- Wenn ein Flaschenkorken in die alkoholische Sudanrot-Lösung gestellt wird, tritt an der Außenfläche sofort eine Rotfärbung auf.

### Auswertung:

Beide Materialien fangen auf Grund ihrer Hohlräume Stöße auf und verformen sich unter Druck. Während Styropor zur Verpackung druckempfindlicher Füllgüter eingesetzt wird, fügen sich Korken unter großem Druck sehr dicht der Mündung der Weinflasche an, ohne das Glas dabei zu beschädigen. Für eine derartige Verwendung als Flaschenverschluss ist Styropor nicht geeignet, da es zu weich ist und zu wenig Festigkeit besitzt. Bereits bei geringer mechanischer Belastung besteht das Risiko, dass kleine Styropor-Partikel freigesetzt werden und das Lebensmittel verunreinigen oder dass der Verschluss verletzt wird.

Kork wird ausschließlich von der Kork-Eiche (*Quercus suber*) gebildet. Es handelt sich um abgestorbene Zellen, die hohl und damit luftgefüllt sind. Der im Kork enthaltene hochmolekulare Stoff Suberin wird mit Sudanrot kräftig gelbrot gefärbt [158].

Die Instabilität von Styropor gegenüber Aceton lässt sich auf Quellungsvorgänge in dem amorphen expandierten Kunststoff zurückführen.

Entsorgung: Reste der beiden Materialien gibt man zum Hausmüll, Aceton und Ethanol zu den organischen Lösungsmitteln

Literatur: [138, S. 2341 f.], [158]

## **V 2.15: Mechanische Stabilität / Elastizitätsmodul verschiedener Folien**

SV, S II

### Vorbemerkung:

Es werden Elastizitätsmessungen durch Zugversuche mit dem Ziel der Erstellung eines Spannungs/Dehnungs-Diagramms durchgeführt. „Der Elastizitätsmodul  $E$ “ ... „ist ein Maß für die Steifigkeit des Materials, d.h. für den Widerstand gegen Verformung. Je höher der  $E$ -Modul, desto mehr Spannung muss bei der Verformung aufgebracht werden“ [19, S. 252]. Dabei gelten folgende Definitionen:

Anfangslänge  $l_0$

Längenänderung  $\Delta l$

Dehnung  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

Spannung  $\sigma = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} = E \times \varepsilon$

Elastizitätsmodul  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

Nur bei sehr kleinen Verformungen gilt dieses Gesetz nach Hooke [19, S. 251]. Im Diagramm soll die Spannung  $\sigma$  gegen die Dehnung  $\varepsilon$  aufgetragen werden [159, Folie 9]. Der Elastizitätsmodul kann in der Einheit  $\text{N} / \text{mm}^2$  angegeben werden [24, S. 131].

Folgende Materialien wurden untersucht:

- ein PP-Beutel mit der Dicke  $40 \mu\text{m}$
- ein Milchschauch PE-LD („Bergland“) mit der Dicke  $75 \mu\text{m}$ .
- eine Frischhaltefolie aus PE-LD („Toppits“) mit der Dicke  $12 \mu\text{m}$
- eine Aluminiumfolie ( $14 \mu\text{m}$ )
- eine Käsefolie (PA/PE)

#### Material:

Schere, Lineal oder Zollstock, Mikrometerschraube, Hobelbank mit Einklemmvorrichtung für Werkstücke (Alternativ: Kunststoff-Eimer mit Sand und einer Aufhängevorrichtung an der Decke), Kraftmesser, 2 Schlauchklemmen (Quetschhahn nach Hofmann mit aufklappbarem Steg), dicke stabile Drähte zur Befestigung der Schlauchklemmen bzw. der Federwaage an der Hobelbank (alternativ am Kunststoff-Eimer mit Sand und der Aufhängevorrichtung an der Decke)

#### Chemikalien:

Beutel aus Polypropylen (PP,  $40 \mu\text{m}$ ), Milchschauch aus Polyethylen geringer Dichte (PE-LD), Frischhaltefolie „Toppits“ (PE-LD,  $12 \mu\text{m}$ ), gewöhnliche Aluminiumfolie, Käsefolie (PA/PE).

Versuchsdauer: Pro Materialprüfung ca. 15 min

#### Versuchsaufbau:

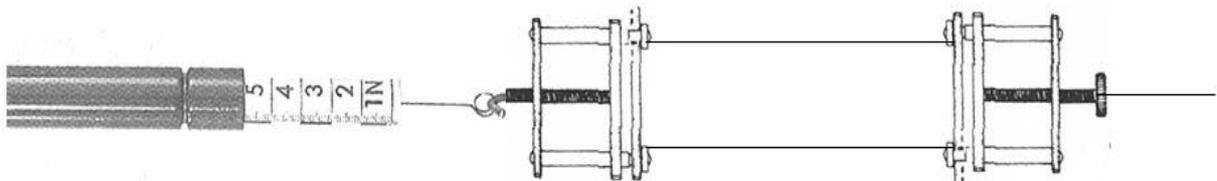


Abbildung 77: Die Testfolie wird von zwei Schlauchklemmen gehalten. Die rechte Schlauchklemme ist direkt über einen stabilen Draht mit einem Eisenbolzen der Hobelbank verbunden, bei der linken Schlauchklemme ist ein Kraftmesser dazwischengeschaltet.

### Versuchsdurchführung:

- Mit einer Mikrometerschraube wird die Foliendicke gemessen. Aus der Folie wird ein Stück mit der Breite  $b = 2 \text{ cm}$  ausgeschnitten (Länge mindestens  $10 \text{ cm}$ ).
- Der Folienstreifen wird nach Abmessung der gewünschten Anfangslänge  $l_0$  in der Nähe der beiden Enden jeweils fest in einer Schlauchklemme befestigt. An eine der beiden Schlauchklemmen wird eine Federwaage als Kraftmesser eingehängt.
- Auf der Hobelbank (Schreinerwerkstatt) wird der Kraftmesser einerseits und die gegenüberliegende Schlauchklemme andererseits so befestigt, dass die ganze Anordnung auseinander gezogen werden kann. Dabei werden schrittweise die Kraft und die zugehörige Längenänderung ermittelt.
- Nach Einstellung der Spannung wird jeweils  $10 \text{ s}$  lang gewartet, bevor das Wertepaar abgelesen wird. Die Versuche werden stets bis zum Reißen der Probe durchgeführt.

### Versuchsergebnisse:

Teil a: Als Beispiel werden in Tab. 58 Dehnungswerte aufgeführt, die mit dem Material eines Beutels aus Polypropylen erhalten werden.

PP-Beutel ( $40 \mu\text{m}$ ):  $b = 2 \text{ cm}$   $l_0 = 6,4 \text{ cm}$   $t = 10 \text{ s}$

Tabelle 58: Ermittlung der Spannung  $\sigma$  und der Dehnung  $\varepsilon$  zur Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms eines PP-Beutels ( $40 \mu\text{m}$ ). Die fett gedruckten Wertepaare wurden in das Diagramm (Abb. 78) aufgenommen.

Kraft (N)	Längenänderung $\Delta l$ (cm)	Fläche ( $\text{cm}^2$ )	Spannung $\sigma$ ( $\text{N} / \text{cm}^2$ )	Dehnung $\varepsilon$ $\Delta l / l_0$
0	0	12,8	0	0
1	0	12,8	0,078	0
2	0	12,8	0,156	0
3	0	12,8	0,234	0
4	0	12,8	0,313	0
5	0	12,8	0,391	0
6	0	12,8	<b>0,469</b>	<b>0</b>
7	0,1	13,0	0,538	0,016
8	0,1	13,0	0,615	0,016
9	0,1	13,0	0,692	0,016
10	0,1	13,0	0,769	0,016
11	0,1	13,0	0,846	0,016
12	0,1	13,0	0,923	0,016
13	0,1	13,0	1,000	0,016
14	0,1	13,0	1,077	0,016
15	0,1	13,0	1,154	0,016
16	0,1	13,0	1,231	0,016
17	0,1	13,0	1,308	0,016
18	0,1	13,0	<b>1,385</b>	<b>0,016</b>
19	0,2	13,2	1,439	0,031
20	0,2	13,2	1,515	0,031
21	0,2	13,2	1,591	0,031
22	0,2	13,2	1,667	0,031
23	0,2	13,2	<b>1,742</b>	<b>0,031</b>
24	0,4	13,6	1,765	0,063
25	0,4	13,6	<b>1,838</b>	<b>0,063</b>

Kraft (N)	Längenänderung $\Delta l$ (cm)	Fläche ( $\text{cm}^2$ )	Spannung $\sigma$ ( $\text{N} / \text{cm}^2$ )	Dehnung $\varepsilon$ $\Delta l / l_0$
26	0,5	13,8	1,884	0,078
27	0,6	14,0	1,929	0,094
28	0,6	14,0	2,000	0,094
29	0,7	14,2	<b>2,042</b>	<b>0,109</b>
30	0,8	14,4	2,083	0,125
31	0,8	14,4	2,153	0,125
32	0,9	14,6	2,192	0,141
33	1,1	15,0	<b>2,200</b>	<b>0,172</b>
34	1,2	15,2	2,237	0,188
35	1,3	15,4	<b>2,273</b>	<b>0,203</b>
36	1,5	15,8	2,278	0,234
37	1,6	16,0	2,313	0,250
38	1,7	16,2	2,346	0,266
39	1,8	16,4	2,378	0,281
40	1,9	16,6	<b>2,410</b>	<b>0,297</b>
41	2,1	17,0	2,412	0,328
42	2,2	17,2	2,442	0,344
43	2,6	18,0	<b>2,389</b>	<b>0,406</b>
44	2,8	18,4	2,391	0,438
45	2,9	18,6	2,419	0,453
46	3,1	19,0	2,421	0,484
47	3,2	19,2	<b>2,448</b>	<b>0,500</b>
48	3,3	19,4	2,474	0,516
49	3,4	19,6	2,500	0,531
50	3,7	20,2	2,475	0,578
51	3,9	20,6	<b>2,476</b>	<b>0,609</b>
52	4,0	20,8	2,500	0,625
53	4,1	21,0	2,524	0,641
54	4,4	21,6	2,500	0,688
55	4,6	22,0	<b>2,500</b>	<b>0,719</b>
56	4,7	22,2	2,523	0,734
57	4,9	22,6	2,522	0,766
58	5,1	23,0	<b>2,522</b>	<b>0,797</b>
59	5,3	23,4	2,521	0,828
60	5,4	23,6	2,542	0,844
61	5,6	24,0	2,542	0,875
62	5,9	24,6	<b>2,520</b>	<b>0,922</b>
63	6,0	24,8	2,540	0,938
64	Riss	-----	-----	-----

Teil b: Als weiteres Beispiel werden in Tab. 59 Dehnungswerte aufgeführt, die mit dem Material eines Milchschauchs aus PE-LD erhalten werden.

Milchschauch PE-LD     $b = 2,0 \text{ cm}$ ,     $l_0 = 4,0 \text{ cm}$ ,     $t = 10 \text{ s}$

Tabelle 59: Ermittlung der Spannung  $\sigma$  und der Dehnung  $\varepsilon$  zur Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms eines Milchschauchs („Bergland“, PE-LD, 75  $\mu\text{m}$ ). Die fett gedruckten Wertepaare wurden in das Diagramm (Abb. 78) aufgenommen.

Kraft (N)	Längenänderung $\Delta l$ (cm)	Fläche ( $\text{cm}^2$ )	Spannung $\sigma$ ( $\text{N} / \text{cm}^2$ )	Dehnung $\varepsilon$ $\Delta l / l_0$
0	0,0	8,0	0,00	0,000
2	0,0	8,0	<b>0,25</b>	<b>0,000</b>
3	0,3	8,6	0,35	0,075
4	0,3	8,6	0,47	0,075
5	0,3	8,6	<b>0,58</b>	<b>0,075</b>
6	0,4	8,8	0,68	0,100
7	0,4	8,8	0,80	0,100
8	0,4	8,8	<b>0,91</b>	<b>0,100</b>
10	0,5	9,0	<b>1,11</b>	<b>0,125</b>
11	0,6	9,2	1,20	0,150
12	0,6	9,2	<b>1,30</b>	<b>0,150</b>
13	0,7	9,4	<b>1,38</b>	<b>0,175</b>
14	1,1	10,2	<b>1,37</b>	<b>0,275</b>
15	1,8	11,6	<b>1,29</b>	<b>0,450</b>
16	3,2	14,4	<b>1,11</b>	<b>0,800</b>
17	Dehnung und Riss	-----	-----	-----

Im nachfolgenden Diagramm (Abb. 78) wird die Spannung  $\sigma$  gegen die Dehnung  $\varepsilon$  aufgetragen. Es zeigt sich deutlich, dass der Elastizitätsmodul für den Beutel aus Polypropylen (PP) größer ist als für den Milchschauch. Der Milchschauch aus PE-LD hingegen zeigt schon bei geringen Kräften eine gute Dehnbarkeit. Ab einem bestimmten Dehnungsgrad lässt die Spannung wieder nach, bevor es zum Riss kommt. Bei dem PP-Beutel (Abb. 78) zeigt sich anfangs nur eine ziemlich geringe Dehnungsfähigkeit. Es schließt sich ein fast waagerechter Bereich an, in welchem wiederum bei minimaler Erhöhung der Kraft eine deutliche Dehnung erreicht werden kann.

Spannungs-Dehnungs-Diagramm a) PP-Beutel  
(oben) b) Milchschauch (unten)

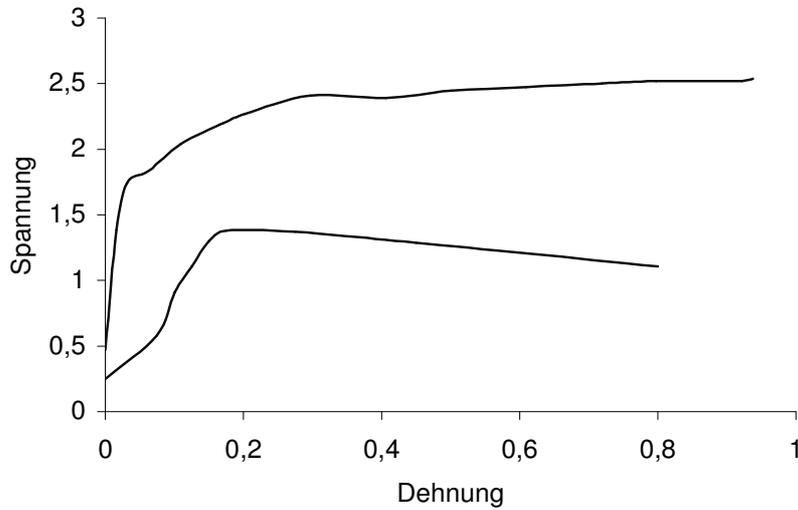


Abbildung 78: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Beutels aus Polypropylen (40  $\mu\text{m}$ ) und eines Milchschauchs („Bergland“, PE-LD) mit der Dicke 75  $\mu\text{m}$ .

Versuchsergebnisse:

Teil c: Als Beispiel werden in Tab. 60 Dehnungswerte aufgeführt, die mit dem Material einer Frischhaltefolie (PE-LD) erhalten werden.

Frischhaltefolie PE-LD 12  $\mu\text{m}$  („Toppits“)  $b = 2,0 \text{ cm}$ ,  $l_0 = 4,1 \text{ cm}$

Tabelle 60: Ermittlung der Spannung  $\sigma$  und der Dehnung  $\varepsilon$  zur Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms einer Frischhaltefolie PE-LD 12  $\mu\text{m}$  („Toppits“). Das dazugehörige Diagramm ist in Abb. 79 dargestellt.

Kraft (N)	Längenänderung $\Delta l$ (cm)	Fläche ( $\text{cm}^2$ )	Spannung $\sigma$ ( $\text{N} / \text{cm}^2$ )	Dehnung $\varepsilon$ $\Delta l / l_0$
0	0,0	8,2	0,000	0,000
1	0,1	8,4	0,119	0,024
2	0,3	8,8	0,227	0,073
3	0,5	9,2	0,326	0,122
4	0,7	9,6	0,417	0,171
5	0,9	10,0	0,500	0,220
6	1,1	10,4	0,577	0,268
7	1,3	10,8	0,648	0,317
8	1,7	11,6	0,690	0,415
8	1,9	12,0	0,667	0,463
8	2,1	12,4	0,645	0,512
Riss				

Teil d): Als Beispiel werden in Tab. 61 Dehnungswerte aufgeführt, die mit einer Aluminiumfolie erhalten werden.

Aluminiumfolie (14  $\mu\text{m}$ )       $b = 2,0 \text{ cm}$ ,       $l_0 = 7,4 \text{ cm}$

Tabelle 61: Ermittlung der Spannung  $\sigma$  und der Dehnung  $\varepsilon$  zur Erstellung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms einer gewöhnlichen Aluminiumfolie (14  $\mu\text{m}$ ). Das dazugehörige Diagramm ist in Abb 79 dargestellt.

Kraft (N)	Längenänderung $\Delta l$ (cm)	Fläche ( $\text{cm}^2$ )	Spannung $\sigma$ ( $\text{N} / \text{cm}^2$ )	Dehnung $\varepsilon$ $\Delta l / l_0$
0	0,0	14,8	0,000	0,000
1	0,1	15,0	0,0666	0,0135
2	0,1	15,0	0,133	0,0135
3	0,2	15,2	0,197	0,027
4	0,2	15,2	0,263	0,027
5	0,2	15,2	0,329	0,027
6	0,2	15,2	0,395	0,027
7	0,2	15,2	0,461	0,027
8	0,2	15,2	0,526	0,027
9	0,2	15,2	0,592	0,027
10	0,2	15,2	0,658	0,027
11	0,2	15,2	0,724	0,027
12	0,2	15,2	0,789	0,027
13	0,2	15,2	0,855	0,027
14	0,2	15,2	0,921	0,027
15	0,2	15,2	0,987	0,027
16	0,2	15,2	1,053	0,027
17	0,2	15,2	1,118	0,027
18	0,2	15,2	1,184	0,027
19	0,2	15,2	1,250	0,027
20	0,2	15,2	1,316	0,027
21	----	----	----	-----

Besonders die Frischhaltefolie aus PE-LD zeigt schon bei geringen Kräften eine gute Dehnbarkeit. Ab einem bestimmten Dehnungsgrad lässt die Spannung wieder nach, bevor es zum Riss kommt. Den höchsten Widerstand gegen Verformung zeigt hingegen die Aluminiumfolie. Diese Metallfolie lässt sich bis zum Bruch kaum dehnen (Abb. 79).

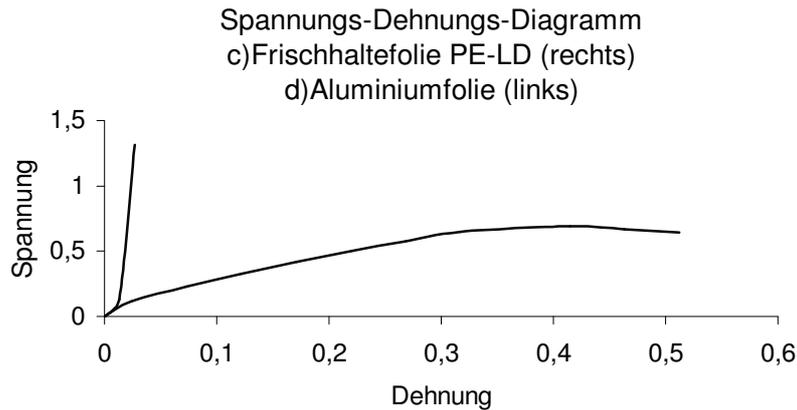


Abbildung 79: Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer Frischhaltefolie („Toppits“) und einer gewöhnlichen Aluminiumfolie

Teil e): Aus dem Material einer Käsefolie (Schlauchbeutel aus einer PA- und einer PE-Schicht) ermittelte Dehnungswerte sind im Diagramm der folgenden Abbildung 80 dargestellt.

#### Eine Käsefolie (PA/PE) und ihre Komponenten

##### Versuchsergebnisse:

Mit einer Mikrometerschraube können nun die Schichtdicken ermittelt werden. Die Gesamtdicke beträgt  $60\ \mu\text{m}$ . Die nach dem Ablösen der PA-Außenschicht zurückbleibende PE-LD-Innenschicht weist eine Dicke von  $47\ \mu\text{m}$  auf. Die PA-Schicht ist  $13\ \mu\text{m}$  dick. Die nachfolgende Abbildung 80 zeigt, dass Polyamid (PA) den entscheidenden Anteil am Elastizitätsmodul hat. Die Innenschicht aus PE-LD hingegen zeigt schon bei geringen Kräften eine gute Dehnbarkeit. Ab einem bestimmten Dehnungsgrad lässt die Spannung wieder nach, bevor es zum Riss kommt.

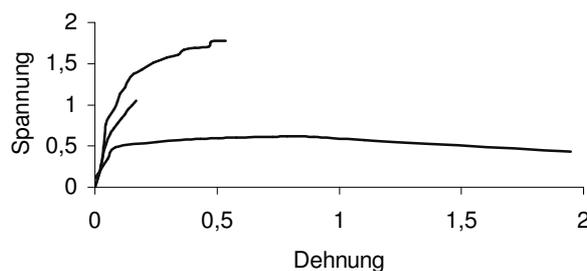


Abbildung 80: Spannungs-Dehnungs-Diagramme einer Käsefolie und ihrer Bestandteile: Unbehandelte PA/PE-Käsefolie (links), PA (Mitte) und PE-LD (rechts)

##### Auswertung:

Bei den beiden Materialien aus PE-LD Frischhaltefolie (Abb. 79) und Milchschauch (Abb. 78) zeigt sich deutlich ein Scheitelpunkt (Streckspannung, Streckdehnung). Bevor dieser erreicht wird, liegt ein elastischer Abschnitt vor. Hier lässt sich das Gesetz nach Hooke anwenden. Beim Überschreiten des Scheitelpunktes gleiten die Makromoleküle auseinander, wobei die Spannung wieder abnimmt. Beide Thermoplaste sind als teilkristallin einzuordnen [19, S. 251]. Beim PP-Beutel zeigt sich nach einem stärkeren Widerstand gegen Verformung eine Veränderung der Steifigkeit. Ist dieser Punkt der Streckspannung erreicht, so gleiten die Makromoleküle auseinander (Abb. 78). Metalle (Aluminium) zeigen hingegen nur eine

geringfügige Dehnbarkeit, da das Auseinandergleiten der positiven Atomrümpfe im Metallgitter nicht möglich ist (Abb. 79). Auch Polyamid zeigt kaum Dehnbarkeit bei Kräfteinwirkung (Abb. 80). In diesem Kunststoff verhindern besonders Wasserstoff-Brücken und Dipol-Dipol-Kräfte ein Auseinandergleiten der Makromoleküle.

Literatur: [19], [24], [159]

### **V 2.16.1: Messung der von einer Schrumpffolie beim Erwärmen erzeugten Kraft**

SV, S I

#### Material:

Schere, Lineal, Schrumpffolie (Streifen 3 cm x 25 cm,  $d = 19 \mu\text{m}$ ), 2 Schlauchklemmen (Quetschhahn nach Hofmann, Breite 2 bis 3 cm), Blumendraht, 2 Stative, 1 Doppelmuffe, 1 Stativklemme, 1 kleiner Wagen (ca. 3 cm hoch, Physiksammlung), kleiner Holzklotz (3 cm hoch, 10 cm lang, 5 bis 10 cm breit), 1 Kraftmesser (Federwaage bis 1 N), Fön

Dauer: 20 min

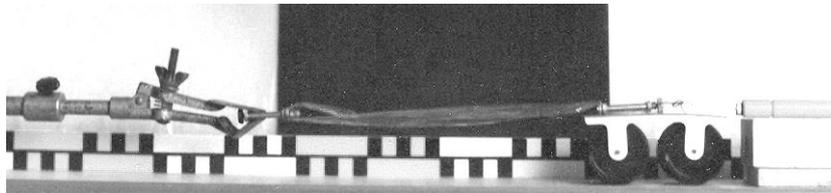


Abbildung 81: Versuchsaufbau zu V 2.16.1 (seitliche Ansicht, Zustand vor dem Erhitzen der Folie). Die Folie (vor schwarzem Hintergrund) ist an zwei Schlauchklemmen befestigt.

#### Versuchsdurchführung:

- Von der Folie wird ein 3 cm breites und 25 cm langes Stück abgeschnitten. Dieses wird in zwei Schlauchklemmen befestigt, so dass deren Abstand ca. 20 cm beträgt.
- Eine der Schlauchklemmen wird in eine Stativklemme gespannt, die andere mit dem Drahhaken eines Kraftmessers verbunden (z.B. mit Blumendraht). Stativklemme und Kraftmesser werden jeweils in geeigneter Weise an einem Stativ befestigt.
- Den Kraftmesser legt man auf einen kleinen Holzklotz, die benachbarte Schlauchklemme hingegen auf einen kleinen Wagen, damit die Feder keine zu starke Auslenkung erfährt. Dann werden alle verstellbaren Teile in die Ausgangsstellung gebracht, also der Kraftmesser auf 0,0 N eingestellt. Dabei sollte der Kunststoffstreifen unter leichter Spannung stehen.
- Der ca. 20 cm lange Kunststoffstreifen wird mit einem Fön (höchste Stufe) erwärmt, bis keine Schrumpfung mehr erfolgt. Dann wird die Auslenkung am Kraftmesser abgelesen.

#### Versuchsergebnis:

Die Folie mit  $d = 19 \mu\text{m}$  schrumpft und entwickelt eine Kraft von etwa 0,5 N. Nach diesem Vorgang hat die Folie eine verkleinerte Fläche und sieht gewellt aus. In den beiden folgenden Abbildungen (Abb. 82 und Abb. 83) sind der Zustand der Folie nach dem Erhitzen und die Auslenkung des Kraftmessers dargestellt.

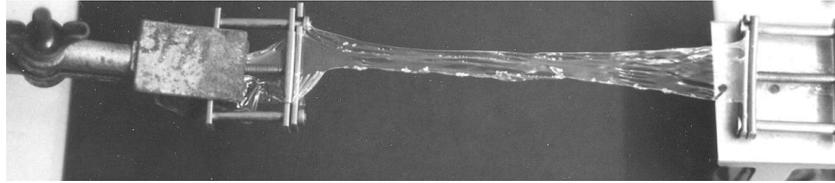


Abbildung 82: Durch das Erhitzen mit dem Föhn ist die Folie geschrumpft. Dadurch wurde der Wagen mit der darauf liegenden Schlauchklemme nach links gezogen.

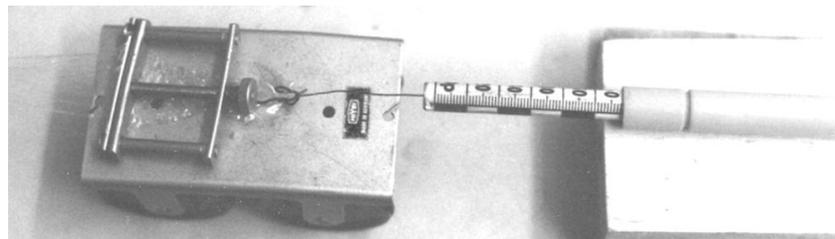


Abbildung 83: Der Kraftmesser wurde durch den Schrupfvorgang ausgelenkt. Das Bild zeigt auch, dass der Kraftmesser mit einem dünnen Draht mit der Schlauchklemme verbunden ist. Die nach dem Erhitzen gespannte Folie ist links im Bild zu erkennen.

#### Deutung:

Allgemein erfolgt der Gebrauch einer Schrupfverpackung durch Auf- oder Anshrupfen einer vorgereckten thermoplastischen Folie an das Packgut durch Erwärmen. Es können prinzipiell alle Thermoplaste, die mono- oder biaxial reckbar und deren so erzeugte Spannungen einfrierbar sind eingesetzt werden. In der Praxis verwendet man PE-Typen und Copolymere, PP, PET, PVC und PVDC. Der Schrupfbereich der Folien liegt meist zwischen 70 °C und 120 °C. Die Umschrumpfung des Packguts kann als Banderol- oder als Vollschrumpfhülle ausgeführt werden. Dabei legt sich die Folie als straffe Haut eng um das Packgut. Zur Verpackung von temperaturempfindlichen Lebensmitteln stehen auch Schrupffolien zur Verfügung, die sich bereits bei + 80 bis + 85 °C an das Füllgut anlegen.

#### Hinweis:

Man kann auch versuchen, eine bereits eingesetzte Schrupffolie zu aktivieren. Dazu schneidet man aus einer Schrupffolie, die als Umverpackung für kleine Getränkekartons dient (z.B. „Hohes C“) ein etwa 10 cm breites und 15 bis 18 cm langes Stück aus. Dieses Stück faltet man in Längsrichtung unter Einrollen zusammen, so dass man einen flach gedrückten mehrlagigen Folienstreifen erhält, der 2 bis 2,5 cm breit und 15 bis 18 cm lang ist. Man versucht nun, den Folienstreifen zu strecken, während eine zweite Person den Föhn darauf hält und die Folie erwärmt. Wenn man gerade den Folienstreifen auf ca. 20 bis 22 cm Länge gedehnt hat, hält man ihn sofort unter kaltes Wasser. Man trocknet den Folienstreifen ab und spannt ihn nach obiger Versuchsanleitung mit den beiden Schlauchklemmen in die beschriebene Versuchsanordnung ein. Man erhitzt mit dem Föhn 5 Sekunden lang.

Mit diesen bereits gebrauchten Schrupffolien konnte nur eine Kraft von ca. 0,1 N nachgewiesen werden. Durch die Mehrlagigkeit der Folie wird ein Reißen während des Dehnens unter Erwärmung vermieden.

Literatur: [4, S. 82], [11, S. 125–127]

## V 2.16.2: Thermische Stabilität verschiedener Thermoplaste (PS, PP und PET)

LV, S I

### Materialien:

Trockenschrank mit Thermometer, Aluminiumfolie

### Chemikalien:

Flaschen und Becher aus verschiedenen thermoplastischen Kunststoffen (Joghurtbecher aus PS und PP, Getränkeflasche aus PET)

Versuchsdauer: 90 min

### Versuchsdurchführung:

- Die Kunststoffbehälter werden im Trockenschrank auf den Rost gestellt, auf dem ein Stück Aluminiumfolie ausgebreitet wurde. Der Trockenschrank wird zunächst auf 60°C aufgeheizt.
- Dann wird die Temperatur jeweils in 10°C-Schritten erhöht. 5 Minuten nach jeder Temperaturerhöhung überprüft man den Zustand der Kunststoff-Behälter (erste Anzeichen von Instabilität, Formverlust).

### Versuchsergebnisse:

Joghurt-Becher (PS): Die Erweichung beginnt bei 120°C, der völlige Verlust der Form bei 140°C. Es bleibt eine runde Scheibe zurück.

Joghurt-Becher (PP): Bei 160 °C beginnt die Deformation, bei 170 °C tritt völlige Instabilität ein.

Getränkeflasche, Mehrweg, 0,5 Liter (PET): Es zeigt sich eine zunehmende Kontraktion des Materials, wobei jedoch die Grundform erhalten bleibt. Auffällig ist aber, dass das Gewinde ab 130°C weiß wird. Seine Größe ändert sich aber nicht sonderlich, so dass der Schraubverschluss auch nach dem Erhitzen auf 230 °C noch passt.

### Auswertung:

Die Erweichungstemperaturen von PS und PP unterscheiden sich deutlich, wie Tab. 62 zeigt. „Während Polystyrol bereits bei Temperaturen von 100 °C seine Festigkeit verliert, behalten Produkte aus Polypropylen auch noch bei kurzzeitigem Erhitzen auf über 140 °C ihre Stabilität bei“. Dies wird in folgender Tabelle verdeutlicht.

Tabelle 62: Thermisches Verhalten einiger thermoplastischer Kunststoffe (PS, PP und PET). Die Literaturwerte sind entnommen aus [95, S. 45].

Thermoplastischer Kunststoff	Erweichungs- bzw. Schmelzbereich	
	Mit Trockenschrank ermittelt	Literaturwert [95, S. 45]
PS (Joghurtbecher)	120 – 140 °C (schrumpft)	70 – 115 °C
PP (Joghurtbecher)	160 – 170 °C	160 – 170 °C
PET (Getränkeflasche)	Flaschenform bleibt erhalten, Schmelzvorgang noch nicht zu beobachten (schrumpft)	250 – 260 °C

Bei PS handelt es sich um einen amorphen Kunststoff, während PP und PET teilkristalline Strukturen haben [18, S. 28] (Glastemperaturen  $T_g$ : PET -50 °C, PP -18 °C und PS zwischen

+90 und +100 °C [19, S. 86], [24, S. 125]). Die Glas- bzw. Einfriertemperaturen können als Charakteristikum von Polymeren dienen. Es handelt sich um „die Temperaturen, bei denen bestimmte Molekülsegmente beweglich werden, ohne dass bereits ganze Molekülketten aneinander vorbei gleiten können und dadurch das viskose Fließen beginnt“ [95, S. 41]. Somit liegt bei den amorphen Thermoplasten (PS) im „hartelastischen Zustand“ bzw. „Glaszustand“, während bei den teilkristallinen Thermoplasten (PET) der Einsatzbereich oberhalb der Glas temperatur liegt und damit dem „zähelastischen“ bzw. „weichplastischen“ Zustand zuzuordnen sind [95, S. 35], [82, S. 231]. Letzteres gilt auch für PP.

Der Effekt des Schrumpfens beim Joghurtbecher (PS) und bei der Getränkeflasche (PET) ist auf das sehr schnelle Einfrieren der Kunststoff-Behälter zurückzuführen, nachdem sie durch Erwärmen einer vorläufigen Form in die letztlich gewünschte Gestalt überführt wurden. Der Joghurtbecher (PS) wird im „weichelastischen Zustand“ durch Tiefziehen mit Evakuierung aus einer kreisrunden Scheibe hergestellt. Zur Herstellung der PET-Flasche wird ein Vorformling mit bereits endgültigen Gewinde-Ausmaßen im „weichplastischen“ Zustand aufgeblasen, bis die angestrebten Dimensionen der Flasche erreicht sind.

Literatur: [4], [11], [18], [19], [24], [82], [95], [160, S. 133]

### **V 2.17: Thermisches Verhalten der Babybel-Wachsschicht: Suche nach Schmelz- und Erstarrungspunkt**

SV, S II

#### Kurzbeschreibung:

Mit Hilfe des Messprogramms der Firma Leybold CASSY®-Lab (Temperaturfühler NiCr-Ni Type K, 529676) kann bei der Wachsschicht der Käseverpackung kein Hinweis auf einen Schmelz- bzw. Erstarrungspunkt gefunden werden [161].

Ein weiterführender Versuch zeigt, dass die Wachsprobe in Ethanol sofort untertaucht. Daher muss sie eine größere Dichte als 0,789 g/cm<sup>3</sup> besitzen. Außerdem muss die Dichte geringer sein als 1,00 g/cm<sup>3</sup>, da die Wachsprobe auf Wasser schwimmt. Damit ist sichergestellt, dass es sich nicht um reines Paraffin handelt [144, S. 48-50].

Es handelt sich beim Wachsüberzug der Babybel-Verpackung offensichtlich um ein Gemisch von Paraffinen und Wachsestern verschiedener Kettenlängen. Dadurch lässt sich kein deutlich begrenzter Schmelzpunkt angeben, sondern nur ein Schmelzbereich abschätzen. Im Wachs scheinen also Komponenten vorzuliegen, deren Schmelztemperaturen sich mindestens über den Bereich zwischen 50 °C und 35 °C erstrecken. In Anlehnung an das thermische Verhalten von Kunststoffen erscheint es sinnvoll, hier von einem „Erweichungsbereich“ zu sprechen.

Literatur: [161], [144]

## 15.3 Glas

### **V 3.1: Herstellung von Glasgrieß-Suspensionen und von Glaspulver verschiedener Glassorten**

LV, S II

#### Geräte:

Brenner, Tiegelzange, Kristallisierschale (Durchmesser ca. 20 cm), 2 große Porzellanreibschalen (Durchmesser ca. 20 cm) mit Pistill, Schere, Papier, 2 Bechergläser (150 mL), 2 dar-

auf passende Uhrgläser, 2 Heizrührer, 2 Rührstäbchen, 2 PE-Flaschen mit Schraubverschluss (Weithals, 100 mL), 2 dazu passende Pulvertrichter, 2 Glasflaschen mit Schraubverschluss (Weithals, 50 mL)

Chemikalien:

Natronkalkglas (Glas einer Getränkeflasche), Borosilicatglas (3 Fiolax<sup>®</sup>-Reagenzgläser)

Sicherheitsvorschriften: Schutzbrille tragen und Reibschale abgedeckt halten!

Versuchsdauer: 60 – 120 Minuten für die Herstellung der Glasgrieß-Suspensionen

Durchführung:

Herstellung von Glaspulver aus einer Getränke-Glasflasche (Natronkalkglas):

- Eine Getränke-Glasflasche wird mit einer Tiegelzange in der Brennerflamme erhitzt und sofort in kaltes Wasser in einer Kristallisierschale getaucht. Mit den entstandenen Scherben wiederholt man diesen Vorgang.
- Kleine Scherben (maximal 2-3 cm) werden mit der Tiegelzange herausgenommen und in eine Reibschale überführt. Die Glasstücke werden mit dem Pistill zu einem möglichst feinen Pulver zerrieben. Dies geschieht am besten unter Zugabe von wenig dest. Wasser. Der Vorgang wird so lange fortgesetzt, bis man eine Menge von etwa 2 gehäuften Esslöffeln hergestellt hat.
- Um sich gegen Splitter zu schützen, scheidet man ein rundes Loch in die Mitte eines Papiers und steckt das Pistill hindurch.

Herstellung von Glaspulver aus einem Fiolax<sup>®</sup>-Reagenzglas (Borosilicatglas):

- In der zweiten Reibschale werden 3 Fiolax<sup>®</sup>-Reagenzgläser mit dem Pistill zerkleinert (ohne vorheriges Erhitzen und ohne Wasserzugabe). Zum Schutz gegen Splitter schneidet man ein rundes Loch in die Mitte eines Papiers und steckt das Pistill hindurch.
- Die Glasstücke werden zu einem möglichst feinen Pulver zerrieben.

Herstellung der beiden Glasgrieß-Suspensionen:

- Von den beiden Glaspulver-Sorten wird jeweils 1 gehäufter Esslöffel in jeweils ein mit 100 mL dest Wasser gefülltes Becherglas gegeben. Beide Suspensionen werden unter Rühren für ca. 5 min zum Sieden erhitzt (Uhrglas als Abdeckung).
- Nach dem Abkühlen wird jede der beiden Suspensionen in eine kleine PE-Flasche überführt. Die beiden PE-Flaschen mit den Suspensionen werden für die Überprüfung der elektrischen Leitfähigkeit bereitgehalten (V 3.2.1).

Aufbewahrung der trockenen Glaspulver-Sorten:

- Den verbliebenen Rest an nassem Glaspulver lässt man bis zum nächsten Tag an der Luft trocknen oder stellt ihn für 2 Stunden bei 100 °C in den Trockenschrank.
- Die Reste der beiden Glaspulver-Sorten werden in 2 Weithals-Glasflaschen oder 2 Schnappdeckelgläser überführt und für den Test auf alkalische Reaktion aufgehoben (V 3.2.2).

Entsorgung: Glasreste können mit dem Hausmüll entsorgt werden.

### V 3.2.1: Vergleich von Natronkalkglas und Borosilicat-Glas - Elektrische Leitfähigkeit der Glasgrieß-Suspensionen

SV, S II

#### Geräte:

Leitfähigkeitsprüfer (Firma Phywe), Kabel, Ampèremeter (Empfindlichkeit 1 mA), Stelltrafo, Stativmaterial

#### Chemikalien:

PE-Flasche (Weithals, 100 mL) mit Glasgrieß-Suspension aus Natronkalkglas (Flaschenglas, aus V 3.1)

PE-Flasche (Weithals, 100 mL) mit Glasgrieß-Suspension aus Borosilicatglas (Fiolax-Reagenzglas, aus V 3.1)

Versuchsdauer: 10 Minuten

#### Durchführung:

- Zunächst wird die elektrische Leitfähigkeit von dest. Wasser untersucht (Messbereich des Ampèremeters: 0 bis ca. 30 mA). Dazu wird die angelegte Wechselspannung langsam erhöht. Man achtet auf Änderungen der Stromstärke.
- Auf die gleiche Weise wird die elektrische Leitfähigkeit der Suspension mit Fiolax®-Glas ermittelt. Bei 0 V beginnend, wird die Wechselspannung langsam erhöht.
- Der Leitfähigkeitsprüfer wird mit dest. Wasser abgespült. Anschließend untersucht man die auf die gleiche Weise die elektrische Leitfähigkeit der Suspension mit Flaschenglas.

#### Beobachtungen:

Nur die Glasgrieß-Suspension aus Flaschenglas zeigt eine nennenswerte elektrische Leitfähigkeit.

#### Auswertung:

Die Ionenfreisetzung aus Flaschenglas (Natronkalkglas) ist wesentlich höher als aus Borosilicatglas (Tab. 63). Durch die Herstellung von Glasgrieß erhält man eine große Oberfläche von der zu prüfenden Glassorte. Dies führt – neben dem Erhitzen - zu einer Beschleunigung der zu untersuchenden Reaktion.

Tabelle 63: Unterscheidung zweier Glassorten hinsichtlich ihrer Wasserbeständigkeit

Überprüfte Flüssigkeit	Destilliertes Wasser	Glasgrieß-Suspension	
		Fiolax-Reagenzglas (Borosilicatglas)	Flaschenglas (Natronkalkglas)
Gemessene Stromstärke bei 25 V ~	0 mA	ca. 1 mA	ca. 15 mA
Elektrische Leitfähigkeit	nicht nachweisbar	sehr gering	hoch
Ionenkonzentration in der Suspension	Ionenprodukt des Wassers	sehr niedrig	hoch
Freisetzung von Ionen aus dem Glasmaterial	-	geringfügig	stark
Wasserbeständigkeit	-	hoch (Klasse 1)	niedrig (Klasse 3)

Beim Borosilicatglas sind Silicium-Atome teilweise durch Bor- und Aluminium-Atome im Netzwerk ersetzt [162]. Einen Vergleich der Bestandteile beider Glassorten zeigt Tabelle 64:

Tabelle 64: Zusammensetzung zweier Glassorten

Zusammensetzung in Gew.-%	Natronkalkglas (Behälterglas)	Borosilicatglas (Laborgeräteglas)
SiO <sub>2</sub>	73	81
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	----	13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,5	2
CaO	10	----
MgO	0,1	----
Na <sub>2</sub> O	14	4
K <sub>2</sub> O	0,6	----

Während aus dem Natronkalkglas Alkalisilicate im Wasser in Lösung gehen, liegen im Borosilicat-Glas weitgehend unlösliche Verbindungen vor [90, S. 214], [163, S. 90]. Allerdings ist die innere Oberfläche einer Glas-Getränkeflasche viel zu gering, als dass es innerhalb der Haltbarkeitsfrist zu einer für den Lebensmittelbereich bedeutsamen Veränderung des Füllgutes kommen könnte.

Literatur: [90], [162], [163]

### V 3.2.2: Vergleich von Natronkalkglas und Borosilicat-Glas - Test auf alkalische Reaktion

SV, S II

Geräte:

2 Reagenzgläser, Reagenzglasständer

Chemikalien:

Glaspulver aus Natronkalkglas (Flaschenglas, aus V 3.1), Glaspulver aus Borosilicatglas (Fio-lax-Reagenzglas aus V 3.1), Universalindikator-Papier

Versuchsdauer: 5 Minuten

Durchführung:

- Je eine Spatelspitze Natronkalkglas-Pulver und Borosilicatglas-Pulver werden in Reagenzgläser gegeben.
- Man fügt jeweils einen Streifen Universalindikator-Papier und 3 mL dest. Wasser hinzu.
- Die Farbe des Universalindikators wird registriert.

Beobachtungen:

Die Farbveränderungen treten schon nach wenigen Sekunden auf. Natronkalkglas bewirkt eine Blaufärbung des Universalindikators, während bei Borosilicatglas eine grüne Färbung entsteht.

Auswertung:

Die Suspension mit Natronkalkglas zeigt eine deutlich alkalische Reaktion (Tab. 65).

Tabelle 65: Unterscheidung zweier Glassorten hinsichtlich einer alkalischen Reaktion

Reagenzglas	Nr. 1	Nr. 2
<b>Glaspulver</b>	<b>Natronkalkglas (Flaschenglas)</b>	<b>Borosilicatglas (Fiolax)</b>
Farbe des Universalindikators	blau	grün
pH-Wert der Suspension	pH $\geq$ 10	pH = 7
Eigenschaft der wässrigen Lösung	alkalisch	neutral
Entstehen von Hydroxid-Ionen	ja	nein

Die Anionen der Alkalisilicate, die aus dem Natronkalkglas in Lösung gegangen sind, reagieren alkalisch. Die Reaktion von Natronkalkglas mit Wasser verläuft nach folgendem Schema [80, S. 499]:



Für empfindliche Füllgüter, wie medizinische Produkte ist Natronkalkglas nicht geeignet, da die Silicat-Anionen mit wässrigen Inhalten reagieren können. Dies kann zur Zerstörung des Füllgutes führen. Für Injektionslösungen muss das neutrale Borosilicatglas (Fiolax) verwendet werden [162, S. 19 f.]. Im Rahmen der Funktion als Lebensmittelverpackung kann die alkalische Reaktion von Natronkalkglas vernachlässigt werden, denn die Kontaktfläche zwischen Behälter und Füllgut ist minimal.

Entsorgung: Lösungen in den Abguss, Glasreste in den Hausmüll

Literatur: [90], [163], [80], [162]

### V 3.2.3: Vergleich zweier Glassorten hinsichtlich ihrer Wasserbeständigkeit

SV, S II

Geräte:

4 Bechergläser (100 mL), 3 Bechergläser (250 mL), 4 Heizplatten mit Magnetrührer, Siedesteinchen, 3 Rührstäbchen, 3 Uhrgläser, Bürette (möglichst 1 mL) mit Stativmaterial, Pasteur-Pipette

Chemikalien:

3 g Glasgrieß der zu bestimmenden Proben (Flaschenglas, Fiolax-Reagenzglas, Ampulle, Duran-Reagenzglas usw. aus V 3.1), Salzsäure (c = 0,01 mol/L), ethanolische konz. Methylrot-Lösung [164]

Sicherheitsvorschriften: Ethanol (leicht entzündlich, F), Methylrot (reizend, Xi)

Versuchsdauer: 80 min

### Durchführung:

- Je 2 g Glasgrieß (Ausgangsglas gemörsert) werden mit 50 mL dest. Wasser 1 Stunde im siedenden Wasserbad unter Rühren erhitzt (Abdeckung der beiden Bechergläser durch Uhrgläser).
- Im dritten Becherglas wird reines dest. Wasser ebenfalls erhitzt (Blindprobe).
- Die Glasgrieß-Suspensionen werden filtriert. Den Filtraten werden jeweils 2 Tropfen Methylrot-Lösung als Indikator zugefügt.
- Dann werden die drei Proben mit Salzsäure bis zum Farbumschlag nach Rot titriert.

### Versuchsergebnisse und ihre Deutung:

Die Blindprobe zeigt bereits bei der Zugabe von Indikator-Lösung eine Rotfärbung. Die Innenwand des Becherglases lässt also keine Wechselwirkung mit Wasser erkennen und stellt somit keine erkennbare Fehlerquelle dar. Aus der folgenden Tabelle 66 geht hervor, dass Natronkalkglas wesentlich instabiler ist als Borosilicat-Glas.

Tabelle 66: Verschiedene Glassorten und ihre titrimetrisch erfasste alkalische Reaktion im Überblick

<b>Filtrat Glasgrieß 50 mL-Probe</b>	<b>Duran-Reagenzglas</b>	<b>Fiolax-Reagenzglas</b>	<b>Getränkeflasche</b>
Verbrauch an Salzsäure ( $c = 0,01 \text{ mol/L}$ ) bis zum Farbumschlag nach rot	0,26 mL	0,55 mL	12,02 mL
„Hydrolyse“ (Protonolyse, Ionenaustausch)	sehr schwach	schwach	sehr stark
Umrechnung auf 1 g Glasgrieß	0,13 mL	0,275 mL	6,01 mL
Chemische Beständigkeit	hoch resistentes Glas	resistentes Glas	stark unbeständiges Glas
Hydrolytische Klasse	1 - 2	2 - 3	5
Zuordnung	Borosilicat-Glas	Borosilicat-Glas	Natronkalkglas

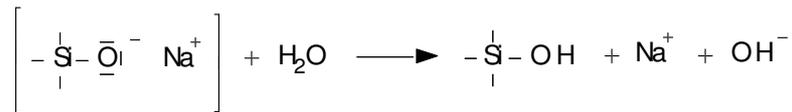
### Auswertung:

Es handelt sich um das Grieß-Titrations-Verfahren bei 98 °C nach DIN ISO 719 [165]. Gläser mit den Handelsnamen Fiolax, Duran, Jenaer Glas, Pyrex oder Solidex gehören nach ISO 3585 zu den Borosilicatgläsern. Diese sind sehr chemikalien- und temperaturbeständig. Fiolax-Gläser werden auch für pharmazeutische Produkte verwendet [166, S. 4]. Aber auch innerhalb der Borosilikatgläser gibt es Unterschiede, welche durch unterschiedliche Bestandteile erklärt werden können [165]:

Tabelle 67: Unterschiedliche Typen von Borosilicat-Gläsern

<b>Typ Borosilicatglas</b>	<b>SiO<sub>2</sub> - Gehalt</b>	<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Gehalt</b>	<b>Erdalkalien</b>	<b>Vertreter</b>
erdalkalifrei	>80 %	12 - 13 %	-	Duran, Pyrex
erdalkalihaltig	75 %	8 - 12 %	bis 5 %	Fiolax

Beim neutralen Angriff werden bevorzugt die in der Glasoberflächenschicht befindlichen Alkali-Ionen herausgelöst und durch H<sup>+</sup>-Ionen ausgetauscht. Schematisch geschieht das nach folgender Reaktion:



Die präzise Einordnung der Glasproben in eine der 5 hydrolytischen Klassen kann sich schwierig gestalten, da die Korngröße definiert sein muss, was im Rahmen des Chemieunterrichtes nicht möglich ist [165].

Entsorgung: Salzsäure zu Säuren und Laugen, Ethanol und ethanolische Lösungen zu den halogenfreien organischen Abfällen

Literatur: [164], [165], [166]

### V 3.3: Schmelzen von Flaschenglas (Natronkalkglas) im Mikrowellenofen

SV, S II

Geräte:

Gekachelter Labortisch, Haushalts-Mikrowellenofen (700 W), AST-Element [121], passender Porzellantiegel, dazu passender Deckel, 2 Tiegelzangen, Pulvertrichter, 2 dünne Platten aus Gasbeton (4 cm x 4 cm)

Chemikalien:

Gaspulver aus Flaschenglas (Natronkalkglas aus V 3.1)

Versuchsdauer: 15 min

Durchführung:

- Ein in einem AST-Element platzierter Porzellantiegel wird zur Hälfte mit Gaspulver gefüllt, mit einem Porzellandeckel abgedeckt und 5 min lang im Mikrowellenofen auf der Stufe von 700 W erhitzt. (Das AST-Element sollte möglichst im „Hot Spot“ des Mikrowellenofens stehen [121]. Eine Platte aus Gasbeton dient als Unterlage.)
- Nach dem Erhitzen wird der Porzellantiegel aus dem AST-Element herausgenommen (Tiegelzange). Mit Hilfe einer zweiten Tiegelzange versucht man sofort, aus der Schmelze Fäden zu ziehen.

Beobachtung:

Aus der zähen Schmelze lassen sich Fäden ziehen. Ein Ausgießen ist jedoch nicht möglich.

Auswertung:

Während Siliciumdioxid (SiO<sub>2</sub>) als der eigentliche Glasbildner eine dem Diamanten ähnliche Raumnetzstruktur bildet, dient das zugesetzte Natriumcarbonat, das zu Natriumoxid reagiert, als Flussmittel. Dadurch wird das Schmelzen erleichtert. Stabilität und Beständigkeit werden erzielt durch die Erdalkalioxide (CaO, MgO) [148, S. 1416, 1576]. Das Raumnetz wird durch Alkalimetall- und Erdalkalimetalloxide weiter verändert, indem einige Si-O-Si-Bindungen aufbrechen. Dabei wird die Erweichungstemperatur herabgesetzt. Diese wird für Normalglas (Natronkalkglas) mit ca. 550 °C, für technische Gläser hingegen mit 400 bis 800 °C und für Quarzglas mit ca. 1500 °C angegeben [75, S. 362].

### Hinweis:

Die Erweichungstemperaturen für Normalglas und technische Gläser werden innerhalb kurzer Zeit überschritten, da ein Mikrowellenofen im „Hot Spot“ eine Aufheizung auf ca. 1000 °C innerhalb der ersten Minute erzielt [121].

Entsorgung: Hausmüll

Literatur: [75], [148], [121]

## 15.4 Barrierewirkung und Durchlässigkeit

### **V 4.1.1: Fernhalten des Sauerstoffs von sauerstoffempfindlichen Substanzen**

LV, S I bzw. SV, S II

#### Geräte:

2 Tropfflaschen (Polyethylen, 50 mL), Petrischale (Durchmesser 6,5 cm), Messzylinder (10 cm<sup>3</sup>), Pinzette, 2 Mehrweg-Joghurtgläser aus Weißglas (0,5 L, mit Metall-Schraubdeckel), Rundfilter (Durchmesser 27 mm)

#### Chemikalien:

Wässrige Methylenblau-Lösung, w = 0,3 % (gesundheitsgefährdend, Xn), wässrige Natriumdithionit-Lösung, w = 1 % (gesundheitsgefährdend, Xn), Kohlenstoffdioxid (Stahlflasche oder Kartusche), alternativ: Stickstoff

Versuchsdauer: 15 min

#### Durchführung:

- In eine Petrischale werden 3 mL Methylenblaulösung gegeben. Unter leichtem Umschwenken werden einige Tropfen (ca. 4 bis 10 Tropfen) Natriumdithionit-Lösung hinzugefügt, bis die Farbstoff-Lösung völlig entfärbt ist.
- Gleich darauf hält man mit Hilfe einer Pinzette einen Rundfilter in die entfärbte Lösung und überführt diesen in ein Joghurtglas. Dieses wird sofort mit Kohlenstoffdioxid sorgfältig geflutet, und der Deckel wird aufgeschraubt.
- Ein zweiter Rundfilter wird ebenfalls in die entfärbte Lösung gehalten und in ein zweites Joghurtglas überführt. Dieses bleibt jedoch unverschlossen.

#### Beobachtung:

Der Rundfilter im offenen Joghurtglas färbt sich im Verlauf weniger Minuten blau. Im geschlossenen Joghurtglas hingegen tritt die Blaufärbung nur sehr langsam ein (Abb. 84).



Abbildung 84: Ergebnis zu Versuch 4.1.1

Deutung:

Methylenblau wurde zunächst durch Natriumdithionit reduziert. Die dabei stattfindende Oxidation der Dithionit-Ionen kann folgendermaßen angegeben werden [126, S. 214].



Die reduzierte Form des Methylenblaus ist farblos. Durch Luftsauerstoff wird Methylenblau wieder oxidiert (Abb. 85):

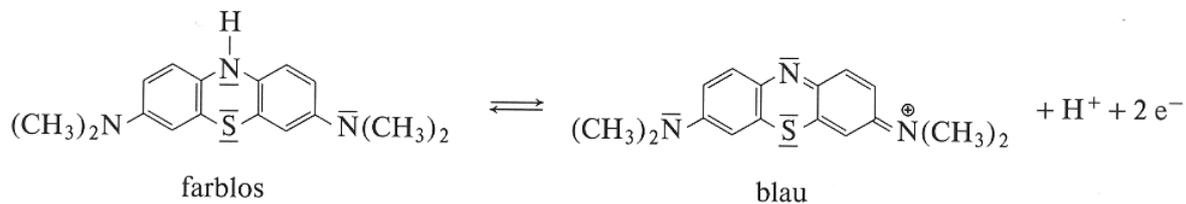


Abbildung 85: Methylenblau im reduzierten Zustand (links) und im oxidierten Zustand (rechts) [167, S. 164]

Mit diesem Versuch wird modellhaft gezeigt, dass Sauerstoff von ausgewählten Substanzen ferngehalten werden kann. Dies gelingt jedoch nur, wenn der Sauerstoff weitgehend durch ein Schutzgas verdrängt und der Behälter sofort gasdicht verschlossen wird. Ein typisches Ergebnis zeigt Abbildung 84.

Entsorgung:

- Natriumdithionit: giftige anorganische Stoffe
- Methylenblau: getrocknete Rundfilter zum Feststoffabfall

Literatur: [126], [167]

**V 4.1.2: Sauerstoffdurchlässigkeit von Folien - ermittelt mit einer Zink-Luft-Batterie**

LV, S II

Die in der Prüftechnik eingesetzten Verfahren zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit von Folien sind allgemein aufwändig und für die Schulchemie aus Gründen des Zeitaufwandes und der apparativen Voraussetzungen wenig praktikabel. Für den Chemieunterricht ist es

vielmehr von Interesse, eine Methode zur Verfügung zu haben, die auf einem mit dem Vorwissen der Schülerinnen und Schüler zu verstehenden Messprinzip basiert, wobei die möglichst exakte Ermittlung von Durchtrittsraten nicht im Vordergrund steht. Es wird hier deshalb eine Vorgehensweise vorgeschlagen, die eine qualitative Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit unterschiedlicher Folien erlaubt und ohne Referenzmessungen mit käuflichen Messzellen auskommt.

Basis der Bestimmung des Sauerstoffgehaltes ist eine Zink-Luft-Batterie, die eine Spannung 1,4 V hat und normalerweise für Hörgeräte benutzt wird. Der Aufbau sowie die ablaufenden Reaktionen sind schematisch in der nachfolgenden Abbildung dargestellt (Abb. 86).

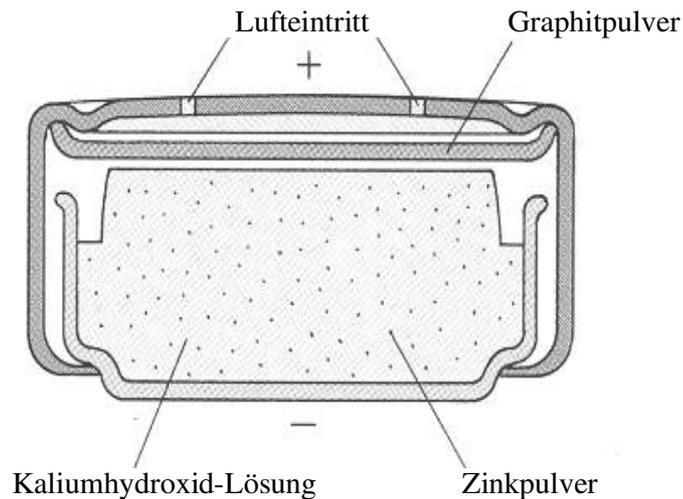
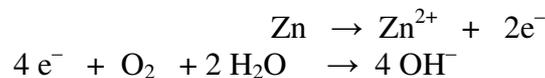


Abbildung 86: Schema einer Zink-Luft-Batterie im Querschnitt (verändert nach [74, S. 160])



Zur Lagerung sind neue Batterien mit einer Schutzfolie versehen, die einen Sauerstoffzutritt weitgehend ausschließt. Entfernt man die Folie, kann man die Öffnungen, durch die der Sauerstoff eintritt, gut erkennen (Abb. 87).

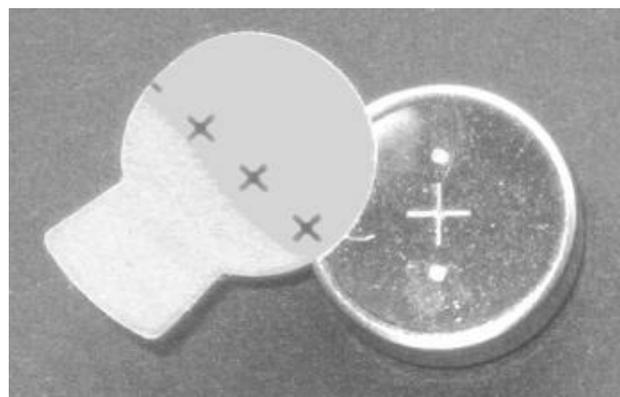


Abbildung 87: Blick auf die Kathode einer Zink-Luft-Batterie des Typs RENATA ZA 675 nach Entfernen der Schutzfolie; für die Experimente wurden Batterien dieses Typs benutzt.

Die einer elektrischen Zelle maximal entnehmbare Energie ist das Produkt aus der Spannung, dem fließenden Strom und der Zeit. In der Praxis ist die Spannungslage einer Zelle nicht konstant, sondern abhängig vom Zellentyp und der Belastung. Misst man die Spannung bei frei-

em Luftzutritt und Verwendung eines 80 Ω-Widerstands, so erhält man folgende Entladekurve (Abb. 88):

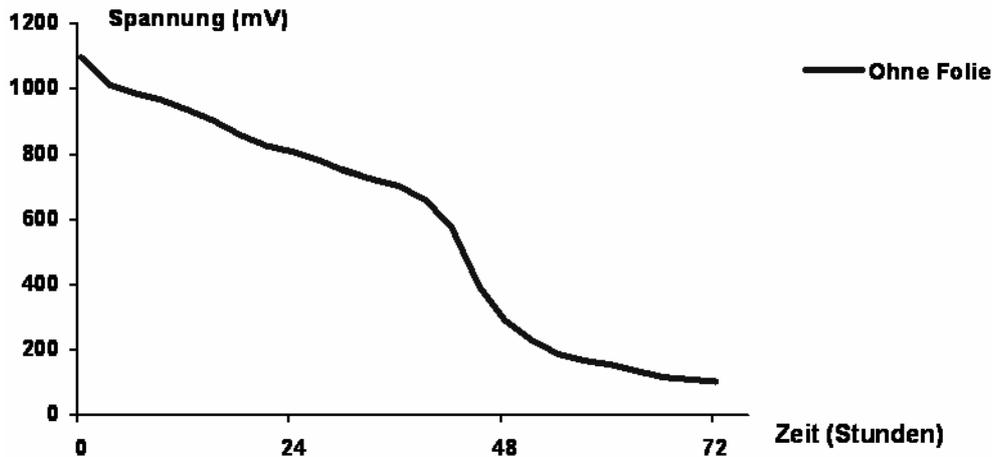
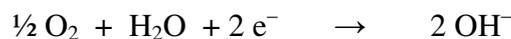


Abbildung 88: Entladekurve einer Zink-Luft-Batterie, Typ „Renata“, Kapazität 610 mAh, Entladung über einen 80 Ω-Widerstand [168]

Da Redoxpotentiale bekanntlich konzentrationsabhängig sind, muss der Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffgehalt der Umgebung und der Batteriespannung berücksichtigt werden. Zieht man für die Messung der Sauerstoffkonzentration das konzentrationsabhängige Sauerstoffpotential der Redoxreaktion



heran, so ergibt sich die Abhängigkeit des Potentials vom Partialdruck des Sauerstoffs nach der Nernstschen Gleichung  $E_p = E_0 + \frac{R \times T}{n \times F} \times \ln p_{\text{O}_2}$ . (In einer alkalischen Lösung der Konzentration  $c(\text{OH}^-) = 1 \text{ mol/L}$  und bei einem Sauerstoffdruck von  $p(\text{O}_2)$  ist  $E_0 = + 0,401 \text{ V}$ .) Es ist leicht ersichtlich, dass Änderungen des Sauerstoffpartialdrucks nur äußerst geringfügige Änderungen des Potentials ergeben werden. Die Situation ändert sich, wenn man die Zelle unter Belastung betreibt. Die Stromdichte und resultierend auch die durch den Spannungsabfall am Widerstand direkt proportionale Spannung (Ohmsches Gesetz) ist nun bei nicht zu kleinen Stromdichten abhängig von der Gleichgewichtskonzentration  $c(\text{O}_2)$  und der Dichte der Diffusionsschicht  $d$ . Die Grenzstromdichte ist dann  $j_{\text{grenz}} = n \times F \times D \times \frac{c_{\text{O}_2}}{d}$  (D: Diffusionskoeffizient).

Die folgende Abbildung 89 zeigt das Anwachsen der Diffusionsschicht für unterschiedliche Zeiten bei Stromentnahme schematisch. Wie man erkennen kann, wächst diese Schicht, bis schließlich der stationäre Zustand (rechte Kurve) erreicht ist. Während dicht an der Elektrode die Konzentration  $c = 0$  ist, steigt sie in größerem Abstand zur Elektrode bis auf die in der Lösung vorhandene Konzentration  $c_0$  an. (Eine ausführliche Darstellung findet man bei HAMANN [169, S. 71] sowie HAMANN und VIELSTICH [170, S. 191 ff.]).

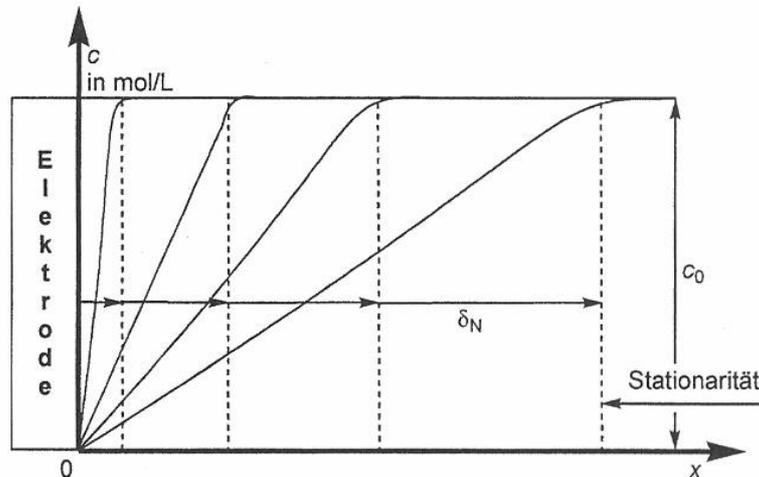


Abbildung 89: Zeitlicher Verlauf der Ausbildung der Diffusionsschicht an einer Elektrode (nach HAMANN [169, S. 71]),  $x$ : Schichtdicke. Jede Kurve zeigt den Verlauf der Schichtdicke.

Strom und Spannung sind damit direkt proportional der Konzentration des Sauerstoffs im Elektrolyten und diese wiederum mit dem Partialdruck des Sauerstoffs in der Umgebung der Zelle und umgekehrt proportional der Dicke  $d$  der Diffusionsschicht, die von der Geschwindigkeit der Diffusion anhängig ist. Damit kann die Zink-Luft-Batterie bei nicht zu kleinen Stromdichten, d.h. bei Verwendung nicht zu großer Widerstände, in der Tat geeignet sein, den Sauerstoffpartialdruck zu bestimmen.

Mit Hilfe einer käuflichen Messzelle (WTW-Sauerstoffmesszelle mit dem Elektrodensystem Silberanode-KCl-Goldkathode) lässt sich nachweisen, dass sich Zink-Luft-Batterien tatsächlich in der beschriebenen Weise verhalten. Wird eine neue Batterie mit einem Widerstand von etwa  $80 \Omega$  belastet, steht für eine gewisse Zeit die gemessene Spannungsänderung in einem linearen Verhältnis zur Änderung der Sauerstoffkonzentration des sie umgebenden Gases. Der Vergleich der Anstiege der gemessenen Spannungs-Zeit-Geraden ermöglicht eine Einordnung verschieden guter Barrierschichten gegenüber Sauerstoff. (Absolute Werte der Sauerstoffkonzentration können bestimmt werden, wenn zuvor eine Eichung mit einer käuflichen Messzelle durchgeführt wurde. Dass die Erstellung einer Eichkurve –auch wenn dies äußerst umständlich und mühsam ist– möglich ist, wird im Laufe dieser Experimentieranleitung beschrieben. Aus Praktikabilitätsgründen ist es jedoch nicht realistisch, die Eichung im Rahmen des Unterrichtes durchzuführen.)

Mit diesem Vorwissen kann man nun eine Apparatur zur Untersuchung der Gasdurchlässigkeit von Folien, Papier usw. konstruieren. Als Prüfwelle hat sich ein Exsikkator mit seitlichem Ansatz bewährt, durch den Drähte abgedichtet zu der über den Widerstand kurzgeschlossenen Zink-Luft-Batterie geführt werden. Empfehlenswert ist die Montage der Batterie auf einer kleinen Acrylglasplatte, wie es die folgende Abbildung verdeutlicht (Abb. 90). Die Batterie wird dabei mit ihren Polen zwischen zwei Messingblechen eingeklemmt, wodurch eine sichere Kontaktierung gewährleistet ist, der Widerstand wird über Lüsterklemmen angeschlossen.

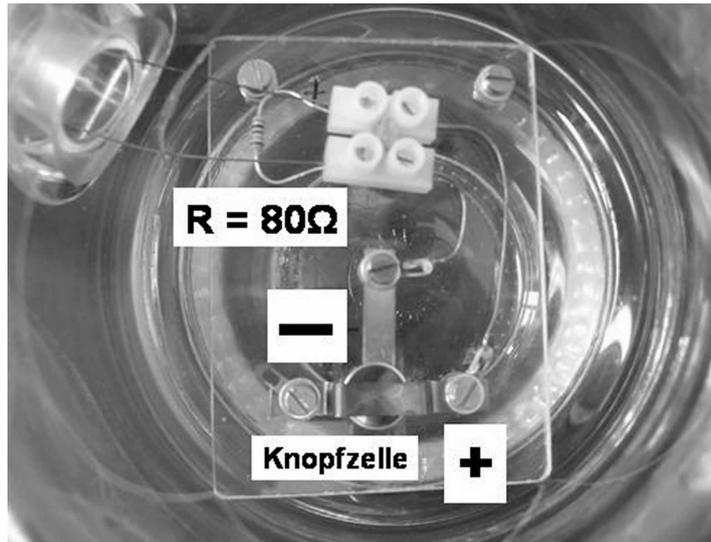


Abbildung 90: Montage von Zink-Luft-Batterie und Widerstand auf einer Acrylplatte

Die aus dem Exsikkator geführten Drähte werden im einfachsten Fall mit einem Spannungsmessgerät, normalerweise mit einem Gerät zur Messwertaufnahme (z.B. All-Chem-Misst) und angeschlossenem PC verbunden. Die folgenden Abbildungen 91 und 92 verdeutlichen den Aufbau. Vor jedem der Versuche wird eine frische Batterie eingelegt und durch Entfernen der Schutzfolie aktiviert. Dies ist besonders wichtig, da bei erschöpften Batterien der oben beschriebene Zusammenhang zwischen Sauerstoffgehalt und Spannung nicht mehr gilt. Anstelle des Deckels des Exsikkators wird die zu überprüfende Folie aufgebracht. Die Prüffolien werden dem geschliffenen Rand entsprechend zurechtgeschnitten und an den gefetteten Rand zunächst nur locker angeedrückt. Durch Einleiten von Stickstoff über den Hahn wird der Sauerstoff aus dem Exsikkator verdrängt, anschließend erst die Folie fest angepresst.

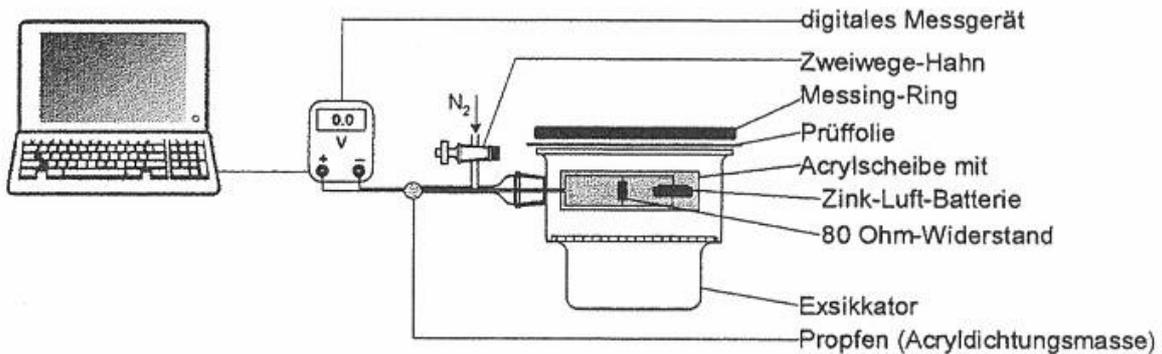


Abbildung 91: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

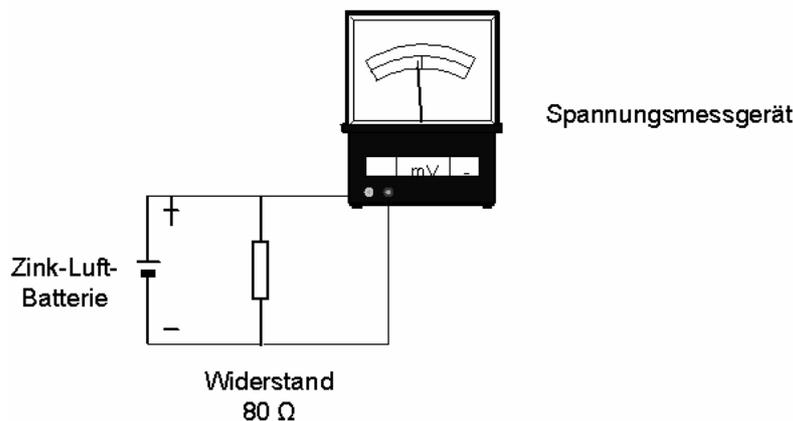


Abbildung 92: Schaltskizze des Versuchsaufbaus

Erfahrungsgemäß gelingt es auch bei intensivem Spülen der Apparatur mit Stickstoff oder einem Edelgas in der zur Vorbereitung des Experiments zur Verfügung stehenden Zeit nicht, den Sauerstoff so weit zu entfernen, dass die Spannung der Zelle auf 0 V absinkt. Im Allgemeinen erreicht man Werte von etwa 60 mV, was aber die Aussage der folgenden Experimente nicht beeinflusst.

Zu Beginn einer Versuchsreihe empfiehlt es sich, die Sauerstoffdurchlässigkeit von Backpapier zu untersuchen. Grund hierfür ist, dass an diesem Beispiel die gewünschten Effekte in einer Unterrichtsstunde gezeigt werden können. Verpackungsfolien hingegen stellen eine effektive Barriere gegen Sauerstoff dar. Experimente mit diesen Materialien können zwar in einer Schulstunde gestartet, aber erst in der darauf folgenden ausgewertet werden.

#### Allgemeine Beschreibung der Versuchsdurchführung

Da die folgenden Experimente sich nur hinsichtlich der untersuchten Folien unterscheiden, wird hier eine allgemeine Versuchsanleitung gegeben.

#### Material:

Kleiner Exsikkator mit seitlichem Schliffkern, zum Schliffkern passendes Ansatzstück mit seitlichem Hahn und Schliffkern (wie in den beiden vorhergehenden Abb.). Sollten keine Schliffgeräte für die Drahtführung und den seitlichen Hahn vorhanden sein, können die Drähte und ein Zweivegehahn mit Acryldichtungsmasse aus dem Baumarkt eingeklebt werden. (Einige Tage ausreagieren lassen. Keine Silikonmasse verwenden, die Essigsäuredämpfe entwickelt!) Quickfit-Verschluss mit Septum, Ring z.B. aus Metall auf den Planschliff des Exsikkators passend, 2 dünne stabile Stahldrähte (ca. 25 cm lang), Krokodilklemmen, Kabel, Acrylglasplatte mit aufmontiertem 80 Ω-Widerstand und Zink-Luft-Batterie (RENATA ZA 675), Schliff fett, Prüffolien (z.B. Verbundfolie PA-PE von einer Klarsicht-Käseverpackung), PE-Folien verschiedener Dicke, Frischhaltefolie usw., Schere, Stickstoff, Messwerterfassungsprogramm mit PC (alternativ: Voltmeter mit mV-Bereich)

#### Zur Behandlung der PA-PE-Verbundfolien:

Große Porzellanschale (Durchmesser größer als der des Exsikkators!), Kunststoffpinzette, konz. Salzsäure (ätzend, C), dest. Wasser. Die Polyamidschicht wird durch Salzsäure abgelöst.

Dauer: Vorbereitung der Folie 10 min, Vorbereitung des Exsikkators 5 min, Messung 24 Stunden

### Durchführung:

Die Schutzfolie wird von einer Batterie abgezogen und diese in die Batteriehalterung geklemmt. Die Verbindung zum Messmodul wird hergestellt und das Messprogramm (Spannungs-Zeit-Diagramm) gestartet. Anstelle des Deckels des Exsikkators legt man die zu überprüfende Folie auf den gut gefetteten geschliffenen Rand, drückt sie allerdings nur locker an. Durch den seitlichen Hahn wird etwa fünf Minuten lang Stickstoff in den Exsikkator geleitet. In dieser Zeit sinkt die Spannung erfahrungsgemäß auf etwa 60 mV. Erfolgt keine weitere Abnahme der Spannung, wird die Stickstoffzufuhr unterbrochen, der Hahn geschlossen und die Folie sofort fest angedrückt. Soweit vorhanden, wird ein Ring aus Metall aufgelegt, um ein Abheben der Folie zu verhindern.

### Sauerstoffdurchlässigkeit von Backpapier

#### Zusätzliches Material:

Backpapier, Haarspray (z.B. Drei-Wetter-taft, Schwarzkopf, „sehr starker Halt“), Schablone aus DIN A 3-Papier mit kreisrundem Loch mit der Größe der Fläche der Prüffolie (verhindert, dass Haarspray über die gesamte Messapparatur verteilt wird), spitze Pinzette oder Messer

Dauer: Vorbereitung der Folie 10 min, Vorbereitung des Exsikkators 5 min, Messung 5 min

### Durchführung:

- Die Vorbereitung verläuft wie oben angegeben.
- Für die Messung wird ein Spannungsbereich von 0 bis 100 mV ausgewählt.
- Etwa eine Minute nach dem Start der Messung legt man die Schablone auf den Ring, mit dem die Folie auf den Exsikkator-Rand gedrückt wird und besprüht die Folie mit Haarlack.
- Nach einer weiteren Minute durchsticht man die Folie mit der Pinzette oder einem Messer.

### Versuchsergebnis:

Zunächst findet ein gleichmäßiger Spannungsanstieg statt. Nach dem Besprühen mit Haarlack bleibt die Spannung konstant. Wird die Folie durchstoßen, steigt die Spannung sprunghaft an. Die nachfolgende Abbildung 93 zeigt exemplarisch eine Messung.

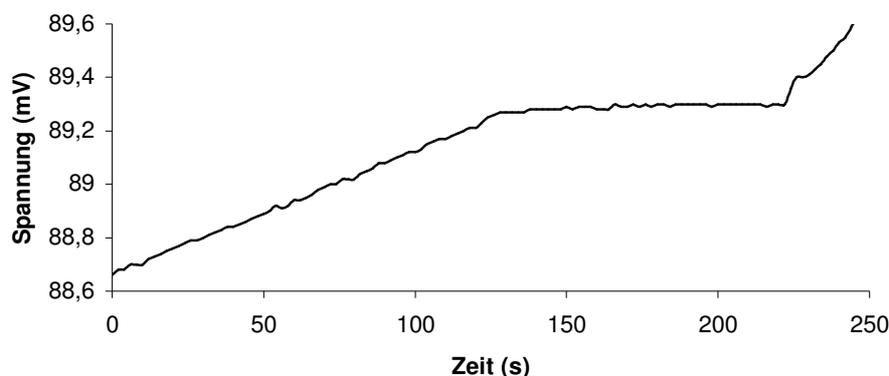


Abbildung 93: Demonstration der Sauerstoffdurchlässigkeit durch eine Backpapierfolie: Unbehandelt (links), mit Haarlack besprüht (Mitte) sowie nach dem Durchstechen (rechts), dargestellt als Spannungsänderungen.

### Auswertung:

Zu Versuchsbeginn steigt die Spannung an, da die Diffusion von Sauerstoff durch das Backpapier größer ist als der Sauerstoffverbrauch der Batterie. Wird das Papier mit Haarlack behandelt, ist die Sauerstoffzufuhr soweit verringert, dass der Sauerstoffverbrauch der Zelle und

der Zutritt in etwa ausgeglichen sind. Die Spannung bleibt dadurch konstant. Zerstörung des Backpapiers führt zu ungehindertem Luftzutritt und damit zum steilen Anstieg der Batteriespannung.

Interessant ist die Frage, wie das Spannungs-Zeit-Diagramm aussieht, wenn der Sauerstoffdurchtritt von Backpapier über eine längere Zeit beobachtet wird. Die folgende Abbildung zeigt eine solche Untersuchung (Abb. 94).

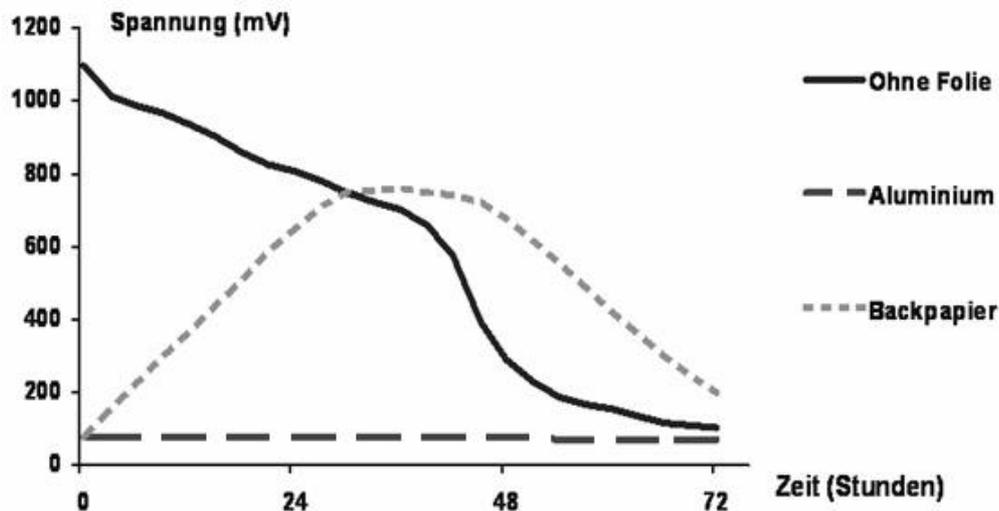


Abbildung 94: Spannungs-Zeit-Kurven im Langzeitversuch unter verschiedenen Bedingungen. Bei freiem Luftzutritt ergibt sich eine abfallende Kurve, bei Abdeckung mit aluminiumhaltiger Verbundfolie bleibt die Spannung konstant, während mit Backpapier eine parabelartige Kurve entsteht.

Über eine Zeit von etwa 30 Stunden steigt die Spannung nahezu linear an, d.h. der Sauerstoffgehalt innerhalb des Exsikkators wird höher. Anschließend herrscht für einige Stunden ein Gleichgewicht zwischen Verbrauch und Diffusion, d.h. die Spannung ist nahezu konstant. Da die Kapazität der Batterie erschöpft ist, sinkt dann die Spannung wieder ab. Zum Vergleich wurde eine Messung durchgeführt, bei der eine aluminiumhaltige Verbundfolie zur Abdeckung des Exsikkators verwendet wurde. Auch bei einer längeren Untersuchungszeit kann eine sehr geringe aber konstante Spannung von 50 bis 60 mV gemessen werden. Da die Spannung auch bei aufgelegtem Exsikkatordeckel nicht weiter absinkt, dürften Undichtigkeiten an anderen Stellen des Messsystems (Drahtdurchführungen usw.) für diesen Effekt verantwortlich sein.

#### Exemplarische Versuchsergebnisse der Untersuchung Kunststoff-Folien

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Ergebnis einer Folienverpackung für Käse. Es handelt sich um eine aus einer Schicht Polyamid und einer Schicht Polyethylen bestehende Verbundfolie. (Beim Kauf des Käses auf den Aufdruck PA/PE achten!). Auch bei einer Versuchszeit von knapp 30 h steigt die zu Versuchsbeginn gemessene Spannung von etwa 70 mV nicht an, sondern sinkt sogar zunächst noch leicht ab.

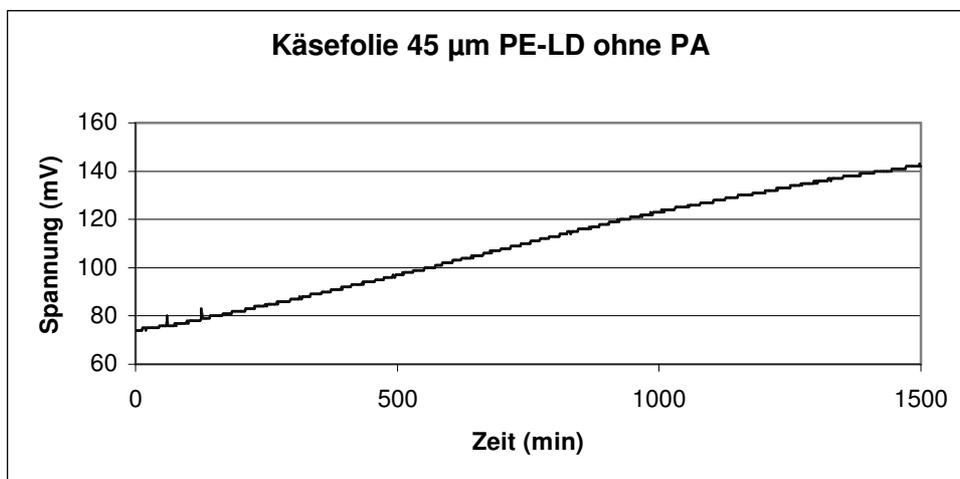
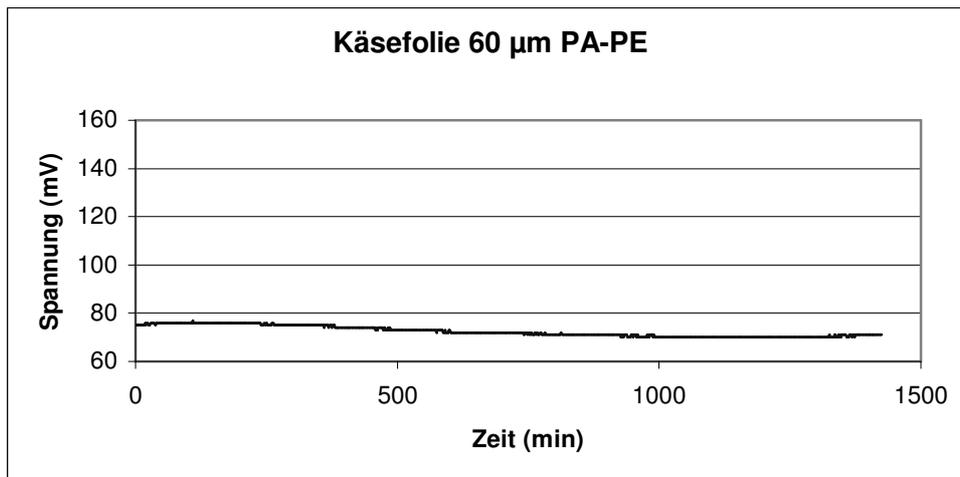


Abbildung 95: Untersuchung der Sauerstoffdurchlässigkeit von Käsefolie (Verbund Polyamid/Polyethylen) und der gleichen Folie nach Entfernen der Polyamidschicht

Aus diesem Ergebnis kann geschlossen werden, dass abgesehen von geringen Undichtigkeiten der Apparatur kein Sauerstoff durch die Folie diffundiert. Verdeutlicht wird die sehr gute Sperrwirkung der Verbundfolie, wenn man durch kurzes Einlegen in Salzsäure ( $w = 25\%$ ) die Polyamidschicht entfernt. Die verbliebene PE-Schicht der Folie weist eine Durchlässigkeit für Sauerstoff auf, welche zu einer deutlichen Erhöhung der Sauerstoffkonzentration im Prüfgefäß führt, erkennbar an der Spannungszunahme. Innerhalb der Verbundfolie wird die entscheidende Barrierewirkung gegen Sauerstoff vom Polyamid geleistet. Diese außen liegende Schicht zeigt offenbar eine sehr geringe Durchlässigkeit für Sauerstoff. Vergleicht man die Messungen an Backpapier mit denen an dieser Folie, so wird die geringere Sauerstoffdurchlässigkeit der letzteren anhand des sehr viel flacheren Anstiegs der Spannungs-Zeit-Kurve sichtbar.

Möchte man das Ablösen der Polyamidschicht umgehen, kann auch eine dünne PE-Folie eingesetzt werden.

Da der Sauerstoffeintrag durch die meisten Folien im hier untersuchten Zeitraum relativ gering ist, kann nach PIRINGER [3] näherungsweise von einem konstanten Konzentrationsgefälle ausgegangen werden. Somit kann auch näherungsweise ein „konstanter Diffusionsfluss“ in Richtung der geringeren Sauerstoffkonzentration angenommen werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Sauerstoff leichter als Stickstoff durch die Folien diffundiert, weshalb diese bei längeren Versuchszeiten vom Exsikkatorrand leicht nach außen wölben.

Literatur: [3], [74], [168], [169], [170]

**V 4.2.1: Halbquantitativer Nachweis für die CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit einer PET-Flasche – Ermittlung der pH-Änderung durch Farbumschlag von Bromthymolblau**

SV, S I

Geräte:

Eine den zu untersuchenden Getränkeflaschen entsprechende Anzahl an Standzylindern (Innendurchmesser 7,5 cm, Höhe 35 cm) mit Glasdeckel, Schliff Fett, 2 Erlenmeyerkolben (50 mL) mit Stopfen, 2 Pasteurpipetten, 5 - 10 Glasflaschen (1 L), Glasstab, Abdeckplatten oder Eisenplatten (z.B. 10 cm x 10 cm),

Chemikalien:

0,5 L-PET-Einweg-Flaschen („Coca-Cola“ neu gekauft, „Coca-Cola“ entleert und wieder gefüllt mit dest. Wasser; „Coca-Cola“ noch nicht befüllt, „Coca-Cola“ leer, 3 Tage im Exsikkator (evakuiert), „Gerolsteiner Sprudel“, Mineralwasser „evian“ ohne Kohlensäure, „volvic Zitrone“ ohne Kohlensäure, Multivitaminsaft „Punica“ ohne Kohlensäure), 0,5 L-PET-Mehrweg-Flasche „Coca-Cola“, 0,33 L- oder 0,5 L- Glasflasche „Coca-Cola“ mit Kronenkorken oder Kunststoff-Schraubverschluss, Bromthymolblau-Lösung (wässrig-ethanolisch 1 : 1, w ≈ 3%), konz. Natriumcarbonat-Lösung ( $c(\text{Na}_2\text{CO}_3) \approx 2,5 \text{ mol / L}$ )

Sicherheitsvorschriften: Bromthymolblau-Lösung (reizend, Xi), konz. Natriumcarbonat-Lösung (reizend, Xi)

Versuchsdauer: Herstellung der Bromthymolblau-Lösung 15 min, Ansetzen der Proben 15 min, Wartezeit 1 Tag bis 1 Woche

Versuchsaufbau:

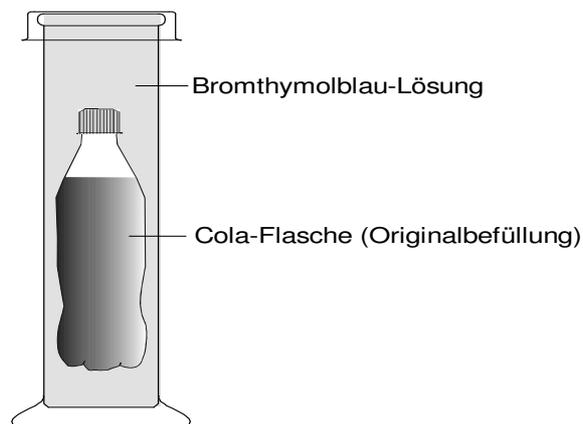


Abbildung 96: Versuchsanordnung zur Bestimmung der Gasdurchlässigkeit von PET- Getränkeflaschen

Versuchsdurchführung:

Vorbereitung der Bromthymolblau-Lösung

- Drei 1-Liter-Glasflaschen werden mit destilliertem Wasser gefüllt.
- Es werden je 10 Tropfen Bromthymolblau-Lösung sowie 1 Tropfen konzentrierte Natriumcarbonat-Lösung hinzugefügt.
- Verrührt wird mit einem Glasstab. (Wichtig ist hierbei, dass die Lösung gerade blau wird.)
- In verschraubten Flaschen sind die Lösungen mehrere Tage lang haltbar.

### Ansetzen der Proben

- Die Getränkeflaschen werden von ihrem Etikett sowie von sämtlichen Klebstoffresten befreit, gut abgespült und in die Standzylinder gestellt.
- Anschließend wird die Reaktionslösung in die Standzylinder gegossen, der Rand des Zylinders eingefettet und der Glasdeckel aufgesetzt.
- Zum Beschweren kann man z.B. Eisenplatten auflegen.
- Man achtet darauf, nach wie vielen Tagen ein Farbumschlag von blau nach grün bzw. nach gelb festzustellen ist.

### Versuchsergebnisse:

Die Versuchsreihe mit einer Colaflasche aus Glas mit Befüllung, einer ehemals mit Cola-Getränk, nun jedoch mit dest. Wasser gefüllten PET-Flasche und einer Cola-Flasche aus PET mit Befüllung ergab die in der folgenden Abb. 97 dargestellten Zeiträume bis zu einem Indikatorumschlag.

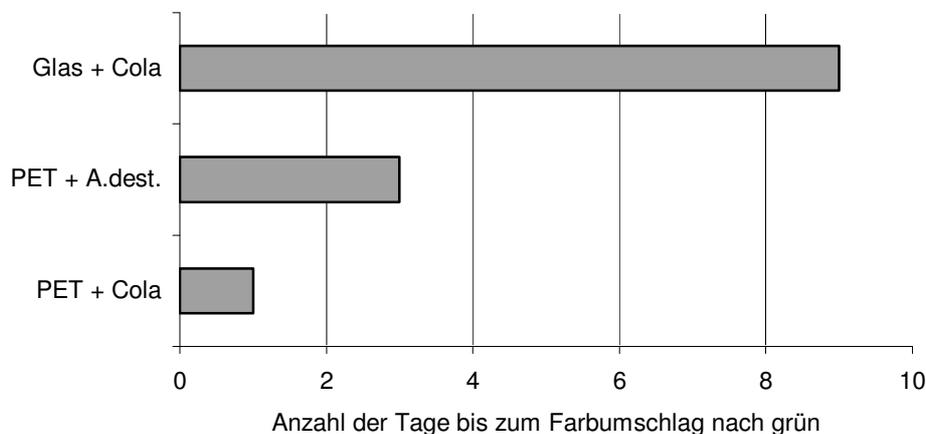


Abbildung 97: Abhängigkeit der pH-Absenkung von Verpackungsmaterial und Flascheninhalt (Indikator Bromthymolblau, Anzahl der Tage bis zum Farbumschlag nach gelb bzw. bei der Glasflasche nach grün)

Während bei der Glasflasche eine Diffusion von Kohlenstoffdioxid nur durch den Schraubverschluss oder den Kronenkorken möglich ist, gibt die PET-Flasche auch durch ihre Wand Kohlenstoffdioxid ab, was zu einer wesentlich schnelleren pH-Absenkung des Reaktionsmediums führt.

Nicht erklärbar erscheint zunächst die saure Reaktion der PET-Flasche, welche vorher mit einem kohlenensäurehaltigen Getränk gefüllt war und während des Versuchs nur destilliertes Wasser enthielt. Auf Kohlenstoffdioxid aus der Luft kann dieser Befund nicht zurückzuführen sein. Vorversuche ergaben, dass die Reaktionslösung selbst beim offenen Stehenlassen an der Luft auch nach 4 Wochen noch keine deutliche Grün- oder gar Gelbfärbung zeigte, jedoch ein Verblässen der Blaufärbung mit einem Stich ins Türkisfarbene. Eine Übersicht über die Ergebnisse zeigt die folgende Tabelle 68.

Tabelle 68: Unterschiedlichkeit der pH-Absenkung bei verschiedenen Verpackungsmaterialien und Getränken, nachgewiesen durch den Farbumschlag des Indikators Bromthymolblau

Flaschenmaterial (EW 0,5 L)	Inhalt	Tage bis zum Farbumschlag nach grün bzw. nach gelb
PET	Cola, CO <sub>2</sub>	0,5 bzw. 1
PET	Dest. Wasser, gebrauchte Cola-Flasche	1 bzw. 2
PET (MW)	Cola, CO <sub>2</sub>	1 bzw. 3
PET	„Gerolsteiner Sprudel“, Mineralwasser	1 bzw. 2
Glas (0,33 L)	Cola, CO <sub>2</sub> , Kronenkorken	7 bzw. 24
PET	Dest. Wasser, neue noch nicht befüllte Flasche ab Werk	Innerhalb von 1 Woche ist keinerlei Veränderung der Blaufärbung des Reaktionsmediums zu beobachten.
PET	Dest. Wasser, gebrauchte Cola-Flasche, 3 Tage im Exsikkator bei 25 mbar	
PET	„Evian“, Mineralwasser ohne Kohlensäure	
PET	„Punica“, saurer Fruchtsaft ohne Kohlensäure	
	Nur Reaktionslösung im verschlossenen Standzylinder	

Auswertung:

- Sind PET-Flaschen mit kohlenensäurehaltigen Getränken gefüllt, ist allgemein ein rascher Farbumschlag zu beobachten, was auf die Diffusion von Kohlenstoffdioxid hinweist.
- PET-Mehrwegflaschen besitzen eine dickere wand, durch die der Durchtritt von Kohlenstoffdioxid stärker als bei Einweggebinden gehemmt wird.
- Wird eine gebrauchte Colaflasche evakuiert, gibt sie offensichtlich das gespeicherte Kohlenstoffdioxid wieder ab.
- Stille Wässer ergeben keinerlei Reaktion, womit eine Hydrolyse des Kunststoffes ausgeschlossen werden kann.
- Eine Diffusion von Phosphorsäure bzw. Oxonium-Ionen erscheint wenig wahrscheinlich, da saure Getränke ohne Kohlenstoffdioxid keine Reaktion ergeben.
- Glasflaschen sind am Verschluss offenbar geringfügig undicht, wodurch sich auch hier ein langsames Absinken des pH-Wertes ergibt.
- Die Vergleichsprobe am Ende der Tabelle zeigt, dass systematische Fehler ausgeschlossen werden können.

Literatur: [33]

#### V 4.2.2: Halbquantitativer Nachweis für die CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit einer PET-Flasche – Ermittlung der pH-Änderung mit Hilfe eines pH-Meters

SV, S I

##### Geräte:

Eine den zu untersuchenden Getränkeflaschen entsprechende Anzahl an Standzylindern (Innendurchmesser 7,5 cm, Höhe 35 cm) mit Glasdeckel, ein zusätzlicher Standzylinder mit Glasdeckel, Schliff Fett, Abdeckplatten oder Eisenplatten (z.B. 10cm x 10 cm), pH-Meter

##### Chemikalien:

0,5 L-PET-Einweg-Flaschen („Coca-Cola“ neu gekauft, „Coca-Cola“ entleert und wieder gefüllt mit dest. Wasser; „Coca-Cola“ noch nicht befüllt, „Gerolsteiner Sprudel“, Mineralwasser „evian“ ohne Kohlensäure, „volvic Zitrone“ ohne Kohlensäure, Multivitaminsaft „Punica“ ohne Kohlensäure), 0,5 L-PET-Mehrweg-Flasche „Coca-Cola“, 0,33L- oder 0,5L- Glasflasche „Coca-Cola“ mit Kronenkorken oder Kunststoff-Schraubverschluss

##### Versuchsaufbau:

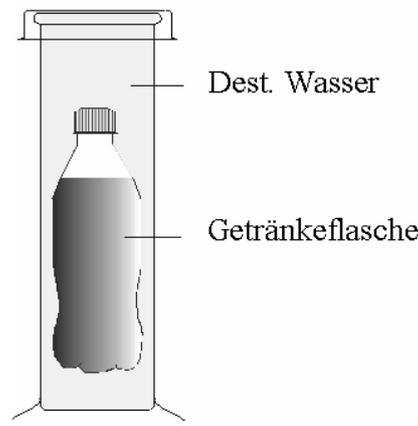


Abbildung 98: Versuchsanordnung zur Erfassung des CO<sub>2</sub>-Austritts über die Änderung des pH-Wertes

Versuchsdauer: Vorbereitung insgesamt ca. 15 min, Wartezeit 1 Tag bzw. 1 Woche, pH-Messung für jede angesetzte Probe 5-10 min

##### Versuchsdurchführung:

- Die Getränkeflaschen werden von ihrem Etikett sowie von sämtlichen Klebstoffresten sorgfältig befreit, gut abgespült (dest. Wasser) und in die Standzylinder gestellt.
- Anschließend werden die Standzylinder mit dest. Wasser gefüllt. Man fettet den Rand des Zylinders ein und setzt den Glasdeckel auf (zum Beschweren Eisenplatte auflegen).
- Ein weiterer Standzylinder ohne Flasche, der als Bezugswert dient, wird ausschließlich mit dest. Wasser gefüllt und ebenfalls abgedeckt.
- Der pH-Wert wird jeweils nach 1 Tag und nach 1 Woche gemessen. Die Abweichungen der einzelnen Proben vom Bezugswert (dest. Wasser) werden ermittelt.
- Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen, sollte jede Messung 10 mal durchgeführt und der Durchschnittswert gebildet werden.

##### Versuchsergebnisse:

Typische Ergebnisse von drei ausgewählten Gebinden zeigt die folgende Abbildung 99.

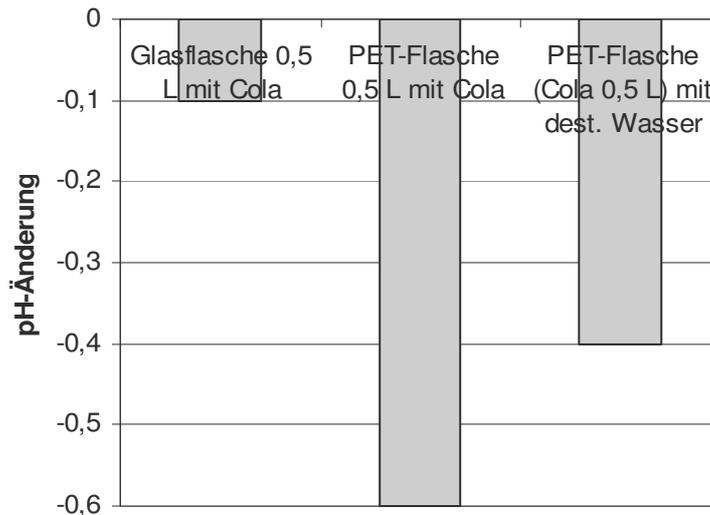


Abbildung 99: Direkte Messung der pH-Absenkung nach 1 Woche (20 °C), hervorgerufen durch CO<sub>2</sub>-Austritt

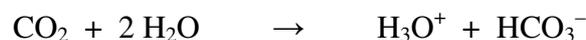
Schon nach einem Tag zeigen Cola-Flaschen aus PET –seien sie nun mit Cola-Getränk oder mit dest. Wasser befüllt – eine sehr deutliche pH-Absenkung. Diese beträgt rund 50% des 1-Wochen-Wertes. Auch mit PET-Mehrweg-Flaschen, welche Cola-Getränk enthalten und mit „Gerolsteiner Sprudel“ (PET, Einweg) lassen sich schon nach 1 Tag deutliche Ergebnisse erzielen. Hingegen liegen die Messwerte zur Glasflasche mit dem Cola-Getränk an der Grenze der Aussagekraft.

Erwartungsgemäß findet man bei einer noch nicht befüllten PET-Flasche ab Werk so wie bei „evian“ (Mineralwasser ohne Kohlensäure) keine pH-Veränderung. Ebenso zeigen Fruchtsaft-Getränke in PET-Flaschen ohne Kohlensäure („Punica“ und „volvic Zitrone“) keine eindeutige Veränderung des pH-Wertes.

#### Auswertung:

Während bei der Glasflasche eine Diffusion von Kohlenstoffdioxid nur durch den Schraubverschluss oder den Kronenkorken möglich ist, gibt die PET-Flasche auch durch ihre Wand Kohlenstoffdioxid ab, was zu einer wesentlich schnelleren pH-Absenkung des Reaktionsmediums führt.

Der Zusammenhang zwischen der Freisetzung von Kohlenstoffdioxid und der Absenkung des pH-Wertes lässt sich durch die Bildung von Oxonium-Ionen anhand folgender Reaktionsgleichung darstellen:



Für die Befunde lassen sich die nachfolgend aufgeführten Eläuterungen finden:

- Sind PET-Flaschen mit kohlensäurehaltigen Getränken gefüllt, ist allgemein ein rasches Absinken des pH-Wertes zu beobachten, was auf die Diffusion von Kohlenstoffdioxid hinweist.
- PET-Mehrwegflaschen besitzen eine dickere Wand, durch die der Durchtritt von Kohlenstoffdioxid stärker als bei Einweggebinden gehemmt wird.
- PET-Flaschen speichern offenbar Kohlenstoffdioxid in ihrer Wand, während sie kohlensäurehaltiges Füllgut enthalten. Eine gebrauchte Cola-Flasche gibt auch dann noch Kohlenstoffdioxid ab, wenn sie mit dest. Wasser befüllt wird.
- Stille Wässer ergeben keinerlei Reaktion, womit eine Hydrolyse des Kunststoffes ausgeschlossen werden kann.

- Eine Diffusion von Phosphorsäure bzw. Oxonium-Ionen erscheint wenig wahrscheinlich, da saure Getränke ohne Kohlenstoffdioxid keine Reaktion ergeben.
- Glasflaschen sind am Verschluss offenbar geringfügig undicht, wodurch sich auch hier ein langsames Absinken des pH-Wertes ergibt.
- Durch die Vergleichsprobe (Bezugswert ohne Flasche) wird sichergestellt, dass systematische Fehler ausgeschlossen werden können.

Literatur: [33]

#### **V 4.2.3: Halbquantitativer Nachweis des Verlustes von Kohlenstoffdioxid und Wasser aus PET-Cola-Flaschen durch gravimetrische und volumetrische Messungen**

SV, S II

Materialien:

4 kleine Joghurtbecher aus PS oder PP, Waage, 4 große Einmachgläser (5 Liter), Reibschale mit Pistill, Heizrührer, 100 mL-Zweihalsrundkolben (Schliff I: 29,2/32 und seitlicher Schliff II: 14,5/23), gebogenes Ansatzstück für seitlichen Schliff II, 2 Gummischläuche zu je 3 cm, 100mL-Kolbenprober (Phywe 0261600), Aufsatzstück für Schliff I mit Quickfit-Verschluss und Septum (Durchmesser = 2 cm), Klammern, Pipette (1 mL), 2 Pasteurpipetten, Rührstäbchen, 1 Spritze (Braun, Omnifix®, 2,5 mL, PFF 4616022V, Latex-free), 1 Kanüle (Sterican®, 0,80 x 120 mm BL/LB, 21 G x 4 3/4"), Kristallisierschale (1 L), Becherglas (250 mL), schwarze Pappe (10 cm x 10 cm), Thermometer, Barometer

Chemikalien:

Kaliumhydroxid, konz. Salzsäure (w = 25%), konz. Bariumhydroxid-Lösung (4 g Bariumhydroxid Octahydrat in 100 mL Wasser lösen), Schliff fett, 3 verschiedenartige Flaschen (0,5 Liter PET-Einweg / 0,5 Liter PET-Mehrweg / 0,2 Liter Glas-Mehrweg) mit Cola-Getränk

Sicherheitsvorschriften: Kaliumhydroxid (ätzend, C), konz. Salzsäure (ätzend, C), Bariumhydroxid Octahydrat (ätzend, C)

Zeitbedarf: Ansetzen (30 min), Auswertung nach 1 Woche (30 min)

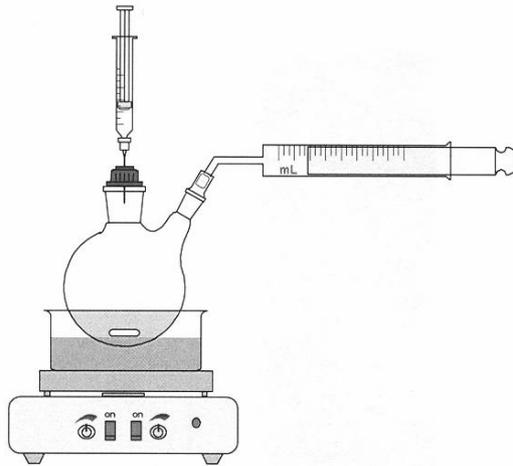


Abbildung 100: Versuchsapparatur zu Versuch 4.2.3

### Durchführung:

#### Ansetzen der Proben

- Zunächst werden die 3 Flaschen mit Cola-Getränk (1=PET-Einweg, 2=PET-Mehrweg, 3=Glas-Mehrweg) nummeriert und gewogen. Ebenso werden vier kleine Joghurtbecher nummeriert und abgewogen.
- Mit Hilfe einer Reibschale mit Pistill werden ca. 3,5 g Kaliumhydroxid zerkleinert. Davon wiegt man in die Joghurtbecher jeweils 0,8 g ein.
- Der befüllte Joghurtbecher Nr. 1 wird zusammen mit der Cola-Flasche Nr. 1 in ein Einmachglas (Nr. 1) gestellt. Dieses wird sofort verschlossen.
- In der gleichen Weise verfährt man mit den Proben Nr. 2 und Nr. 3.
- In das vierte Einmachglas wird nur der befüllte Joghurtbecher Nr. 4 gestellt. Auch dieser Behälter wird umgehend verschlossen.
- Man notiert die Temperatur und lässt die vier Versuchsansätze 1 Woche lang bei Raumtemperatur stehen.

#### Untersuchung nach 1 Woche

- Der Rundkolben mit seitlichem Ansatz wird in einer Kristallisierschale mit kaltem Leitungswasser platziert, welche auf einem Heizrührer steht. Über ein gewinkeltes Ansatzrohr (seitlicher Schliff) wird die Verbindung zum Kolbenprober hergestellt.
- Die Proben in den Einmachgläsern werden jeweils einzeln untersucht: Cola-Flasche und Joghurtbecher mit Inhalt werden zunächst abgewogen.
- Zum Inhalt des Joghurtbechers fügt man anschließend 1 mL dest. Wasser hinzu, schwenkt um und wartet, bis sich alles gelöst hat. Der gesamte Inhalt wird mit Hilfe einer Pasteurpipette in den Rundkolben mit dem seitlichen Ansatz überführt (Rührmagnet).
- Dann wird das Aufsatzstück mit Septum auf den Rundkolben gesetzt. Mit Hilfe einer Spritze werden dem Inhalt des Rundkolbens tropfenweise unter Rühren 2 mL konz. Salzsäure hinzugefügt. (Das Septum wird dazu mit Hilfe der aufgesetzten Kanüle senkrecht durchgestochen. Während des vorübergehenden Auftretens der Gasentwicklung sollte die Zugabe besonders langsam erfolgen.)
- Nach Beendigung der Gasentwicklung entfernt man das Wasserbad, wartet etwa 1 min und liest das Volumen des entstandenen Gases am Kolbenprober ab.
- Bei Probe Nr. 1 wird zusätzlich der Inhalt des Kolbenprobers untersucht: Ein kleines Becherglas wird etwa zur Hälfte mit Barytwasser gefüllt (auf ein schwarzes Pappstück stel-

len). Der Inhalt des Kolbenprobers (aus der 1. Probe, Einwegflasche) wird langsam in das Barytwasser gedrückt. Dazu wird auf den Kolbenprober mit Hilfe eines Stückes Gummischlauch eine Pasteurpipette aufgesetzt.

- Mit den restlichen drei Ansätzen (2, 3 und 4) werden die gravimetrischen und volumetrischen Untersuchungen auf die gleiche Weise wie bei Probe 1 durchgeführt.
- Zur Ermittlung des Normvolumens werden Raumtemperatur und Luftdruck gemessen.

#### Versuchsergebnisse:

Als Ergebnisse sind hier zunächst die Normvolumina der pro Zeiteinheit freigesetzten Kohlenstoffdioxid-Portionen angestrebt. Dazu müssen die nachfolgenden Schritte durchlaufen werden.

- Zunächst werden die Massenabnahme der Flaschen und die Massenzunahme der Joghurtbecher mit ihrer Kaliumverbindung ermittelt.
- Von dem am Kolbenprober abgelesenen Volumen müssen zunächst wegen des Volumens der zugesetzten Salzsäure 2 mL abgezogen werden. Dadurch erhält man den Bruttowert.
- Von diesem Wert wird der Referenzwert ohne Cola-Flasche (Blindwert) abgezogen. Man erhält den Nettowert.
- Aus diesem Volumen-Nettowert wird mit Hilfe der „Allgemeinen Zustandsgleichung der Gase“ das Normvolumen errechnet. Alternativ kann es einem Tabellenwerk entnommen werden.

Die genannten Schritte sind exemplarisch in der nachfolgenden Tabelle 69 aufgeführt. Dabei steht in der letzten Zeile jeder Tabelle das Normvolumen an Kohlenstoffdioxid, welches von jeder der 3 Cola-Flaschen bei unterschiedlichen Temperaturen innerhalb von 7 Tagen freigesetzt wurde. Oben links in der Tabelle ist die Temperatur zum Zeitpunkt des Probenansatzes vermerkt, anschließend werden Temperatur und Luftdruck wie sie bei der Probennahme herrschten, angegeben, während unterhalb der Tabelle die Durchschnittstemperatur während des Messzeitraumes genannt wird. Volumina, welche aus einem Zeitraum ermittelt wurden, der größer oder kleiner als 7 Tage ist, wurden auf den Zeitraum von 7 Tagen umgerechnet. Dadurch werden alle für die Normvolumina angegebenen Werte miteinander vergleichbar. In der gleichen Weise wurden insgesamt 5 Messreihen durchgeführt.

Tabelle 69: Volumetrische Bestimmung von permeiertem CO<sub>2</sub> von Coca-Cola-Getränk aus verschiedenen Flaschenarten. Dauer: 7 Tage, Durchschnittstemperatur 21 °C. Das in der unteren Zeile angegebene Normvolumen bezieht sich auf 7 Tage.

Probe (21 °C)	PET 0,5 L; EW	PET 0,5 L; MW	Glas 0,2 L; MW	Blindwert
m (Flasche)	546,04 g	576,47 g	579,41 g	-
m (Becher)	6,62 g	5,81 g	6,47 g	5,61 g
m (KOH)	0,80 g			
n (KOH), theor.	0,014 mol			
Nach 7 Tagen	Temperatur: 21 °C		Luftdruck: 750 Torr	
m (Flasche)	545,69 g	576,26 g	579,39 g	-
Änderung	- 0,35 g	- 0,21 g	- 0,02 g	-
m (Becher mit Kaliumverbindung)	7,76 g	6,81 g	7,28 g	6,42 g
Änderung	+ 0,34 g	+ 0,20 g	+ 0,01 g	+ 0,01 g
Auflösen in dest. Wasser	1 mL			
Zugabe konz. Salzsäure (w = 25 %)	2 mL			
c (HCl),	7 mol / L			
n (HCl)	0,014 mol			
V (CO <sub>2</sub> ), brutto	45 mL	20 mL	7 mL	6 mL
V (CO <sub>2</sub> ), netto	39 mL	14 mL	1 mL	-
Nettowert, 7 Tage	39 mL	14 mL	1 mL	-
V <sub>0</sub> (CO <sub>2</sub> ), netto	36 mL	14 mL	1 mL	-

Aus den insgesamt 5 Messreihen lassen sich folgende allgemeine Aussagen machen:

- Die Massenzunahme der Kaliumverbindung entspricht relativ genau der Massenabnahme der Getränkeflasche mit dem Cola-Getränk. Dabei liegt die ausgesprochen geringe Massenveränderung des Blindwertes an der Grenze der Messgenauigkeit der Waage.
- Die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus den Einweg-PET-Flaschen ist mehr als doppelt so hoch wie aus den Mehrweg-PET-Flaschen. Demgegenüber ist die CO<sub>2</sub>-Freisetzung aus den Glasflaschen mit Kronenkorken-Verschluss nahezu vernachlässigbar gering.

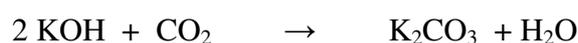
In der nachfolgenden Auswertung muss überprüft werden, ob die Massenveränderungen ausschließlich durch CO<sub>2</sub>-Verluste hervorgerufen werden oder ob auch der Verlust von Wasserdampf eine bedeutsame Rolle spielt. Ferner soll abgeschätzt werden, ob die Temperatur in der Umgebung der Getränkeflaschen eine entscheidende Rolle beim Substanzverlust spielt.

Wenn das freigesetzte Gas mit Hilfe des Kolbenprobers vorsichtig in Barytwasser geleitet wird, zeigt sich eine deutliche Trübung.

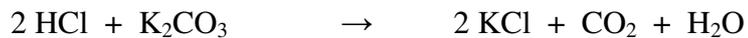
#### Auswertung:

Als besonders geeignetes Mittel zur Bindung von Wasser sowie von Kohlenstoffdioxid eignet sich Kaliumhydroxid.

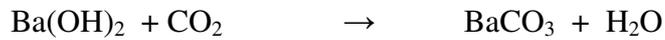
- Die Bindung von CO<sub>2</sub> durch KOH wird durch folgende Reaktionsgleichung beschrieben:



- Durch Zugabe von Salzsäure wird  $\text{CO}_2$  wieder freigesetzt.



- Durch Trübung bei Einleiten in Barytwasser wird  $\text{CO}_2$  nachgewiesen:



Aus den Messreihen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Da die Massenzunahme der Kaliumverbindung relativ genau der Massenabnahme der Getränkeflasche mit dem Cola-Getränk entspricht, ist davon auszugehen, dass die permeierten Substanzen fast vollständig von Kaliumhydroxid gebunden werden. Dies ist in Abb. 101 grafisch dargestellt.

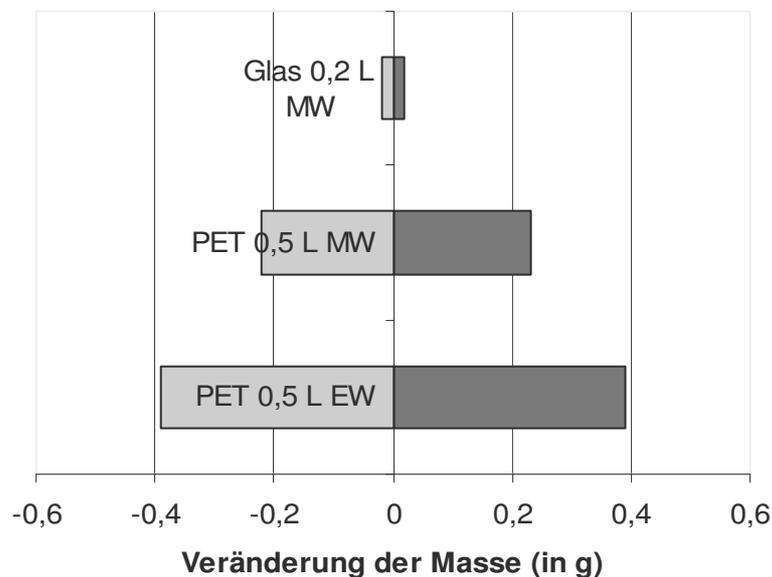


Abbildung 101: Massenveränderungen nach 1 Woche (24 °C): Die Getränkeflaschen standen zusammen mit einer Kaliumhydroxidportion in einem großen, dicht verschlossenen Einmachglas. Der Massenabnahme der Flaschen mit Füllung (helle Balken, links) entspricht stets eine etwa gleich große Massenzunahme an Kaliumverbindungen (dunkle Balken, rechts).

Tabelle 70: Massenänderung im Überblick, bezogen auf 7 Tage. (In der rechten Spalte ist jeweils die Massenzunahme der Kaliumverbindung erfasst.)

Messreihe Nr.	Temperatur	PET 0,5 L; EW		PET 0,5 L; MW		Glas 0,2 L; MW	
		$\Delta m$ (Flasche)	$\Delta m$ (Kaliumverb.)	$\Delta m$ (Flasche)	$\Delta m$ (Kaliumverb.)	$\Delta m$ (Flasche)	$\Delta m$ (Kaliumverb.)
1	21 °C	- 0,35 g	+ 0,34 g	- 0,21 g	+ 0,20 g	- 0,02 g	+ 0,01 g
2	20 °C	- 0,38 g	+ 0,38 g	- 0,24 g	+ 0,26 g	- 0,02 g	+ 0,02 g
3	25 °C	- 0,37 g	+ 0,39 g	- 0,26 g	+ 0,27 g	- 0,02 g	+ 0,02 g
4	23 °C	- 0,40 g	+ 0,38 g	- 0,24 g	+ 0,24 g	- 0,02 g	+ 0,02 g
5	22 °C	- 0,41 g	+ 0,44 g	- 0,25 g	+ 0,28 g	- 0,02 g	+ 0,04 g
Durchschnitt	22 °C	- 0,38 g	+ 0,39 g	- 0,24 g	+ 0,25 g	- 0,02 g	+ 0,02 g
Durchschnittliche Abweichung der Kaliumverbindung von der Massenänderung der Flasche		-	+ 0,01 g	-	+ 0,01 g	-	+ 0,00 g

- Aus den Messreihen (Tab. 70 sowie stellvertretend aus Tab. 69) ist auch erkennbar, dass die größten Substanzverluste bei den Einweg-PET-Flaschen auftreten. Dies liegt daran, dass die Wandung der Einweg-Flaschen dünner ist als die der Mehrweg-Flaschen aus PET. Bei Glasflaschen kann ein Substanzverlust nur über die Dichtungsmasse des Kronenkorkens erfolgen.
- Mit Hilfe von Tab. 70 lässt sich erkennen, dass der Temperatureinfluss zwischen 20 °C und 25 °C relativ gering bzw. vernachlässigbar ist.
- Es stellt sich nun noch die Frage, wie groß der Kohlenstoffdioxidanteil der permeierten Substanz ist. Dazu müssen zunächst die Massen der Kohlenstoffdioxid-Portionen aller einzelnen Proben aus den Normvolumina ermittelt werden. Anschließend wird der Durchschnittswert gebildet. Diese Werte lassen sich aus der folgenden Tab. 71 entnehmen. Zur Berechnung der Massen sind die Formeln  $n = \frac{V_0}{V_{mm}}$  sowie  $m = n \times M$  erforderlich.

Tabelle 71: Erhaltene Nettowerte der CO<sub>2</sub>-Volumina im Überblick, bezogen auf 7 Tage (In der rechten Spalte ist jeweils die Masse an Kohlenstoffdioxid berechnet.)

Messreihe Nr.	Temperatur	PET 0,5 L; EW		PET 0,5 L; MW		Glas 0,2 L; MW	
		V <sub>0</sub> (CO <sub>2</sub> )	m(CO <sub>2</sub> )	V <sub>0</sub> (CO <sub>2</sub> )	m(CO <sub>2</sub> )	V <sub>0</sub> (CO <sub>2</sub> )	m(CO <sub>2</sub> )
1	21 °C	36 mL	0,071 g	14 mL	0,028 g	1 mL	0,002 g
2	20 °C	38 mL	0,075 g	17 mL	0,033 g	2 mL	0,004 g
3	25 °C	38 mL	0,075 g	18 mL	0,035 g	2 mL	0,004 g
4	23 °C	46 mL	0,090 g	13 mL	0,026 g	0 mL	0,000 g
5	22 °C	52 mL	0,102 g	15 mL	0,029 g	1 mL	0,002 g
Durchschnitt	22 °C	42 mL	0,083 g	15 mL	0,029 g	1 mL	0,002 g

- Für die nachfolgende Tabelle 72 wurde jeweils der durchschnittliche Wasserdampfverlust ermittelt. Dies ist möglich, indem der volumetrisch ermittelte durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Verlust vom durchschnittlichen gravimetrisch ermittelten Gesamtverlust der drei Fla-

schensorten jeweils subtrahiert wird. Es zeigt sich dabei, dass der Wasserdampfverlust um das Vier- bis Achtfache höher ist als der CO<sub>2</sub>-Verlust.

Tabelle 72: Durchschnittliche prozentuale Anteile der beiden Permeanten Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf (WD) am jeweiligen durchschnittlichen Massenverlust der drei Flaschensorten

Durchschnittswerte	PET 0,5 L; EW		PET 0,5 L; MW		Glas 0,2 L; MW	
Massenverlust	0,38 g		0,24 g		0,02 g	
Komponenten	m(CO <sub>2</sub> )	m(WD)	m(CO <sub>2</sub> )	m(WD)	m(CO <sub>2</sub> )	m(WD)
Masse der Komponenten	0,083 g	0,297 g	0,029 g	0,211 g	0,002 g	0,018 g
Massenanteil	21,8 %	78,2 %	12,1 %	87,9 %	10,0 %	90,0 %

#### Hinweis:

Es müsste als Ergänzung noch mit Flaschen gearbeitet werden, die SiO<sub>x</sub>- beschichtet sind. Dann könnte man besser den Verlustanteil ermitteln, der auf Undichtigkeiten am Schraubdeckel zurück zu führen ist. Wo diese Flaschen im Handel erhältlich sind, ließ sich während der Anfertigung dieser Arbeit nicht ermitteln.

#### Abschließende Anmerkungen zur Verfahrensweise:

Wegen der hohen CO<sub>2</sub>-Löslichkeit in Wasser und in saurer Lösung muss das Flüssigkeitsvolumen gering gehalten werden.

Konzentrierte Salzsäure ( $w = 25\%$ ,  $c = 7 \text{ mol / L}$ ) eignet sich für die Freisetzung von CO<sub>2</sub> besonders gut, da die HCl-Dämpfe nicht störend wahrgenommen werden und somit auch außerhalb des Abzugs gearbeitet werden kann.

Einschließlich der Wasserportion zum Auflösen der entstandenen Kaliumverbindung entsteht allerdings ein Flüssigkeitsvolumen von 3 mL, welches maximal 2,7 mL CO<sub>2</sub> enthalten kann. Somit muss bei jeder Probe mit einer maximalen Volumenabweichung von 2,7 mL gerechnet werden.

Auf der Suche nach Möglichkeiten, das Flüssigkeitsvolumen zu reduzieren, wurde probenhalber auch konz. Schwefelsäure eingesetzt. Damit sind aber einige Probleme verbunden:

- Die Benutzung durch Schüler ist aus stofflicher Sicht als problematisch einzustufen.
- Konz. Schwefelsäure lässt sich nur schwer mit der Kanüle in die 2-mL-Spritze aufziehen.
- Die Schwefelsäure führt -selbst wenn sie äußerst vorsichtig nur tropfenweise zugesetzt wird- durch ihre große Lösungswärme zu starken Volumenausdehnungen und damit zu nicht mehr einschätzbaren Bewegungen des Kolbenprobers. Diese hohen Ansprüche an Feinmotorik und voraus schauendens Handeln können Schüler in der Regel nicht erfüllen.
- Die gummiartige Dichtung des Stempels in der Spritze wird schon während des Versuchs von der Schwefelsäure angegriffen. Die Leichtgängigkeit der Spritze wird stark beeinträchtigt. Mit Schwefelsäure kann sie nur einmal eingesetzt werden, während bei Verwendung von Salzsäure eine Benutzung von Spritze und Kanüle über viele Wochen hinweg möglich ist. Die Kanüle muss allerdings nach jedem Einsatz mit dest. Wasser gespült und abgetrocknet werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Einsatz von konz. Schwefelsäure zur Freisetzung von CO<sub>2</sub> völlig ungeeignet ist.

### Entsorgung:

- Kaliumhydroxid: Säuren und Laugen
- Salzsäure: Säuren und Laugen
- Bariumhydroxid-Lösung: anorganische Abfälle mit Schwermetallen

Literatur: [33]

## **V 4.2.4: Halbquantitativer Nachweis des Verlustes von Kohlenstoffdioxid und Wasser aus PET-Cola-Flaschen durch gravimetrische und titrimetrische Messungen**

SV, S II

### Materialien:

4 kleine Joghurtbecher aus PS oder PP, Waage, 4 große Einmachgläser (5 Liter), Reibschale mit Pistill, Messzylinder (50 mL), Becherglas (100 mL), Uhrglasdeckel, Pasteurpipette, Glasstab, Pipette (5 mL), Bürette (25 mL), Trichter zum Befüllen der Bürette, Thermometer

### Chemikalien:

3 verschiedenartige Flaschen mit Cola-Getränk (PET: 0,5 L Einweg; PET: 0,5 L Mehrweg; Glas: 0,2 oder 0,33 L Mehrweg), Kaliumhydroxid, neutralisierte Bariumchlorid-Lösung ( $c = 0,05 \text{ mol/L}$ ), Natronlauge ( $c = 0,1 \text{ mol/L}$ ), Phenolphthalein-Lösung ( $w = 0,1\%$ ; Lösungsmittel 4 mL Ethanol auf 1 mL Wasser), 0,1 N Oxalsäure-Lösung ( $c = 0,05 \text{ mol/L}$ )

### Sicherheitsvorschriften:

Kaliumhydroxid (ätzend, C), Bariumchlorid-Lösung (gesundheitsschädlich, Xn), Natronlauge (ätzend, C), Phenolphthalein-Lösung (leicht entzündlich, F), Oxalsäure-Lösung (gesundheitsschädlich, Xn)

### Hinweis zur Herstellung von neutralisierter Bariumchlorid-Lösung:

Man fügt einer Lösung von 50 mL Bariumchlorid-Lösung 10 Tropfen Phenolphthalein-Lösung hinzu. Dann gibt man, während man mit einem Glasstab umrührt, tropfenweise 0,1 M Natronlauge hinzu, bis eine schwache Rosafärbung erreicht ist.

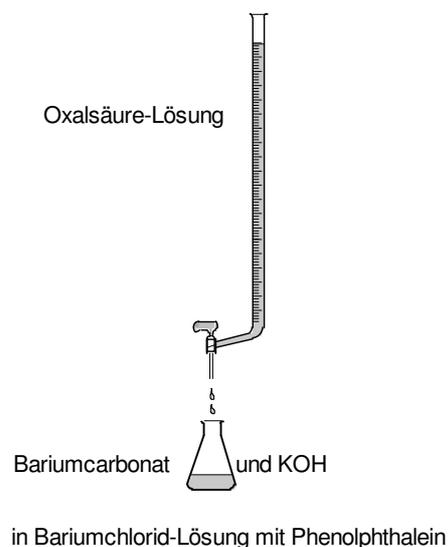


Abbildung 102: Versuchsaufbau zu Versuch 4.2.4

Zeitbedarf: Ansetzen der Proben 30 min, Auswertung nach 1 Woche 45 min

Durchführung:

Ansetzen der Proben wie bei Versuch 4.2.3

Untersuchung nach 1 Woche

- Zunächst werden Cola-Flasche und Joghurtbecher samt Inhalt aus Ansatz 1 abgewogen.
- In den Joghurtbecher füllt man 25 mL dest. Wasser und schwenkt um, bis sich die Kaliumverbindung aufgelöst hat.
- 5 mL der gelösten Kaliumverbindung aus dem Joghurtbecher werden in ein 100 mL-Becherglas überführt, welches 50 mL einer neutralisierten Bariumchlorid-Lösung enthält. Man deckt das Becherglas mit einem Uhrglas ab, wartet 10 min und fügt anschließend einige Tropfen Phenolphthalein-Lösung hinzu.
- Dann wird die Lösung im Becherglas mit Oxalsäure-Lösung bis zum Verschwinden der Rosafärbung titriert.
- Mit den folgenden Ansätzen Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 4 verfährt man auf die gleiche Weise.

Hinweis zur Organisation:

Die vier Proben können von vier Arbeitsgruppen parallel bearbeitet werden.

Ergebnisse:

- Die Massenzunahme der Kaliumverbindung entspricht relativ genau der jeweiligen Massenabnahme der Getränkeflasche mit dem Cola-Getränk.
- Die PET-Einweg-Flaschen zeigen mehr CO<sub>2</sub>-Verlust als die PET-Mehrweg-Flaschen. Die Glasflasche mit Kronenkorken gibt fast kein CO<sub>2</sub> ab.
- Tab. 73 zeigt exemplarische Ergebnisse.

Zusammenfassung der Einzelergebnisse in Tabellenform:

Tabelle 73: Freisetzung von Kohlenstoffdioxid aus verschiedenen Getränkeflaschen (EW=Einweg, MW=Mehrweg) innerhalb von 6 Tagen. Die Bezeichnung „m(Flasche)“ bezieht sich auf die Getränkeflasche mit Inhalt.

Probe (24 °C)	PET 0,5 L; EW	PET 0,5 L; MW	Glas 0,2 L; MW	Blindwert
m (Flasche)	547,79 g	573,84 g	579,45 g	-
m (Becher)	6,63 g	5,81 g	6,47 g	5,61 g
m (KOH)	0,80 g			
n (KOH), theor.	0,014 mol			
Nach 6 Tagen				
m (Flasche)	547,40 g	573,62 g	579,43 g	-
Änderung	- 0,39 g	- 0,22 g	- 0,02 g	-
m (Becher mit Kaliumverbindung)	7,82 g	6,84 g	7,29 g	6,42 g
Änderung	+ 0,39 g	+ 0,23 g	+ 0,02 g	+ 0,01 g
Auflösen in dest. Wasser	25 mL			
Davon 5 mL	in 50 mL neutralisierte BaCl <sub>2</sub> -Lösung (c = 0,05 mol / L) geben, welche mit einigen Tropfen Phenolphthalein versetzt wurde (Rosafärbung)			
Titrieren mit 0,1 N Oxalsäure (c = 0,05 mol/L)	bis zum Verschwinden der Rosafärbung			
Verbrauch an Oxalsäure für noch freies KOH	15,0 mL	21,8 mL	24,6 mL	24,7 mL
Für verbrauchtes KOH wären nötig (errechnet)	9,7 mL	2,9 mL	0,1 mL	-
Errechneter Wert x 5	48,5 mL	14,5 mL	0,5 mL	-
n(Oxalsäure)	0,002425 mol	0,000725 mol	0,000025 mol	-
n(KOH), gebunden	0,004850 mol	0,001450 mol	0,000050 mol	-
n(CO <sub>2</sub> ), gebunden	0,002425 mol	0,000725 mol	0,000025 mol	-
V <sub>o</sub> (CO <sub>2</sub> ), 6 Tage	54,3 mL	16,2 mL	0,6 mL	-
m(CO <sub>2</sub> ), 6 Tage	0,11 g	0,03 g	0,001 g	

#### Auswertung: Siehe auch Versuch 4.2.3

- Da die Massenzunahme der Kaliumverbindung relativ genau der Massenabnahme der Getränkeflasche mit dem Cola-Getränk entspricht, ist davon auszugehen, dass die permeierten Substanzen fast vollständig von Kaliumhydroxid gebunden werden.
- Das hier nachgewiesene CO<sub>2</sub> muss durch die Wandung bzw. die Dichtung aus der PET-Flasche entwichen sein.
- Die PET-Einweg-Flaschen zeigen mehr CO<sub>2</sub>-Verlust als die PET-Mehrweg-Flaschen und damit eine entsprechend höhere CO<sub>2</sub>-Durchlässigkeit. Die Glasflasche mit Kronenkorken gibt fast kein CO<sub>2</sub> ab.
- Es ist davon auszugehen, dass die Differenz zwischen dem Massenverlust durch CO<sub>2</sub> und dem gesamten Massenverlust auf die Abgabe von Wasser zurückzuführen ist. Wenn beispielsweise der Gesamtmassenverlust 0,47 g beträgt und der CO<sub>2</sub>-Verlust 0,11 g, dann ist mit einem Wasserdampfaustritt von 0,36 g zu rechnen.

#### Nähere Erläuterungen zur Auswertung in Form eines Schülerarbeitsblattes

##### Voraussetzungen:

- Versuchsvorbereitung zum Ansetzen der Proben aus V 4.2.3 bzw. V 4.2.4 (Tab. 69, 73)
- Versuchsdurchführung zur Probenuntersuchung nach 1 Woche aus V 4.2.4 (Tab. 73)

#### Aufgabenstellungen zur titrimetrischen Erfassung von gebundenem Kohlenstoffdioxid (Musteraufgabe zur Auswertung der Messergebnisse nach 1 Woche)

Der Verbrauch an Oxalsäure ( $c = 0,05 \text{ mol/L}$ ) bis zur Rosafärbung betrage bei der Probe (Getränkeflasche) 15,0 mL, bei der Blindprobe hingegen 25,0 mL. Aus diesen Vorgaben soll die Masse an gebundenem CO<sub>2</sub> ermittelt werden.

#### Schritt 1: Bindung von Kohlenstoffdioxid an Kaliumhydroxid

Formulieren Sie die Reaktionsgleichung der Bindung von Kohlenstoffdioxid durch Kaliumhydroxid.

Geben Sie außerdem das Stoffmengenverhältnis dieser beiden Stoffe an.

#### Schritt 2: Ausfällung der Carbonat-Ionen

Die entstandenen Carbonat-Ionen werden als schwerlösliches Bariumcarbonat mit Bariumchlorid-Lösung im Überschuss gefällt.

Formulieren Sie die Reaktionsgleichung.

#### Schritt 3: Titrimetrische Ermittlung der Stoffmenge von nicht verbrauchtem KOH

Das in Lösung verbleibende Kaliumhydroxid wird anschließend mit Oxalsäure-Maßlösung titriert.

Formulieren Sie die Reaktionsgleichung.

Geben Sie außerdem das Stoffmengenverhältnis zwischen benötigter Oxalsäure-Maßlösung und nicht verbrauchtem Kaliumhydroxid an.

(Anmerkung: Das entstandene Bariumcarbonat wird von Oxalsäure nicht angegriffen.)

Schritt 4: Rechnerische Ermittlung der Oxalsäure-Portion, die für die Titration von bereits verbrauchtem Kaliumhydroxid nötig gewesen wäre

Diese Portion entspricht der Differenz zwischen dem Oxalsäure-Verbrauch zur Titration der Blindprobe und zur Titration der Probe aus der Getränkeflasche.

Berechnen Sie diese Differenz aus den gegebenen Volumina.

(Anmerkung: Der errechnete Wert muss mit dem Faktor 5 multipliziert werden, da nur ein Fünftel der Probe für die Titration entnommen wurde.)

Schritt 5: Zusammenhang zwischen den Stoffmengen der errechneten Oxalsäure-Portion und der gebundenem Kohlenstoffdioxid-Portion

Leiten Sie aus den bisherigen Schritten 1, 3 und 4 das Stoffmengenverhältnis ab.

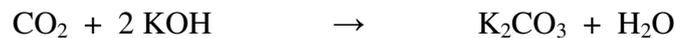
Berechnen Sie daraus die Stoffmenge an gebundenem Kohlenstoffdioxid.

Schritt 6: Normvolumen und Masse der Kohlenstoffdioxid-Portion

Berechnen Sie die entsprechenden Werte aus der Stoffmenge von Kohlenstoffdioxid.

Lösung:

Zu Schritt 1:

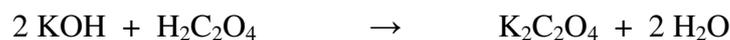


$$\frac{n(\text{CO}_2)}{n(\text{KOH})} = \frac{1}{2}$$

Zu Schritt 2:



Zu Schritt 3:



$$\frac{n(\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4)}{n(\text{KOH})} = \frac{1}{2}$$

Zu Schritt 4:

$$V(\text{Oxalsäure für gebundenes KOH}) = 25,0 \text{ mL} - 15,0 \text{ mL} = 10 \text{ mL}$$

Nach Multiplikation mit dem Faktor 5 ergibt sich:

$$V(\text{Oxalsäure für gebundenes KOH}) = 10 \text{ mL}.$$

Dieser Wert gibt an, wie viel Oxalsäure für die Titration von bereits gebundenem KOH nötig gewesen wäre.

Zu Schritt 5:

$$n(\text{Oxalsäure, errechnet}) = n(\text{CO}_2)$$

$$n(\text{Oxalsäure, errechnet}) = 0,05 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times 0,050 \text{ L} = 0,0025 \text{ mol}$$

Somit ergibt sich für gebundenes Kohlenstoffdioxid die Stoffmenge  $n(\text{CO}_2) = 0,0025 \text{ mol}$ .

### Zu Schritt 6:

$$V_o(\text{CO}_2) = 0,0025\text{mol} \times 22,4 \frac{\text{L}}{\text{mol}} = 0,056\text{L} = 56\text{mL}$$

$$m(\text{CO}_2) = 0,0025\text{mol} \times 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 0,11\text{g}$$

In dem einwöchigen Untersuchungszeitraum wurden aus der Getränkeflasche 0,11 g Kohlenstoffdioxid abgegeben. Dies entspricht 56 mL unter Normbedingungen.

### Hinweis auf verwendetes Kaliumhydroxid:

Bei der Titration mit Salzsäure ( $c = 0,1 \text{ mol/L}$ ) bis zum Farbumschlag von gelb nach rot (Methylorange) zeigt sich, dass 0,80 g abgewogenes Kaliumhydroxid maximal nur 0,0123 mol statt 0,014 mol KOH enthalten. Dies entspricht einem Gesamtalkaligehalt von 88%. So hoch ist auch der maximale Massenanteil an KOH. Im vorliegenden Versuch ist daher nicht der absolute Gehalt an KOH von Bedeutung, sondern nur die Stoffmenge an verbrauchtem KOH, also die Differenz zwischen Probenwert und Blindwert. Diese Differenz zur Blindprobe wird der quantitativen Ermittlung von  $\text{CO}_2$  zugrunde gelegt (maximaler Verbrauch an Oxalsäure-Lösung bei der Titration der Blindprobe).

### Entsorgung:

- Kaliumhydroxid-Reste in den Behälter „Säuren und Laugen“
- Bariumcarbonat abfiltrieren, Reste löslicher Bariumsalze mit Natriumsulfat ausfällen und zu den Feststoffabfällen geben
- Oxalsäurereste mit Kalkwasser ausfällen und zu den Feststoffabfällen geben.

Literatur: [124, S. 113 f.]

## **V 4.2.5: Nachweis von Kohlenstoffdioxid in den Wänden von Getränkeflaschen mit Kalkwasser**

SV, S I

### Geräte:

2 Standzylinder (Innendurchmesser 7,5 cm, Höhe 35 cm) mit Glasdeckel, Schliff Fett, Abdeckplatten oder Eisenplatten( z.B. 10 cm x 10 cm)

### Chemikalien:

„Coca-Cola“-Flasche (0,5 L-PET, Einweg), Mineralwasser „evian“ ohne Kohlensäure, Kalkwasser (gesättigte Calciumhydroxid-Lösung; ätzend, C)

Versuchsdauer: Ansetzen des Versuchs 15 min, Wartezeit 1 Tag

### Versuchsdurchführung:

- Eine außen vollständig gesäuberte PET-Cola-Flasche wird geleert, mit destilliertem Wasser gefüllt und verschlossen in einen Standzylinder gestellt.
- Der Rand des Standzylinders wird mit Fett bestrichen. Man füllt ihn bis zum Rand mit Kalkwasser und legt zur Verhinderung des Luftzutritts eine Glasplatte auf.
- Eine PET-Flasche, welche Mineralwasser ohne Kohlensäure enthält, wird mitsamt ihrer Originalfüllung auf die gleiche Weise mit Kalkwasser behandelt.

#### Versuchsergebnis:

Nach einem Tag haben sich außen auf der PET-Cola-Flasche weiße Ablagerungen gebildet. Die Flasche mit „stillem“ Mineralwasser hingegen sieht transparent aus und zeigt keine derartigen Ablagerungen.

#### Auswertung:

Bei der Ablagerung handelt es sich um Kalk, welcher durch Reaktion des Kalkwassers mit dem Kohlenstoffdioxid entstanden ist. Der Vorgang lässt sich mit folgender Reaktionsgleichung darstellen:



Auch dieses Experiment zeigt, dass Kohlenstoffdioxid in der Wand von PET-Flaschen gespeichert werden kann.

Entsorgung: Kalkwasser zu Laugen und Säuren

Literatur: [33]

### **V 4.3: Wasserdampfdurchlässigkeit von Kunststoff-Folien**

LV, S I

#### Geräte:

Exsikkator mit einem Innendurchmesser von mindestens 15 cm, in die Vertiefung des Exsikkators passende Kristallisierschale (diese mit konz. Natriumsulfat-Lösung gefüllt), flache Schraubgläser (z.B. Wurstgläser), dazu kreisrund ausgeschnittener Metalldeckel mit Dichtung (Twist-Off-Deckel), Hygrometer zur Messung der rel. Feuchte, Waage, Schliff fett, Mikrometerschraube

#### Chemikalien:

Gesättigte Kaliumsulfat-Lösung (11,1 g auf 100 g Wasser; w = 10%), Sicapent<sup>®</sup> (Phosphor-pentoxid, ätzend, C), verschiedene Folien bekannter Dicke



Abbildung 103: Versuchsaufbau zu Versuch 4.3

Versuchsdauer: Vorbereitung der Probe 15 min, Wartezeit 7 Tage, Abwiegen 5 min

Versuchsdurchführung:

- Eine Kristallisierschale wird mit konz. Kaliumsulfat-Lösung gefüllt und in den unteren Teil eines Exsikkators gestellt. Die perforierte Keramikplatte wird eingelegt.
- Die Prüffolie wird zurechtgeschnitten und in den ausgestanzten Twist-Off-Deckel eingelegt. (Sehr dünne Folien, z.B. Frischhaltefolien, werden hingegen nicht zurechtgeschnitten, sondern straff auf die Mündung des Glases gezogen.)
- In jedes Glas werden genau 5,00 g Sicapent<sup>®</sup> eingewogen.
- Nach dem Einfetten des Randes wird der Deckel vorsichtig angeschraubt. Faltenbildung der Folie muss dabei vermieden werden. (Sehr dünne Folien stehen seitlich über, wenn der Twist-Off-Deckel angeschraubt wird.)
- Das verschlossene Schraubglas mit der Prüffolie wird in den Exsikkator gestellt. Die Schraubgläser werden wöchentlich abgewogen (Raumtemperatur messen).

Hinweise zur Auswertung:

Der Eintrag von Wasser durch die Prüffolie wird gravimetrisch ermittelt. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu ermöglichen, sollten die ermittelten Massenzunahmen auf eine Folie der Größe von 1 m<sup>2</sup> und auf den Zeitraum eines Tages bezogen werden. Die in den ausgeschnittenen Twist-Off-Deckel eingelegte Folie hat einen Durchmesser von 7,0 cm und somit eine Fläche von  $A = 38,48 \text{ cm}^2$ . Um die Ergebnisse auf 1 m<sup>2</sup> zu beziehen, müssen die Werte mit dem Faktor  $\frac{10000}{38,48} = 259,9$  multipliziert werden. Um die Ergebnisse noch auf 1

Tag zu beziehen, müssen die Werte noch durch 7 dividiert werden. Die experimentell ermittelte Massenzunahme muss also letztlich mit dem Faktor  $\frac{259,9}{7} = 37,13$  multipliziert werden.

Mit folgenden Materialien wurden Experimente zur Wasserdampfdurchlässigkeit durchgeführt:

Teil 1: PE-LD-Folien

Teil 2: PP-Folien

Teil 3: Folien geringer Dicke

Teil 4: PE-LD und Zellglas

Teil 5: Aluminium als Barrierschicht in einem Verbund

Teil 6: Keksverpackung (Langzeitversuch)

## Versuchsergebnisse:

Tabelle 74: Durchlässigkeiten für Wasserdampf (WDD), Versuchsergebnisse im Überblick

Material	Dicke in $\mu\text{m}$	nähere Bezeichnung	Anzahl der Proben	Massenzunahme pro Woche in g	WDD in $\frac{\text{g}}{\text{m}^2 \times d}$	WDD, bezogen auf 100 $\mu\text{m}$
<b>PE-LD-Folien (Versuchsteil 1)</b>						
PE-LD	100	-	1	0,035	1,30	1,30
PE-LD	40	-	1	0,075	2,78	1,11
PE-LD	12	Frischhaltefolie „Toppits“	3	0,30	11,14	1,34
<b>PP-Folien (Versuchsteil 2)</b>						
PPN	100	-	1	0,030	1,12	1,12
PPN	40	Fa. Diroll	5	0,054	2,01	0,80
PP	12	Fleischfolie	2	0,143	5,31	0,64
<b>Folien geringer Dicke (Versuchsteil 3)</b>						
PE-LD	12	Frischhaltefolie „Toppits“	3	0,30	11,14	1,34
PE-HD	12	Frischhaltefolie „alio“	3	0,153	5,68	0,68
PET	14	Bratschlauch	2	0,46	17,08	2,39
<b>Vergleich PE-LD und Cellophan (Versuchsteil 4)</b>						
PE-LD	40	Gefrierbeutel	2	0,05	1,86	0,74
Zellglas	25	Einmachfolie „deti“	2	4,83	179,34	44,84
<b>PP-Al-Verbundfolie und ihre PP-Komponenten (Versuchsteil 5)</b>						
PP-Al-PP	54	Bahlsen „Crunchip“	4	0,0125	0,46	-
davon Außen-PP	33	Al-Schicht durch HCl zersetzt	1	0,05	1,86	0,61
davon Innen-PP	23	Al-Schicht durch HCl zersetzt	1	0,07	2,60	0,60

## Auswertung:

### Teil 1: PE-LD-Folien

Die in Tabelle 74 dargestellten Ergebnisse werden durch das nachfolgende Diagramm (Abb. 104) verdeutlicht. Die Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) der dünnen Folie (12  $\mu\text{m}$ ) ist knapp zehnmal so hoch wie die Durchlässigkeit der dicken Folie (100  $\mu\text{m}$ ).

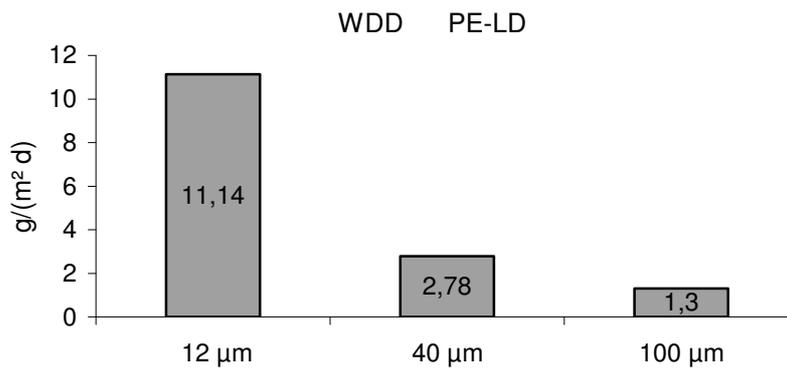


Abbildung 104: Durchlässigkeiten für Wasserdampf (WDD) von 3 PE-LD-Folien, darunter eine Frischhaltefolie. Die Durchlässigkeiten wurden ermittelt bei Zimmertemperatur und einer Differenz der rel. Feuchte von 0 % - 97 %.

Auswertung:

Man erkennt, dass Wasserdampfdurchlässigkeit und Foliendicke annähernd umgekehrt proportional zueinander verlaufen. Es gilt also unter sonst gleichen Bedingungen für die Durchlässigkeit  $Q$  und die Dicke  $d$ :  $Q \sim \frac{1}{d}$  [11, S. 372, 374], [18, S. 105 f.].

Diese Annahme wird auch gestützt durch Einbeziehung der Folie mittlerer Dicke: Die 40 µm dicke Folie aus PE-LD zeigt eine etwas mehr als doppelt so große Durchlässigkeit wie die 100 µm dicke Folie.

Teil 2: PP-Folien

Mit diesem Befund können die vorausgehenden Ergebnisse (PE-LD) und die daraus gezogenen Schlüsse bestätigt werden. Auch bei Polypropylen zeigt sich tendenziell ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen Foliendicke und Wasserdampfdurchlässigkeit. Dies wird durch das nachfolgende Diagramm verdeutlicht (Abb. 105).

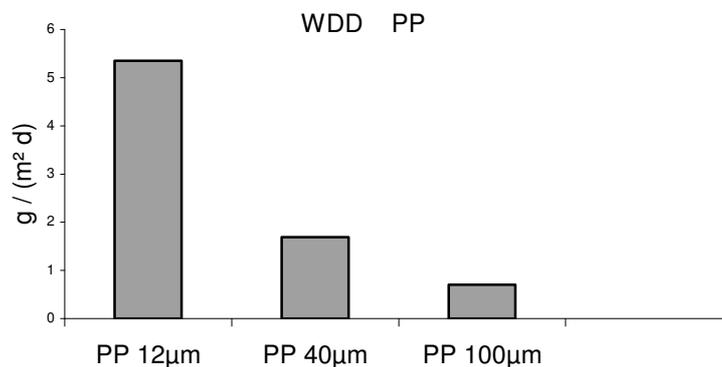


Abbildung 105: Durchlässigkeiten für Wasserdampf (WDD) von 3 PP-Folien, darunter eine Frischhaltefolie (12 µm). Die Durchlässigkeiten wurden ermittelt bei Zimmertemperatur und einer Differenz der rel. Feuchte von 0 % - 97 %.

### Teil 3: Folien geringer Dicke

Wie die Tab. 74 zeigt, findet man bei PET die höchste, bei PE-HD und PP hingegen die geringste Durchlässigkeit für Wasserdampf. Die Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) von PE-LD ist etwa doppelt so hoch wie bei PE-HD und PP. Dies wird durch das folgende Diagramm verdeutlicht (Abb. 106).

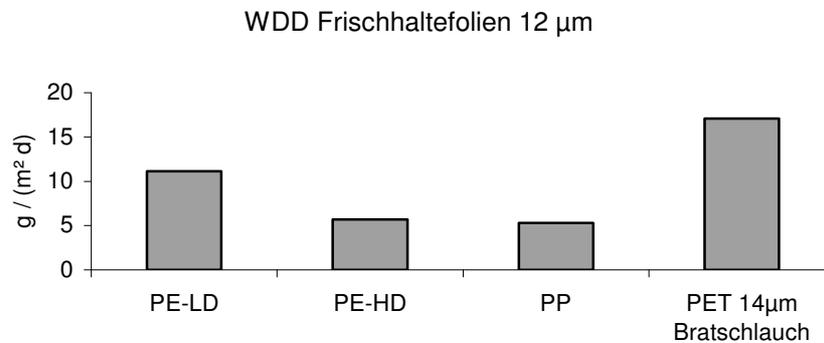


Abbildung 106: Durchlässigkeiten für Wasserdampf (WDD) von 4 sehr dünnen Folien. Die Durchlässigkeiten wurden ermittelt bei Zimmertemperatur und einer Differenz der rel. Feuchte von 0 % - 97 %.

#### Auswertung:

Für die polaren Wassermoleküle zeigt der Polyester PET mit seinen polaren C-O-Bindungen die größte Durchlässigkeit. Das völlig unpolare PE-LD mit seinen C-C- und C-H-Bindungen zeigt nur eine etwa halb so große Durchlässigkeit wie PET. Dass PE-HD die geringste Durchlässigkeit unter den vier Kunststoffen zeigt, liegt an dem höheren Kristallinitätsgrad, welcher sich auch als größere Dichte zeigt. Obwohl PP eine geringere Dichte als PE-LD besitzt, zeigt es eine geringere Durchlässigkeit als PE-LD. Vermutlich bewirkt ein hohes Maß an Taktizität im PP-Polymeren diesen Effekt.

### Teil 4: PE-LD und Zellglas

Die Einmachfolie zeigt eine hundertmal größere Durchlässigkeit für Wasserdampf als der Gefrierbeutel (PE-LD). Die wird durch folgendes Diagramm verdeutlicht (Abb. 107).

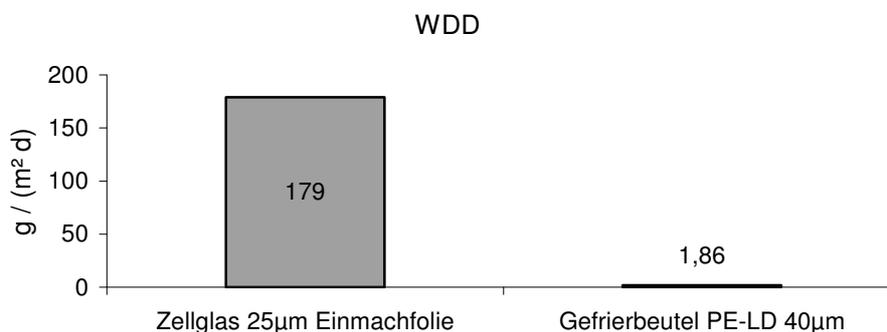


Abbildung 107: Durchlässigkeiten für Wasserdampf (WDD) von 2 Folien, die sich in ihrer Polarität deutlich unterscheiden. Die Durchlässigkeiten wurden ermittelt bei Zimmertemperatur und einer Differenz der rel. Feuchte von 0% - 97 %.

#### Auswertung:

Die Ursachen für die Unterschiedlichkeit der Durchlässigkeiten sind – wie bei Versuchsteil 3 – auf die Verschiedenheit von Polarität, Dichte und Ordnungsgrad der Molekülketten zurück-

zuführen. Der polare Charakter der Folie aus Regenerat-Cellulose ermöglicht eine leichte Anlagerung der Dipol-Moleküle des Wassers. Dies ist bei dem unpolaren Gefrierbeutel aus PE-LD nicht der Fall.

#### Teil 5: Aluminium als Barrierschicht in einem Verbund

Untersucht wurde die Wasserdampfdurchlässigkeit einer aluminiumhaltigen Folie zur Verpackung von Kartoffelchips. Zersetzt man die Aluminiumschicht mit 18%iger Salzsäure und untersucht die beiden Kunststofffolien jeweils einzeln, so wird die Wirkung des Aluminiums sofort deutlich. Die Chipsverpackung von Bahlsen „Crunchip“ zeigt als Al-Verbund eine wesentlich geringere Wasserdampfdurchlässigkeit als die einzelnen PP-Schichten. Dies geht aus Tabelle 74 hervor und wird im folgenden Diagramm deutlich (Abb. 108).

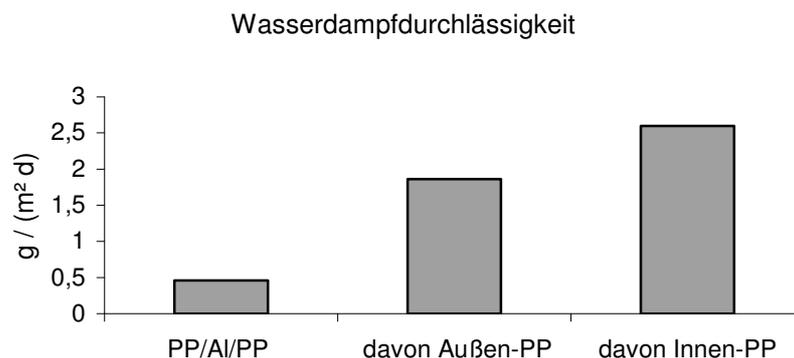


Abbildung 108: Durchlässigkeiten für Wasserdampf bei einer Verbundfolie mit einer Aluminiumschicht (Verpackung für Kartoffelchips, 54 µm). Die beiden isolierten PP-Folien (33 µm und 23 µm) zeigen eine wesentlich höhere Durchlässigkeit als die Verbundfolie. Die Durchlässigkeiten wurden ermittelt bei Zimmertemperatur und einer Differenz der rel. Feuchte von 0 % - 97 %.

#### Auswertung:

Aluminium eignet sich auch für Wasserdampf gut als Sperrschicht. Dies wird aus dem Diagramm ersichtlich. Wasserdampfdichtigkeit und Gasdichtigkeit von Aluminiumverbunden werden als sehr hoch eingestuft [11, S. 186]. Die Packungsdichte der Aluminiumatome verhindern einen Durchtritt von Wassermolekülen. Dies gilt auch für aufgedampfte Aluminiumschichten mit einer Dicke von nur 0,05 µm.

#### Anmerkung zur Auswertung und zum Vergleich eigener Ergebnisse mit Literaturwerten

Um unterschiedliche Stoffe hinsichtlich ihrer Durchlässigkeit miteinander vergleichen zu können, muss man sie nicht nur auf die gleiche Temperatur und relative Feuchte beziehen, sondern man muss auch auf die gleiche Foliendicke Bezug nehmen. Die Beträge haben die Einheit  $\frac{g}{m^2 \times d}$  und werden in der folgenden Tabelle 75 – näherungsweise - mit Literaturwerten verglichen.

Tabelle 75: Vergleich der Wasserdampfdurchlässigkeiten verschiedener Kunststofffolien bei Zimmertemperatur und einer Differenz der rel. Feuchte von ca. 97% [11, S. 83]

Folienmaterial (100 µm)	Literatur	Eigene Messung
PE-LD	0,7 - 1,2	~ 1,2
PE-HD	0,2 - 0,3	0,68
PP	0,2 - 0,9	0,7 - 1,1
PET	1,5 - 2	2,39

Eine Darstellung als Diagramm (Abb. 109) zeigt, dass die Tendenzen der Durchlässigkeiten übereinstimmen. Die Wasserdampfdurchlässigkeit zeigt bei dem Kunststoff PET einen höheren Wert als bei PE-LD. Die Durchlässigkeiten für PE-HD zeigen bei beiden Quellen die kleinsten Werte.

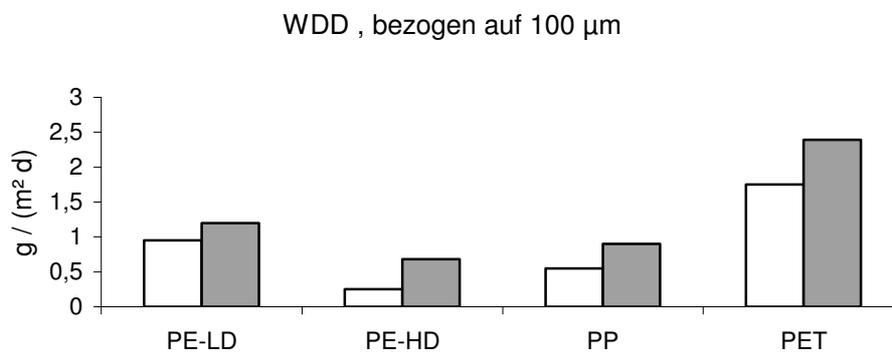


Abbildung 109: Wasserdampfdurchlässigkeit (WDD) verschiedener Folien bei ca. 20 °C, umgerechnet auf eine Dicke von 100 µm. Links: Werte, die auf Literaturangaben beruhen. Rechts: selbst ermittelte Werte.

Anmerkung zur Versuchsaapparatur:

Bei dem beschriebenen Versuchsverfahren ist stets damit zu rechnen, dass Undichtigkeiten an der Kontaktfläche Glasrand-Folie bzw. Folie-Deckeldichtung auftreten. Bei manchen Folien sind Faltenbildungen nicht zu vermeiden. Dadurch können die Messwerte beeinflusst werden.

Teil 6: Keksverpackung (Langzeitversuch)

Eine Kekspackung mit PP-Folie wurde in einer Umgebung von >90% rel. Feuchte in einem Exsikkator gelagert. Die gesamte Packung wurde wöchentlich abgewogen. Es war eine stetige Massenzunahme zu verzeichnen (Abb. 110).

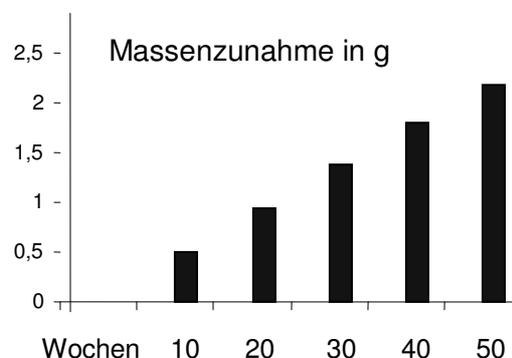


Abbildung 110: Wasseraufnahme von Keksen durch eine PP-Folie hindurch, ermittelt als Massenzunahme über einen Zeitraum von einem Jahr bei einer Durchschnittstemperatur vom 22 °C. Die Masse der Kekspackung betrug anfänglich 27,55 g.

#### Auswertung:

Es zeigt sich, dass ein permanenter Eintrag von Wasserdampf über sehr lange Zeit sogar durch eine unpolare PP-Folie stattfindet. Ein Schutz des trockenen Füllgutes (Kekse) vor Wasserdampf ist daher nur für einen begrenzten Zeitraum möglich. Die relative Feuchte über einer gesättigten Kaliumsulfat-Lösung ist von möglichen Schwankungen der Raumtemperatur relativ unabhängig. Zwischen 15 °C und 30 °C variiert die relative Feuchte nur zwischen 97 und 98% [171].

#### Entsorgung:

- Phosphor(V)-oxid: Säuren und Laugen
- Kunststoff-Folien: Hausmüll

Literatur: [11], [18], [171]

### **V 4.4: Untersuchung der Permeabilität ausgewählter Kunststoff-Folien für einen fettlöslichen Farbstoff**

LV, S II

#### Geräte:

Schere, mehrere Osmometer, Schraubenschlüssel Größe 10, 2 Pasteurpipetten, Gummihütchen für Pasteurpipetten zum Verschließen der Apparatur, Spektralphotometer, z.B. „PM7“ der Firma ZEISS

#### Chemikalien:

PE-LD-Folien unterschiedlicher Dicke (z.B. Gefrierbeutel), Verbundfolien (z.B. Käsefolie aus Polyamid/Polyethylen, PA/PE; Verbundfolie mit einer Aluminiumschicht.), Ethanolsche Lösung von Sudanrot 7B (10 mg Sudanrot 7B auf 50 mL Ethanol)

#### Sicherheitsvorschriften:

Sudanrot 7B (gesundheitsschädlich, Xn), Ethanol (leicht entzündlich, F)

Versuchsdauer: Vorbereitung und Befüllung des Osmometers 15 min, Wartezeit mindestens 1 Woche, Extinktionsmessung 5 min

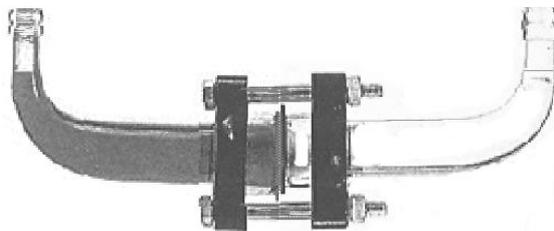


Abbildung 111: Versuchsaufbau zu Versuch 4.4 (links die vorgelegte ethanolische Lösung von Sudanrot 7B, rechts Ethanol, dazwischen Dichtungsscheibe und Prüffolie)

#### Durchführung:

- Aus jeder der zu untersuchenden Folien wird ein Stück ausgeschnitten, welches etwas größer als die Gummidichtung des Osmometers ist. Das Folienstück wird auf den Dichtungsring gelegt. Dann werden die beiden Schenkel des Osmometers zusammengefügt (Abb. 111).
- Das Osmometer wird mit einer Gabelklemme am Stativ befestigt. Dabei orientiert man das Osmometer so, dass derjenige Schenkel, welcher direkt an die ausgeschnittene Kunststoff-Folie grenzt, auf der rechten Seite steht.

- Dieser Schenkel (rechts) wird bis etwa 3 cm unterhalb der Öffnung mit Ethanol aufgefüllt. In den anderen Schenkel (links) füllt man entsprechend 25 mL Farbstoff-Lösung. Die Öffnungen der beiden Schenkel werden mit Pipettierhütchen verschlossen.
- Man wartet 1 Woche und überprüft, ob eine Rotfärbung auch im rechten Schenkel des Osmometers auftritt, welcher mit Ethanol gefüllt wurde.
- Mit dem Fotometer wird die Extinktion der Flüssigkeit aus dem rechten Schenkel bei 550 nm gemessen. Die Messung wird wöchentlich wiederholt.

### Teil 1: Vergleichende Untersuchung einer Verbundfolie (PA/PE) und einer Monofolie (PE-LD)

#### Versuchsergebnisse:

Wenn die beiden Schenkelhälften durch eine Folie aus Polyethylen (PE-LD) begrenzt sind, zeigt sich eine deutliche Rotfärbung auf der ursprünglich farblosen Seite. Beim Einsatz der Verbundfolie aus Polyamid/Polyethylen (PA/PE) hingegen bleibt das Ethanol in dem einen der beiden Schenkel der Apparatur farblos. Die nachfolgende Abbildung 112 zeigt anhand der Extinktion die unterschiedlichen Konzentrationsverläufe des Farbstoffes an. Zur Prüfung der Farbstoff-Durchlässigkeit wurden zwei unterschiedliche Folien eingesetzt.

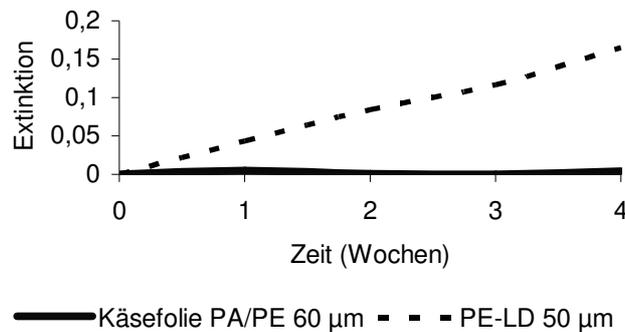


Abbildung 112: Untersuchung der Durchlässigkeit der Folien PE-LD und PA/PE für den unpolaren Farbstoff Sudanrot 7B

Während der Folienverbund keine nennenswerte Durchlässigkeit zeigt, findet bei der PE-LD-Vergleichsfolie eine deutliche Permeation fettlöslicher Stoffe statt. Mehrere Vergleichsmessungen bestätigen diesen Befund.

#### Deutung:

Da es sich bei Sudanrot um eine fettlösliche Substanz handelt, kann diese das völlig unpolare Polyethylen (PE-LD) gut passieren. Das Polyamid aus der Verbundfolie (PA/PE) hingegen ist polar. Diese Schicht jedoch kann der unpolare Farbstoff nicht durchdringen. Die Polyamid-schicht allein hat die Barrierefunktion für Fette.

### Teil 2: Untersuchung von Folien des gleichen Materials (PE-LD) mit unterschiedlicher Dicke

#### Versuchsergebnisse:

Bei jeder der drei Kurven in Abb. zeigt sich in den ersten Wochen ein linearer Anstieg. Somit gilt für den Fluss  $Q$  des permeierenden Stoffes:

$$Q \sim t$$

Zwischen der 50 µm- und der 12 µm-Kurve zeigt sich eine deutliche Antiproportionalität zwischen Stoffdurchfluss  $Q$  und Dicke  $d$ . Ein Fünftel der Dicke bewirkt einen etwa fünffachen Durchfluss:

$$Q \sim 1/d$$

Bei der 50µm- und der 110 µm-Kurve ist diese Antiproportionalität allerdings nicht erkennbar. Diese Ergebnisse gehen aus folgender Abbildung 113 hervor.

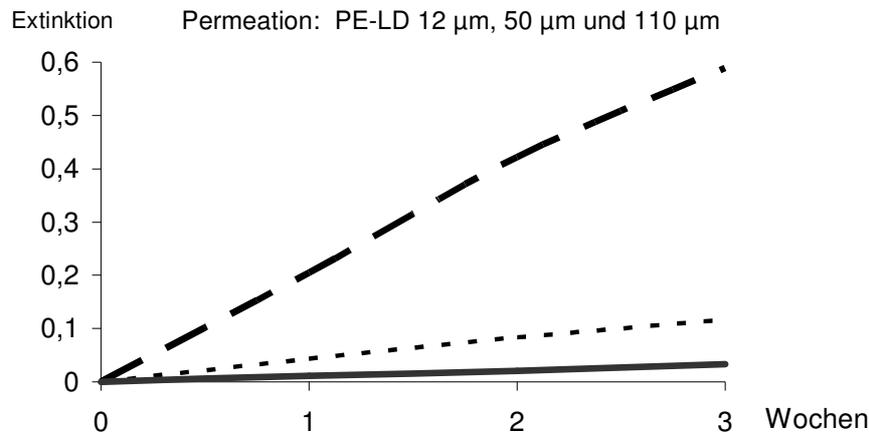


Abbildung 113: Durchlässigkeit verschiedener Folien aus PE-LD für Sudanrot 7B, ermittelt aus der Konzentrationsänderung des Farbstoffes (12 µm Dicke: obere Kurve, gestrichelt; 50 µm Dicke: mittlere Kurve, gepunktet; 110 µm Dicke: untere Kurve, durchgezogen).

### Teil 3: Untersuchung zweier Verbundfolien

#### Versuchsergebnisse:

Ein aus mehreren Schichten PE-LD bestehender Milchschauch der Dicke 78µm ergab durch seine Durchlässigkeit folgenden Verlauf der Konzentrationszunahme von Sudanrot 7B. Die nachfolgende Abbildung 114 zeigt einen linearen Verlauf der Extinktion. Obwohl zwischen den beiden PE-LD-Schichten eine Barrierschicht liegt, kommt es auch hier zu einer Permeation des fettlöslichen Farbstoffes.

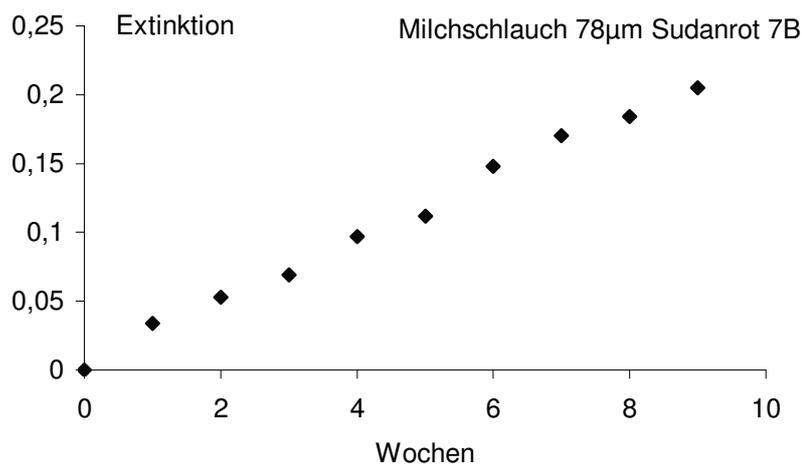


Abbildung 114: Veränderung der Sudanrot 7B-Konzentration, bedingt durch die Durchlässigkeit eines Milchschauches für den Farbstoff

Die nachfolgende Abb. 115 zeigt, dass aufgrund der Barrierewirkung einer Verbundfolie mit Aluminiumschicht die Konzentration des Farbstoffes nicht erhöht wird. Die Verbundfolie zeigt keinerlei Durchlässigkeit für den Farbstoff. Dadurch bleibt auch die Extinktion nahe null.

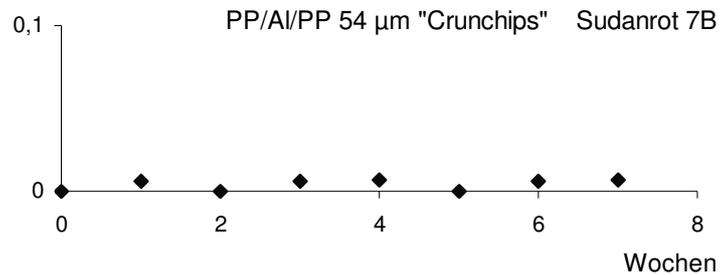


Abbildung 115: Einfluss einer Verbundfolie z.B. PP/Al/PP der Firma „Lorenz“ zur Verpackung von „Crunchips“ (54 µm Dicke) auf die Durchlässigkeit des Farbstoffes Sudanrot 7B. Da keine Zunahme der Extinktion (senkrechte Achse) erfolgt, ist davon auszugehen, dass die Folie für die fettlösliche Modells substanz undurchlässig ist.

#### Zusammenfassung der Ergebnisse:

1. Verschiedene Kunststoffe wurden bei einer durchschnittlichen Temperatur von 21°C über mehrere Wochen auf die Durchlässigkeit von Sudanrot 7B in Ethanol getestet.
2. Eine Durchlässigkeit zeigte sich ausschließlich bei PE-LD.
3. Zumindest für die ersten 4 bis 6 Wochen kann der Zusammenhang zwischen transportierter Stoffportion und Zeit als linear angesehen werden. Das Verhältnis ist proportional. Ein Sättigungsbereich hingegen, also eine Abflachung der Kurven, lässt sich nicht eindeutig erkennen.
4. Mit Einschränkung lässt sich das erwartete antiproportionale Verhältnis zwischen Foliendicke und Transportrate nachvollziehen.
5. Bestimmte Verbunde wie z.B. eine Käsefolie (PE/PA) oder eine Al-haltige Folie zur Verpackung von Chips (PP/Al/PP) zeigen keinerlei Durchlässigkeit.
6. Ein Milchschauch hingegen, bei dem es sich um eine PE-LD -haltige Verbundfolie handelt, weist eine deutliche Permeation dieses unpolaren Farbstoffes auf.

Die folgende Abb. 116 zeigt zwei typische Ergebnisse zur Durchlässigkeit des fettlöslichen Farbstoffes bei einer PA/PE-Verbundfolie (links) und bei einer PE-LD-Monofolie (rechts).

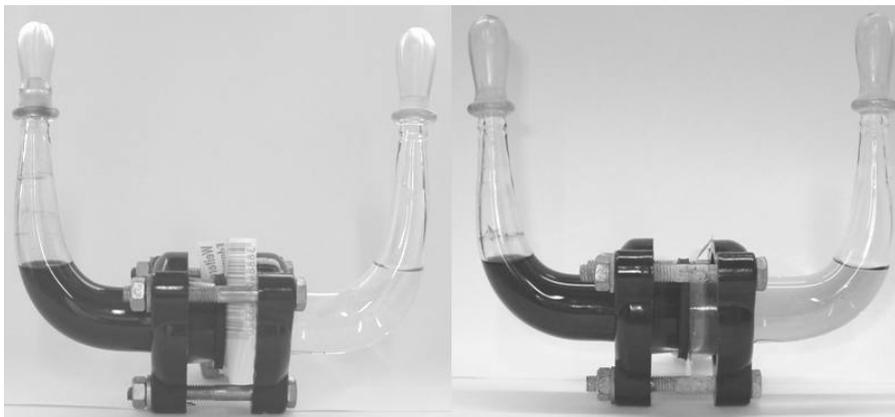


Abbildung 116: Bereits nach 1 Woche zeigen sich deutliche Unterschiede in der Durchlässigkeit verschiedener Folien für Sudanrot 7 B. Die linke Abbildung zeigt die Wirkung einer Verbundfolie (PA/PE) mit sehr geringer Durchlässigkeit. Das Bild ist identisch mit dem Zustand bei Versuchsbeginn. Die rechte Abbildung hingegen dokumentiert die gute Durchlässigkeit einer PE-LD-Folie (Gefrierbeutel).

Entsorgung: Flüssige organische Abfälle, halogenfrei

## V 4.5: Lichtdurchlässigkeit von gefärbtem und ungefärbtem Glas

SV, S II

### Geräte:

3 Reagenzgläser mit Reagenzglasständer, Waage, Pipette (2 mL), Kristallisierschale (Durchmesser 7 cm), 3 Rundfilter (Durchmesser 45 mm), Pinzette aus Kunststoff (z. B. PMP = Polymethylpenten), 2 Weißglas- und 1 Braunglas-Flasche mit Schraubverschluss (Weithals, 100 mL), Aluminiumfolie, Abzug, Overhead-Projektor, Stoppuhr, Folienstift

### Chemikalien:

Substanz A: Eisen(III)-chlorid Hexahydrat (ätzend, C)

Substanz B: Oxalsäure (gesundheitsschädlich, Xn)

Substanz C: Kaliumhexacyanoferrat(III) = „Rotes Blutlaugensalz“

Versuchsdauer: 30 Minuten (Lehrer-/Schülerversuch, Demonstrationsversuch)

### Durchführung:

- Es werden zwei Weißglasflaschen und eine Braunglasflasche bereitgestellt. Eine der Weißglasflaschen wird bis knapp unter das Gewinde mit Aluminiumfolie eingewickelt.
- Von den 3 Substanzen A, B und C werden jeweils 5%ige wässrige Lösungen hergestellt. Dazu wiegt man jeweils 0,1 g ab, überführt die Portion in ein Reagenzglas und fügt 2 mL Wasser hinzu.
- Die Inhalte der drei Reagenzgläser werden anschließend zusammen in eine Kristallisierschale gegossen (Abzug als Schutz vor Licht).
- Mit einer Pinzette taucht man drei Rundfilter nacheinander kurz in das Lösungsgemisch in der Kristallisierschale, überführt sie umgehend einzeln in die Weithals-Glasflaschen und verschließt diese.
- Die drei verschlossenen Flaschen werden auf den Overhead-Projektor gestellt. Dieser wird darauf für 1 min eingeschaltet.
- Danach werden mit einer Pinzette die belichteten Rundfilter entnommen und sofort auf Farbveränderungen hin überprüft.

Fehlerquellen: Das Gemisch in der Petrischale muss vor direktem Licht geschützt werden. Die Lichtquelle im Abzug muss ausgeschaltet sein. Die Beleuchtung im Labor sollte nicht zu hell sein.

### Beobachtungen:

Tabelle 76: Intensität der chemischen Reaktion in Abhängigkeit von der Belichtungsstärke

Präparierter Rundfilter im Glasgefäß	Farbe	
	vor der Belichtung	nach der Belichtung
Weißglas-Flasche	gelb	blau
Braunglas-Flasche		gelb bis gelbgrün
Weißglas-Flasche (mit Aluminiumfolie umhüllt)		

Nur der Rundfilter aus der Weißglas-Flasche weist eine deutliche Blaufärbung auf. Die beiden anderen Rundfilter sehen eher gelblich bis grünlich aus.

### Auswertung:

Bei der Reaktion von Eisen(III)-chlorid mit Oxalsäure bildet sich ein gelblicher Eisenoxalatkomplex (Trioxalatoeisen(III)-Ion).



Bei der Belichtung werden  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen zu  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen reduziert. Dabei wird der Kohlenstoff teilweise zu  $\text{CO}_2$  oxidiert.



Die entstandenen  $\text{Fe}^{2+}$ -Ionen reagieren dann mit rotem Blutlaugensalz zum Berliner-Blau-Komplex [172, S. 177 f.], [107, S. 183 f.].



Dieser Versuch zeigt deutlich, dass sowohl Braunglas als auch Aluminium die Lichtdurchlässigkeit stark herabsetzen. Beim Durchgang durch Weißglas ist eine entscheidende Veränderung von Lichtintensität und Lichtqualität nicht zu beobachten.

Hinweise: Die Glasfärbung von Braunglas wird durch  $\text{Fe}^{3+}$ -Ionen hervorgerufen [148, S. 1579].

### Entsorgung:

- Rundfilter: Feststoffabfälle
- Eisen(III)-chlorid: anorganische Abfälle mit Schwermetallen
- Oxalsäure: aus Lösungen mit Kalkwasser ausfällen; feste organische Abfälle
- Rotes Blutlaugensalz: giftige anorganische Stoffe

Literatur: [107], [148, S. 1579], [172]

## 16 Zusammenfassung

### Ausgangssituation und Ziele der Arbeit

Empirische Studien der Neunzigerjahre kamen zu dem Ergebnis, dass die Akzeptanz des Chemieunterrichts relativ gering ist und dass ein Schwund des Fachinteresses im Verlauf der Sekundarstufe I zu verzeichnen ist. Diese Tendenz findet ihre Fortsetzung in der relativ seltenen Wahl von Chemiekursen in der Sekundarstufe II. Somit wird mit Recht von einer regelrechten Krise des Chemieunterrichts gesprochen.

Erwähnte Studien brachten jedoch mit ihren Analysen nicht nur den Umfang der beklagenswerten Situation selbst an den Tag, sondern auch recht klare Ansätze zur Lösung dieses Problems. Dazu wurden Forderungen mit folgenden Schwerpunkten formuliert: Stärkere Berücksichtigung von Alltagsbezug und Schülerinteressen, sensibleres Eingehen auf das altersabhängige Abstraktionsvermögen von Lernenden, stärkere Gewichtung von Schülerexperimenten sowie Förderung der Selbstständigkeit.

Den Wünschen nach Alltagsbezügen wurde seitens der Unterrichtenden – und auch seitens der Lehrpläne – bereits in vielerlei Hinsicht Rechnung getragen: Schülerinteressen wurden im Unterricht zunehmend in Form einer großen Zahl von Alltagsthemen berücksichtigt. Bei genauerem Hinsehen fällt jedoch auf, dass innerhalb dieses Themenkreises bisher die Verpackungen von Lebensmitteln kaum beachtet wurden. Dies ist einerseits verständlich, da es sich auf den ersten Blick um sehr triviale Dinge handelt, die unbeachtet im Abfall landen. Andererseits haben die meisten Menschen täglich mit Lebensmittelverpackungen verschiedener stofflicher Zusammensetzungen zu tun, nutzen ihre Vorteile und sind folglich mit diesen Materialien vertraut. Dies allein kann aber nicht die alleinige Legitimation sein, Lebensmittelverpackungen im Chemieunterricht intensiv zu beleuchten. Sowohl die enge Verbindung zum Thema Kunststoffe als auch zum Thema Lebensmittel sind wesentliche weitere Gesichtspunkte. Weiterhin findet man hier hervorragende Beispiele, um Struktur-Eigenschaftsbeziehungen herauszuarbeiten.

### Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zur Erschließung des Themas Lebensmittelverpackungen im Chemieunterricht wurde zunächst eine grundlegende fachliche Recherche durchgeführt, um mögliche thematische Schwerpunkte zu identifizieren und Grundlagen für eine experimentelle Zugänglichkeit zu erarbeiten. Parallel hierzu wurde der derzeitige Stand der fachdidaktischen Forschung unter besonderer Berücksichtigung des Themas Lebensmittelverpackungen erhoben. Es zeigte sich, dass – wie bereits oben angedeutet – nur vereinzelt auf diese Themenstellung eingegangen wird, wobei ausgehend vom Thema Kunststoffe einzelne experimentelle Zugänge vorliegen, andere Stoffe wie Glas summarisch betrachtet werden. Dabei steht allerdings, wie etwa bei dem Recycling von Joghurtbechern, die stoffliche Weiterverwendung von Abfällen im Vordergrund, während die Anforderungen an die Eigenschaften einer Verpackung keine Rolle spielen.

Die Vorarbeiten waren die Basis für zwei Arbeitsschwerpunkte:

- Die schulexperimentelle Erschließung des Themas Lebensmittelverpackungen für unterschiedliche Klassenstufen,
- die exemplarische Ausarbeitung von Unterrichtseinheiten, die die Möglichkeit der Integration der Experimente in die Schulpraxis aufzeigen.

Bei der experimentellen Entwicklung stand die Barrierefunktion der Lebensmittelverpackungen und im Hinblick auf die Verträglichkeit mit Lebensmitteln deren chemische Zusammen-

setzung im Vordergrund. Gesichtspunkte wie die mechanische Belastbarkeit, z. B. die Reißfestigkeit einer Verpackungsfolie, wurden erst in zweiter Linie erarbeitet. Erfreulicherweise zeigte es sich, dass viele Experimente so gewählt und entwickelt werden können, dass sie an bekannte Schulversuche anknüpfen bzw. auf diese aufbauen und nicht den inhaltlichen Rahmen des Chemieunterrichts sprengen, eine wesentliche Voraussetzung für die Etablierung eines neuen Unterrichtsthemas in der Schulpraxis.

Ausgearbeitet wurde zunächst eine Versuchsreihe, die die Funktion von Aluminiumschichten in Lebensmittelverpackungen in das Zentrum der Betrachtung stellt. Hierbei konnte zur Bestimmung der Dicke einer Aluminiumschicht mit schulischen Mitteln ein Verfahren ausgearbeitet werden, in dem die Aluminiumanteile einer ausgemessenen Fläche einer Verpackung gelöst und anschließend über eine Titration bestimmt werden. Diese Versuchsreihe kann auf viele Beispiele angewandt werden und liefert zuverlässige Ergebnisse. Aus schulchemischer Sicht werden in idealer Weise Inhalte aus dem Gebiet der Redoxreaktion, der Komplexchemie und der Mathematik verbunden. Umfangreichere Versuche zum Themenkomplex Aluminium als Verpackungsmaterial runden diesen Schwerpunkt ab.

Der Nachweis unterschiedlicher Kunststoffe in Lebensmittelverpackungen stand im Mittelpunkt einer zweiten Versuchsserie. Hierbei wurden Versuche zur Analyse von Verpackungstoffen (Polyolefine und Polykondensate) entwickelt und zusammengestellt. Als besonders interessant erwies sich die Analyse von mehrschichtigen Folienverpackungen, wie sie etwa für Schnittkäse verwendet werden. Einfache Versuche zeigen die Möglichkeit zur Trennung dieser Schichten und die chemische Beschaffenheit der verwendeten Polymere. Es kann anhand der gewählten Beispiele auf die unterschiedlichen Eigenschaften von Folien wie Sauerstoffdurchlässigkeit und Wasserdampflöslichkeit eingegangen werden. Den Schülerinnen und Schülern wird so verdeutlicht, dass erst durch die Kombination von Werkstoffen ein Material entsteht, das – insgesamt gesehen – die gewünschten Barriereigenschaften besitzt. Weitere Beispiele erlauben einen umfassenden experimentellen Zugang zu speziellen Verpackungsmaterialien aus Kunststoff, auch zu Beschichtungen auf Metallen, wie z. B. auf Blechen für Konservendosen oder Schraubverschlüssen und Kronkorken. Auch mögliche unerwünschte Effekte wie der Nachweis von Acetaldehyd in PET-Flaschenmaterial oder die Freisetzung von Weichmachern aus PVC wurden anhand ausgewählter Beispiele erschlossen.

Eine wesentliche Fragestellung bei der Auswahl von Lebensmittelverpackungen ist die Frage nach der Barrierewirkung gegenüber unerwünschten Stoffen. Hierbei ist sowohl der Stoffdurchtritt von außen in Richtung des verpackten Lebensmittels als auch in umgekehrter Richtung – etwa beim Austrocknen eines verpackten Lebensmittels – von Bedeutung. Im Zentrum der neu entwickelten Experimente stand einmal die Frage nach der Sauerstoffdurchlässigkeit von Folien. Hierbei gelang es, eine Zink-Luft-Batterie so in eine geeignete Schaltung einzubauen, dass sie zum Nachweis des Sauerstoffdurchtritts durch eine Folie verwendet werden kann. Allerdings ist dieser bei üblicherweise verwendeten Folien so gering, dass im Sinne einer didaktischen Reduktion für einen Modellversuch Backpapier eingesetzt wird, um ein Experiment zu erhalten, das in einer Schulstunde durchgeführt werden kann.

Eine weitere umfangreiche Versuchsserie wurde zur Durchlässigkeit von PET-Flaschen gegenüber Kohlenstoffdioxid entwickelt. Besonders interessant für Schülerinnen und Schüler sind dabei Experimente, die zeigen, dass PET Kohlenstoffdioxid in geringen Mengen speichert.

Wie bereits oben gesagt, sollten exemplarische Unterrichtsentwürfe zeigen, welche konkreten Möglichkeiten für die Umsetzung des Themas gegeben sind. Hierfür wurden exemplarisch Entwürfe zum Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahren, zum Analytisch-synthetischen Verfahren, zum Expertenunterricht, zur Chemie im Kontext, zum Wahldifferenzierten Chemieunterricht und zum Projektunterricht / projektorientierten Chemieunterricht ausgearbeitet. Insgesamt handelt es sich hierbei um neun Entwürfe, die jeweils mehrstündige Sequenzen abdecken. Thematisch reichen die Entwürfe von der Strukturaufklärung (Aluminiumschicht,

Identifizierung von Kunststoffen bzw. Hydrolyse) über die Barrierefunktion (Sauerstoff, Licht) bis zur Ermittlung der optimalen Verpackung für Schulumilch.

Um das Thema Lehrkräften bekannt zu machen, wurde eine eintägige Lehrerfortbildung erarbeitet und erprobt. Angeboten wurde eine Auswahl an Experimenten aus den bereits erwähnten Themenbereichen zu unterschiedlichen Verpackungen. Großes Interesse zeigten die Lehrkräfte am Alltagsbezug der Schulversuche, jedoch bevorzugten sie die einfacheren Experimente, die sich ohne größeren Zeitaufwand in einer Unterrichtsstunde durchführen lassen.

Insgesamt vermittelt die vorliegende Arbeit einen umfassenden Zugang zum Thema Lebensmittelverpackung im Chemieunterricht, wobei ausgehend von den fachlichen Grundlagen die schulexperimentellen Möglichkeiten und Wege der unterrichtlichen Umsetzung entwickelt wurden. Wesentliche Ergebnisse wurden in vier aufgeführten Publikationen sowie auf zwei Tagungen in Form eines Experimentalvortrages und eines Posters dargestellt.

## 17 Anhang

### 17.1 Kunststoffe: Abkürzungen und Übersicht

Tabelle 77: Eigenschaften und Anwendungen der hier behandelten Kunststoffe [11, S. 123]

<b>Kurzform</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Auswahl allgemeiner Eigenschaften</b>	<b>Anwendungen im Lebensmittelbereich</b>
PE-LD	Polyethylen niedriger Dichte	Transparent, hohe Wasserdampfdichtheit, kältefest bis -60 °C, laugen- und säureunempfindlich, mono- und biaxial gereckt als Schrumpffolie	Vielseitig, Milchbeutel, Tiefkühlpackung, Schrumpfverpackungen
PE-LLD	Lineares PE-LD	Copolymerisat aus Ethylen mit 1-Buten, 1-Hexen oder 1-Octen. Besonders hohe Reiß-, Schweiß- und Durchstoßfestigkeit. Tieftemperaturzähigkeit bis -95 °C, pasteurisier- und sterilisationsbeständig	Dichtungseinlagen in Kronenkorken
PE-HD	Polyethylen hoher Dichte	Mechanische Festigkeit höher als PE niedriger Dichte, Temperaturbeständigkeit gut, klar bis milchig trüb, chemikalienbeständig, Wasserdampfdichtheit gut	Dünne Folie für Kochbeutel, Spezialverpackung für Fertiggerichte
PP (OPP oder BOPP)	Polypropylen (O=orientiert bzw. gereckt, BO=biaxial orientiert)	Glasklar, sehr reißfest, schrumpfbar, schweißbar, temperaturbeständig bis 140 °C, wasserunempfindlich	Brot, Obst, Becher für Milchprodukte
PA 6	Polyamid (Perlon)	Hohe Temperaturbeständigkeit, reiß- und abriebfest, öl- und fettdicht, Gasdichtheit sehr gut, schweißbar, klebbar, bedruckbar ohne Vorbehandlung, gut sterilisierbar	Als Bestandteil von Verbunden
PET (A-PET, C-PET)	Polyester (A=amorph, C=kristallin)	Transparent, sehr reißfest, weitgehend aroma-, gas-, wasserdampfdicht, hohe Temperaturbeständigkeit, kältefest	Vakuumpackungen, Frischfleischreifepackungen. Garpackungen zum Braten und Dünsten in der Folie.
PS (BOPS)	Polystyrol (BO=biaxial orientiert)	(Biaxial gereckt) glasklar, steif opak oder gedeckt, siegelbar, bedingt aroma-, gas-, wasserdampfdicht, steif, biegsam bis leicht spröde	Warmfolie für Becher, für Speisequark, Feinkost, Joghurt
PVC	Polyvinylchlorid hart, weichmacherfrei	Hohe mechanische Festigkeit, aroma- und gasdicht, wasserdampfdicht, schweißbar, metallisierbar, öl- und fettbeständig	z. Z. geringer Einsatz im Lebensmittelbereich, Substitution durch PP

<b>Kurzform</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Auswahl allgemeiner Eigenschaften</b>	<b>Anwendungen im Lebensmittelbereich</b>
PVC-P	Polyvinylchlorid weich, weichmacherhaltig (P=Plastifikator, Weichmacher; engl. plasticizer)	Glasklar, dehnbar, klebbar, schweißbar	Frischfleisch-Folien, Dichtungsmassen (Plastisole) in Metall-Schraubdeckeln
PVCD	Polyvinylidenchlorid	Hochtransparent, sauerstoff- und wasserundurchlässig, siegelbar, schrumpfbar, kochfest, sterilisierbar	Brot, Fisch, Wurst, Kochbeutel, Käse, Heißsiegel- und Sperrschichten auf Papier, Zellglas, Aluminium
Zellglas	Cellulosehydrat, unlackiert und lackiert	Transparent, luftdicht, öl- und fett-dicht, staubdicht, Wasserdampfdichtigkeit bedingt, Aromadichtheit ausreichend, unlackiert nicht siegelbar, Verkleben mit Spezialklebern, durch Lackierung beidseitig ist Wasserdampfdichtheit und Siegelbarkeit erreichbar.	Brot, Käse, Teigwaren, Marzipan, Bonbons
PC	Polycarbonat	Hohe Steifigkeit, Härte, Schlagzähigkeit, Transparenz, Wärmebeständigkeit von -90 °C bis 135 °C. Gute thermische Verarbeitbarkeit	Mehrwegflasche für Milch, Babyflasche
EVOH	Ethylen-Vinylalkohol-Copolymere	Barriereschicht, Anstieg der Sauerstoffdurchlässigkeit bei erhöhter Luftfeuchte	Verbundfolien zwischen schützenden Polyolefinschichten,
Ionomer	Ethylen-Acrylsäure-Copolymere, die Metallsalze der Acrylsäure enthalten	Entstehung von Ionenverbindungen, die in der Wärme lösbare Vernetzungen bilden. Hohe Durchstoß- und Abriebfestigkeit, Fett- und Ölbeständigkeit, hohe Transparenz, als Haftvermittler bei Polyamid/Polyethylen (PA/PE)	Verbundfolien für Fleisch, Käse und zwischen zwei PE-HD-Folien für die Cornflakes-Beutelverpackung
EVA	Ethylen-Vinylacetat-Copolymere	Mit 20 bis 40 % Vinylacetat kautschukartig. Substitution von weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid (Weich-PVC)	Stretchfolien, Tiefkühlverpackungen, Dichtungseinlagen für Schraubverschlüsse
Haftvermittler	z. B. Ionomer, EVA	Großer Schmelzbereich, niedrige Siegeltemperatur, in Verbundfolien zwischen Schichten aus Polyamid (PA) und Polyethylen (PE)	Fleisch, Wurst, Schnittkäse

## 17.2 Übersicht: Verwendete Chemikalien

Tabelle 78: Stoffliste mit Gefahrenkennzeichen und Entsorgungshinweisen

Stoff	Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze	Entsorgungshinweis
Aceton (Propanon)	F, Xi R: 11-36-66-67 S: (2)-9-16-26	E 1-10-14 Organische Verbindungen, halogenfrei
Agar-Agar (E406)	-	E 3 Hausmüll
Alizarin S – Natriumsalz (Natrium-Alizarinsulfonat)	Xi R: S: 22-24/25	E 10 Organische Verbindungen, halogenfrei
Aluminium-Test „Mercko- quant“	Xn	E 11 Schwermetallsalze
Ammoniaklösung, konz. (w=25%)	C, N R: 34-50 S: (1/2)-26-36/37/39-45-61	E 2 Säuren und Laugen (von Iod fernhalten)
Bariumchlorid Dihydrat	T R: 20-25 S: (1/2)-45	E 1-3 Mit Sulfat-Ionen ausfällen, Schwermetalle
Bariumchlorid-Lösung (c=0,1 mol/L, w≈2,4%)	Xn R: 22 S: (1/2)-45	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Bariumhydroxid Octahydrat	C R: 20/22-34 S: 26-36/37/39-45	E 1-3 bzw. anorganische Abfälle mit Schwermetallen
Bariumhydroxid-Lösung (Barytwasser, w=3,8%)		
Bisphenol A	Xn R: 37-41-43-62 S: (2)-26-36/37-39-46	E 10 Organische Abfälle, halogen- frei
Bromthymolblau-Lösung (wässrig-ethanolisch, 1:1)	F, Xi R: 11 S: (2)-7-16	E 10 Organische Abfälle, halogen- frei
tert.-Butanol (2-Methyl-2- propanol)	F, Xn R: 11-20 S: (2)-9-16	E 10 Organische Abfälle, halogen- frei
Calciumchlorid, wasserfrei	Xi R: 36 S: (2)-22-24	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Calciumhydroxid	C R: 41 S: 22-24-26-39	E 2 Säuren und Laugen (Neutra- lisieren und in den Ausguss geben)

<b>Stoff</b>	<b>Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze</b>	<b>Entsorgungshinweis</b>
Calciumhydroxid-Lösung (Kalkwasser)	Xi R: 36/38-41 S: (2)-24/25/26-36/37/39	E 1-2-3 Größere Mengen zu Säuren und Laugen, kleinere Mengen verdünnen und in den Ausguss geben, eingetrocknete Reste in den Hausmüll geben (PE-Beutel)
Cobalt(II)-nitrat Hexahydrat	T, O R: 8-49-60-2-36/37/38-43 S: 53-26-36/37	E 11-12 Als Hydroxid fällen, Schwermetallabfall
Cobalt(II)-nitrat-Lösung (w=0,1%)	T R: 49-42/43 S: (2)-22-53-45-60-61	E 11-12 Als Hydroxid fällen, Schwermetallabfall
Cochinillerot A (E124)	- S: 22-24/25	E 1-3 Ausguss oder Hausmüll
Dimethylaminobenzaldehyd	Xn R: 22-52/53 S: 61	E 10 In Ethanol lösen und zu den halogenfreien organischen Abfällen geben
Dimethylformamid	T R: 61-20/21-36 S: 53-45	E 10-12 Halogenfreie organische Stoffe oder Sondermüll
Dioctylphthalat (Diethylhexylphthalat)	- S: 23-24/25	E 10 Halogenfreie organische Stoffe
Dräger-Prüfröhrchen für Acetaldehyd (Bestell-Nr. 845810001)	-	E 4, 8, 11 Feststoffabfall
Dinatrium-EDTA-Lösung (Maßlösung „Titriplex-III-Lösung“, c=0,1 mol/L)	Xi R: 36-52/53 S: 61	E 2 Saure und alkalische Lösungen
Eisen(III)-chlorid Hexahydrat	C R: 22-38-41 S: 26-39	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren und in den Ausguss geben)
Essigsäure, konz.	C R: 10-35 S: (1/2)-23-26-45	E 2-10 Neutralisieren, in den Ausguss geben
Essigsäure, verd. (w=12%, c= 2 mol/L)	Xi R: 36/38 S: 23-26	E 2-10 Zu Säuren und Laugen geben oder zu den organischen halogenfreien Abfällen
Essigsäureethylester (Ethylacetat)	F, Xi R: 11-36-66-67 S: (2)-16-26-33	E 10-12 Halogenfreie organische Stoffe
Ethanol	F R: 11 S: (2)-7-16	E 1-10 Halogenfreie organische Stoffe

<b>Stoff</b>	<b>Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze</b>	<b>Entsorgungshinweis</b>
Fehling-Lösung I (Kupfersulfat-Lösung)	Xn, N R: 22-36/38-50/53 S: (2)-22-60-61	E 11 Schwermetallsalze bzw. Feststoffabfälle
Fehling-Lösung II (Kaliumnatriumtartrat-Lösung, alkalisch)	C R: 35 S: (2)-26-27-37/39	E 2 Säuren und Laugen
0,1 N Iodlösung (Maßlösung, $c(I_2) = 0,05 \text{ mol/L}$ )	Xn, N R: 20/21-50 S: (2)-23-25-61	E 1-16 Reste mit Natriumthiosulfat zu Iodid reduzieren. Reaktionsgemisch mit Natriumhydrogencarbonat neutralisieren. Danach Entsorgung über Ausguss.
Isooctan	F, Xn, N R: 11-38-50/53-65-67 S: (2)-9-16-29-33-60-61-62	E 10-12 Halogenfreie organische Abfälle
Kaliumchlorid	-	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Kaliumchromat-Lösung (w=5%)	T, N R: 49-46-36/36/37/38-43-50/53 S: 53-45-60-61	E 12-16 Schwermetallsalze (bzw. gesondert bei einem Entsorgungsunternehmen abgeben)
Kaliumhexacyanoferrat(III), Rotes Blutlaugensalz	Xn	E 1 Stark verdünnt in den Ausguss geben
Kaliumhydroxid (Ätzkali)	C R: 22-35 S: (1/2)-26-36/37/39-45	E 2 Neutralisieren, in den Ausguss geben
Kaliumhydrogensulfat	C R: 34-37 S: (1/2)-26-36/37/39-45	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren und in den Ausguss geben)
Kaliumsulfat	-	E 1-3 In den Ausguss geben und verdünnen oder in den Hausmüll geben
Kupfer (Blech)	-	E 3-14 Recycling-geeignet (Abschmirgeln), zum Recycling-Unternehmen oder in den Hausmüll
Magnesiumchlorid	Xi R: 36/37 -	E 1 In den Ausguss geben und verdünnen

<b>Stoff</b>	<b>Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze</b>	<b>Entsorgungshinweis</b>
Methylenblau	Xn R: 22 S: -	E 1-10 Verdünnt in den Ausguss geben oder zu den organischen halogenfreien Abfällen
Methylrot	Xn R: 40 S: 36/37	E 10 Organische Abfälle, halogenfrei
1-Naphthol ( $\alpha$ -Naphthol, 1-Hydroxynaphthalin)	Xn R: 21/22-37/38-41 S: (2)-22-26-37/39	E 10 In Aceton lösen und zu den halogenfreien organischen Abfällen geben
Natriumacetat	-	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Natriumcarbonat	Xi R: 36 S: (2)-22-26	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Natriumcarbonat, wässrige Lösung ( $c \approx 2 \text{ mol/L}$ )	Xi R: 36 S: (2)-22-26	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Natriumchlorid	-	E 3 Hausmüll
tri-Natriumcitrat Dihdrat	- S: 24/25	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Natriumdithionit	Xn R: 7-22-31 S: (2)-7/8-26-28-43	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Natriumhydrogencarbonat	-	E 1 Ausguss
Natriumhydrogensulfit	Xn R: 22-31 S: (2)-25-46	E 1, 2 Kleinere Mengen verdünnen und in den Ausguss geben, größere Mengen in den Behälter mit sauren und alkalischen Lösungen
Natriumhydrogensulfit-Lösung ( $c = 0,025 \text{ mol/L}$ )	Xn R: 22-31 S: (2)-25-46	E 1, 2 Kleinere Mengen verdünnen und in den Ausguss geben, größere Mengen in den Behälter mit sauren und alkalischen Lösungen
Natriumhydroxid (Ätznatron)	C R: 35 S: (1/2)-26-37/39-45	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren, in den Ausguss geben)

<b>Stoff</b>	<b>Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze</b>	<b>Entsorgungshinweis</b>
Natriumhydroxidlösung, Natronlauge, verd. (w=7,5%, c=2 mol/L)	C R: 35 S: (1/2)-26-37/39-45	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren, in den Ausguss geben)
Natriumhydroxidlösung (w=10%)	C R: 35 S: (1/2)-26-37/39-45	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren, in den Ausguss geben)
Natriumhydroxidlösung (w=5%)	C R: 35 S: (1/2)-26-37/39-45	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren, in den Ausguss geben)
Natriumthiosulfat-Lösung (Maßlösung, c=0,1 mol/L)	-	E 1 Verdünnen, in den Ausguss
Natriumthiosulfat-Lösung (c=0,025 mol/L)	-	E 1 Verdünnen, in den Ausguss
Natronkalk	C R: 35 S: 26-36/37/39-45	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren, in den Ausguss geben)
Oxalsäure Dihydrat	Xn R: 21/22 S: (2)-24/25	E 5 Mit Calcium-Ionen fällen, dann verdünnt in den Ausguss geben oder mit dem Hausmüll entsorgen
0,1 N Oxalsäure-Lösung (c=0,05 mol/L)	Xn R: 21/22 S: (2)-24/25	E 5 Mit Calcium-Ionen fällen, dann verdünnt in den Ausguss geben
Patentblau V (E131)	- S: 22-24/25	E 1 Ausguss
Petrolether, 80-100°C	F, Xn R: 11 S: 9-16-29-33	E 10 Halogenfreie organische Abfälle
pH-Indikatorstäbchen (0-2,5) Merck, Art. 9540	-	E 3 Hausmüll
Phenolphthalein	Xn R: 40 S: 36/37	E 10 Organische Abfälle, halogenfrei
Phenolphthalein-Lösung in 70%igem Ethanol	F, Xn R: 11-40 S: (2)-7-16-36/37	E 10 Organische Abfälle, halogenfrei
Phloroglucin (1,3,5-Trihydroxybenzol)	Xi R: 36/37/38 S: 26-37/39	E 10 Organische Verbindungen, halogenfrei

<b>Stoff</b>	<b>Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze</b>	<b>Entsorgungshinweis</b>
Phosphor(V)-oxid (Sicapent®)	C R: 35 S: (1/2)-22-26-45	E 2 Säuren und Laugen, neutralisieren und in den Ausguss geben
Phosphorsäure, konz. (w=85%, c=12 mol/L)	C R: 34 S: (1/2)-26-45	E 2 Säuren und Laugen, neutralisieren und in den Ausguss geben
Propansäure (Propionsäure)	C R: 34 S: 2-23-36-45	E 10 Organische Verbindungen, halogenfrei
Resorcin (1,3-Dihydroxybenzol)	Xn, N R: 22-36/38-50 S: (2)-26-61	E 10 Halogenfreie organische Abfälle
Salpetersäure, konz. (w=65%, c=14,5 mol/L)	O, C R: 8-35 S: (1/2)-23-26-36-45	E 2 Säuren und Laugen, neutralisieren und in den Ausguss geben
Salzsäure, konz. (w=25%, c=7 mol/L)	C R: 34-37 S: (1/2)-26-45	E 2 Säuren und Laugen, neutralisieren und in den Ausguss geben
Salzsäure, w=18%	C R: 36/37/38 S: (2)-28	E 2 Saure und alkalische Lösungen
Salzsäure, verd. (w=7%, c=2 mol/L)	Xi	E 2 Säuren und Laugen, neutralisieren und in den Ausguss geben
Salzsäure (c=0,01 mol/L)	-	E 1 Ausguss
Schiffs Reagenz	Xi R: 36/37 S: 24-26	E 2 Neutralisieren, in den Ausguss geben
Schwefelsäure, konz. (w=96%, c=18 mol/L)	C R: 35 S: (1/2)-26-30-45	E 2 Säuren und Laugen, neutralisieren und in den Ausguss geben
Schwefelsäure, verd. (w=9%, c=1 mol/L)	Xi R: 36/38 S: (2)-26	E 2 Säuren und Laugen (Neutralisieren und in den Ausguss geben)
Silbernitrat-Lösung (w=1,7%, c=0,1 mol/L)	Xi R: 36/38 S: (1/2)-26-45	E 12-13-14 Schwermetallsalze, giftige anorganische Stoffe
Stärke-Lösung, wässrig (w=0,1%)	-	E 1 Ausguss

Stoff	Gefahrenzeichen R-Sätze S-Sätze	Entsorgungshinweis
Sudanrot 7B (Fettrot)	Xn R: 20/21/22-40 S: 22-36/37/39	E 10 Organische Verbindungen, halogenfrei
Sudanrot 7B, ethanolische Lösung (w=0,025%)	F, Xn R: 11-20/21/22-40 S: (2)-7-16-22-36/37/39	E 10 Organische Verbindungen, halogenfrei
Tartrazin (E102)	Xn R: 42/43 S: 22-24-37-45	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Thioacetamid	T R: 22-36/38-45-52/53 S: 45-53-61	E 4 Im Anschluss an die Sulfid- fällung zu den Schwermetall- salzen
Toluol	F, Xn R: 11-20 S: (2)-16-25-29-33	E 10-12 Organische Abfälle, halogen- frei
Wasserstoffperoxid-Lösung (w=3%)	Xi R: 36/38 S: (1/2)-28-36/39-45	E 1 Verdünnen, in den Ausguss geben
Xylenolorange	-	E 1-10 Zu den halogenfreien organi- schen Abfällen geben oder nach starker Verdünnung über den Ausguss entsorgen
Zinksulfat-Lösung (Maßlö- sung, c=0,1 mol/L)	Xi, N R: 36/38-50/53 S: (2)-22-25-60-61	E 1-11 Als Hydroxid fällen, Schwermetallabfälle

### 17.3 Übersicht: Herstellung verwendeter Reagenzien

Wässrige Lösung von Alizarin S (w=0,1%):

0,1 g Natrium-Alizarinsulfonat (Xi) in 100 mL dest. Wasser lösen

Bariumhydroxid-Lösung (Barytwasser, w=3,8%):

4 g Bariumhydroxid Octahydrat (C) in 100 mL Wasser lösen

Bromthymolblau-Lösung (wässrig-ethanolisch, 1:1), w=3%:

1,35 g Bromthymolblau in 50 mL Ethanol-Wasser-Gemisch (1:1) lösen

Kalkwasser (gesättigte Calciumhydroxid-Lösung):

2 g Calciumhydroxid (C) in 1 L Wasser lösen und filtrieren

Wässrige Lösung von Cobalt(II)-nitrat (w=0,1%):

1 Spatelspitze bzw. 0,01 g Cobalt(II)-nitrat (T, O) auf 10 mL dest. Wasser

Fehling-Lösung I:

34,65 g Kupfersulfat in 500 mL dest. Wasser lösen

Fehling-Lösung II:

173 g Kaliumnatriumtartrat und 60 g Natriumhydroxid in 500 mL dest. Wasser lösen

Wässrige Lösung von Rotem Blutlaugensalz (w=3%):

0,3 g Kaliumhexacyanoferrat(III) (Xn) in 10 mL dest. Wasser lösen

Gesättigte Kaliumsulfat-Lösung (w=10%):

11,1 g Kaliumsulfat in 100 g Wasser lösen

Magnesiumchlorid-Lösung ( $\rho=1,30 \text{ g/cm}^3$ ):

30 g Magnesiumchlorid in 70 g Wasser lösen (w=30%)

Wässrige Methylenblau-Lösung (w=0,3%):

0,15 g Methylenblau (Xn) in 50 mL Wasser lösen

Lösung von Methylrot in Ethanol und Wasser

0,02 g Methylrot in 60 mL Ethanol lösen, mit Wasser auf 100 mL auffüllen

Konzentrierte ethanolische Lösung von Methylrot:

0,13 g Methylrot (Xn) in 50 mL Ethanol (F) lösen

Molisch Reagenz:

1,5 g 1-Naphthol (Xn) wird in 10 mL Ethanol (F) gelöst (w=19%)

Konzentrierte wässrige Natriumcarbonat-Lösung (w=18%):

22 g Natriumcarbonat (Xi) in 100 mL Wasser lösen

Natriumchlorid-Lösung ( $\rho=1,19 \text{ g/cm}^3$ ):

25 g Natriumchlorid in 75 g Wasser lösen (w=25%)

Natriumdithionit-Lösung (w≈1%):

0,5 g Natriumdithionit (Xn) in 50 mL Wasser lösen

Phenolphthalein-Lösung (w≈0,1%)

0,1 g Phenolphthalein (Xn) in 100 mL 70%igem Ethanol (F) lösen

Phloroglucin-Salzsäure-Reagenz:

0,5 g Phloroglucin (Xi) in 10 mL Ethanol (F) lösen und 10 mL konz. Salzsäure (C) hinzufügen

Stärke-Lösung (w=0,5%):

0,5 g Stärke werden in 100 mL siedendes Wasser eingerührt und so lange weiter erhitzt, bis eine klare Lösung entstanden ist.

Ethanolische Lösung von Sudanrot 7B (w=0,025%):

10 mg Sudanrot 7B (Xn) in 50 mL Ethanol (F) lösen

Wässrige Thioacetamid-Lösung (c=0,1 mol/L):

0,075 g Thioacetamid (T) in 10 mL dest. Wasser lösen

Xylenolorange-Lösung:

1 Mikrospatelspitze Xylenolorange in 1 mL Wasser lösen

#### **17.4 Übersicht: Bezugsquellen ausgewählter Materialien**

Unbefüllte PET-Getränkeflaschen (Einweg):

Coca-Cola Liederbach

Sindlinger Weg 1

D-65835 Liederbach

Polyethylen-Folien (PE-LD):

Bischof + Klein GmbH & Co.

Rahestraße 47

D-49525 Lengerich

Polyethylen-Folien (PE-LD) und Polypropylen-Folien (PP):

CITO Kunststoffverpackungen GmbH

Wielandstr. 2

D-33790 Halle

Polyethylen-Folien (PE-LD) und Polypropylen-Folien (PP):

Diroll-Folien GmbH

Reundorferstr. 7

D-96215 Lichtenfels

Verbundfolien mit Barrierschicht:

M + W Verpackungen GmbH

Jöbkesweg 11

D-48599 Gronau

Verbundfolien mit Barrierschicht:

Nordenia Verpackungswerke GmbH

Am Tannenkamp 21

D-49439 Steinfeld

Verbundfolien mit Barrierschicht:

Petroplast GmbH

Postfach 3208

40682 Erkrath

Schrumpffolien:

Ludwig Weileder Verpackungsfolien

Postfach 1729

D-86887 Landsberg

## 17.5 Übersicht: Abbildungen

Abb. 1: Interessenschwerpunkte verschiedener Bereiche des Verpackungswesens .....	11
Abb. 2: Gesamtheit der Belastungen, die dem Füllgut schaden können.....	13
Abb. 3: Errechnete Massenanteile einzelner Materialien an Verkaufsverpackungen.....	14
Abb. 4: Grund- und Anregungszustand des Sauerstoffs .....	16
Abb. 5: Reaktion von Singulett-Sauerstoff mit einer Doppelbindung .....	17
Abb. 6: Stufen der Permeation .....	18
Abb. 7: Ladungs- und Bindungszustände zweier Varianten von Myoglobin .....	20
Abb. 8: Haltbarkeit von Vitamin B <sub>2</sub> .....	23
Abb. 9: Lichtdurchlässigkeit verschiedener Joghurtbehälter .....	23
Abb. 10: Durchlässigkeiten für Wasserdampf und Sauerstoff.....	25
Abb. 11: Durchlässigkeit für Kohlenstoffdioxid.....	27
Abb. 12: Temperaturgrenzen für den Dauergebrauch verschiedener Kunststoffe.....	28
Abb. 13: Aufbau einer coextrudierten Verbundfolie mit Haftvermittler .....	30
Abb. 14: Aufbau einer durch Kaschieren hergestellten Verbundfolie .....	30
Abb. 15: Schichtenaufbau zweier Sorten von Getränkekartons.....	31
Abb. 16: Giebelverpackung und Blockverpackung .....	31
Abb. 17: Verpackungslebensweg .....	32
Abb. 18: Kunststofftypencode.....	34
Abb. 19: Recyclinggerechte Gestaltung einer Polypropylen -Schale .....	34
Abb. 20: Erschließungsbereiche des Themas.....	37
Abb. 21: Experimentell nachweisbare Bestandteile und Funktionen (Getränkekarton).....	57
Abb. 22: Experimentell nachweisbare Bestandteile und Funktionen (Joghurtglas) .....	58
Abb. 23: Experimentell nachweisbare Bestandteile (Joghurtbecher) .....	59
Abb. 24: Experimentell nachweisbare Bestandteile (Getränkedosen).....	60
Abb. 25: Experimentell nachweisbare Bestandteile (Konservendosen) .....	61
Abb. 26: Experimentell nachweisbare Bestandteile von aluminiumhaltigen Verbunden.....	63
Abb. 27: Experimentell nachweisbare Bestandteile von PVC-haltigen Packmitteln.....	65
Abb. 28: Experimentell nachweisbare Bestandteile von Verpackungen für Schnittkäse .....	66
Abb. 29: Experimentell nachweisbare Bestandteile der Verpackung von Babybel-Käse .....	67
Abb. 30: Experimentell nachweisbare Bestandteile von Kunststoff-Schalen.....	68
Abb. 31: Vorgänge der Migration und Permeation.....	69
Abb. 32: Durchlässigkeit für Wasserdampf und Sauerstoff von PA 6 und PE-LD .....	86
Abb. 33: Wasserstoffbrückenbindung in einem Polyamid (PA 6).....	87
Abb. 34: Schnitt durch eine Verbundfolie (PA/PE, elektronenmikroskop. Aufnahme).....	87
Abb. 35: Exsikkator als Messapparatur zur Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit .....	106
Abb. 36: Eichkurve zur Sauerstoffkonzentration.....	107
Abb. 37: Demonstration der Sauerstoffdurchlässigkeit durch eine Backpapierfolie. ....	108
Abb. 38: Gedanken zur Gefährdung der Qualität des Lebensmittels.....	131
Abb. 39: Experimentell zugängliche Substanzgruppen einer Glasflasche.....	131
Abb. 40: Experimentell zugängliche Substanzgruppen eines Verbundkartons. ....	132
Abb. 41: Eine Mehrschichtfolie und ihre maximale Sauerstoffdurchlässigkeit.....	134
Abb. 42: Querschnitt durch eine Kaugummifolie (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	135
Abb. 43: Querschnitt durch eine Kaugummifolie (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	136
Abb. 44: Gitterkonstante und Länge der Flächendiagonale (kubisch-flächenzentr. Gitter) .	138
Abb. 45: Gitterkonstante und Länge der Raumdiagonale (kubisch-raumzentr. Gitter) .....	139
Abb. 46: Statistischer Copolyester (Terephthalsäure / 1,4-Butandiol / Adipinsäure).....	143
Abb. 47: Repetiereinheit von Polyethylenterephthalat .....	145
Abb. 48: Nachweis von Aluminium-Ionen mit Alizarin S.....	154
Abb. 49: Gasentwicklungsapparatur. ....	158
Abb. 50: Getränkekarton, Querschnitt (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	160

Abb. 51: Versuchsaufbau zu V 1.4.1 .....	164
Abb. 52: Versuchsaufbau zu V 1.4.2 .....	166
Abb. 53: Versuchsaufbau zu V 1.7.1 .....	169
Abb. 54: Alkalische Hydrolyse von Polyethylenterephthalsäure.....	179
Abb. 55: Alkalische Hydrolyse von Polycarbonat .....	186
Abb. 56: Cochenillerot A .....	189
Abb. 57: FTIR-Spektrum von EVOH (Probe) .....	195
Abb. 58: FTIR-Spektrum von EVOH (Vergleich).....	196
Abb. 59: Tiefziehschale, Querschnitt (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	196
Abb. 60: Hydroxymethylfurfural .....	199
Abb. 61: Entstehung des violetten Farbstoffs aus 1-Naphthol.....	199
Abb. 62: Epichlorhydrin und Bisphenol A.....	202
Abb. 63: Epoxidharz. ....	202
Abb. 64: Weißblech-Getränkedose, Querschnitt (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	203
Abb. 65: Innenschicht einer Getränkedose aus Epoxidharz.....	203
Abb. 66: Apparatur zur Bestimmung von Chlor in organischen Verbindungen.....	209
Abb. 67: Schraubdeckel, Plastisol-Dichtung (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	210
Abb. 68: Schraubdeckel, Plastisol-Dichtung (elektronenmikroskop. Aufnahme).....	214
Abb. 69: Nachweis von Acetaldehyd mit fuchsinschwefliger Säure .....	218
Abb. 70: Fuchsinschweflige Säure.....	219
Abb. 71: Versuchsaufbau zu V 2.12.1 .....	220
Abb. 72: Strukturformel von Litholrubin .....	220
Abb. 73: Monomer von PVDC .....	222
Abb. 74: Querschnitt durch eine beidseitig beschichtete Babybel-Folie .....	223
Abb. 75: Schnitt durch einen Flaschenkorken (lichtmikroskop. Aufnahme).....	226
Abb. 76: Schnitt durch ein Styropor-Stück (lichtmikroskop. Aufnahme) .....	227
Abb. 77: Ermittlung eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms (Versuchsaufbau).....	228
Abb. 78: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (PP und Milchschauch) .....	232
Abb. 79: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (Frischhaltefolie, Aluminiumfolie).....	234
Abb. 80: Spannungs-Dehnungs-Diagramme (Käsefolie aus PA und PE-LD).....	234
Abb. 81: Versuchsaufbau zu V 2.16.1. ....	235
Abb. 82: Schrumpffolie.....	236
Abb. 83: Kraftentwicklung einer vorgereckten Folie durch Erwärmen.....	236
Abb. 84: Ergebnis zu V 4.1.1 .....	246
Abb. 85: Methylenblau im reduzierten und im oxidierten Zustand .....	246
Abb. 86: Schema einer Zink-Luft-Batterie im Querschnitt.....	247
Abb. 87: Blick auf die Kathode einer Zink-Luft-Batterie des Typs RENATA ZA 675. ....	247
Abb. 88: Entladekurve einer Zink-Luft-Batterie über einen 80 $\Omega$ -Widerstand .....	248
Abb. 89: Zeitlicher Verlauf der Ausbildung der Diffusionsschicht an einer Elektrode.....	249
Abb. 90: Montage von Zink-Luft-Batterie und Widerstand auf einer Acrylplatte .....	250
Abb. 91: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zu V 4.1.2.....	250
Abb. 92: Schaltskizze des Versuchsaufbaus zu V 4.1.2.....	251
Abb. 93: Demonstration der Sauerstoffdurchlässigkeit durch eine Backpapierfolie.....	252
Abb. 94: Spannungs-Zeit-Kurven im Langzeitversuch unter verschiedenen Bedingungen ..	253
Abb. 95: Sauerstoffdurchlässigkeit einer Folie (Verbund PA/PE und PE einzeln) .....	254
Abb. 96: Gasdurchlässigkeit von PET-Getränkeflaschen (Versuchsanordnung) .....	255
Abb. 97: Ermittlung der pH-Absenkung mit dem Indikator Bromthymolblau.....	256
Abb. 98: Versuchsanordnung zur Erfassung des CO <sub>2</sub> -Austritts (V 4.2.2).....	258
Abb. 99: Direkte Messung der pH-Absenkung nach 1 Woche .....	259
Abb. 100: Versuchsanordnung zu V 4.2.3 .....	261
Abb. 101: Massenveränderungen von Getränkeflaschen durch CO <sub>2</sub> -Austritt (1 Woche). ....	264

Abb. 102: Versuchsaufbau zu Versuch 4.2.4 .....	267
Abb. 103: Versuchsaufbau zu Versuch 4.3 .....	273
Abb. 104: Durchlässigkeiten für Wasserdampf von PE-LD-Folien .....	276
Abb. 105: Durchlässigkeiten für Wasserdampf von PP-Folien. ....	276
Abb. 106: Durchlässigkeiten für Wasserdampf von sehr dünnen Folien.....	277
Abb. 107: Durchlässigkeiten für Wasserdampf zweier Folien unterschiedlicher Polarität ..	277
Abb. 108: Durchlässigkeiten für Wasserdampf einer Verbundfolie mit Aluminiumschicht. 278	
Abb. 109: Wasserdampfdurchlässigkeit (eigene Ergebnisse und Literaturwerte) .....	279
Abb. 110: Wasseraufnahme von Keksen durch eine PP-Folie hindurch. ....	279
Abb. 111: Versuchsaufbau zu V 4.4 .....	280
Abb. 112: Durchlässigkeit der Folien PE-LD und PA/PE einen unpolaren Farbstoff.....	281
Abb. 113: Durchlässigkeit verschiedener Folien aus PE-LD für Sudanrot 7B. ....	282
Abb. 114: Durchlässigkeit eines Milchschauches für den Farbstoff Sudanrot 7B .....	282
Abb. 115: Verbundfolie z.B. PP/Al/PP (Durchlässigkeit für Sudanrot 7B) .....	283
Abb. 116: Durchlässigkeit für Sudanrot 7B (PA/PE und Gefrierbeutel aus PE-LD). ....	283

Hinweis zu den Abbildungen:

Fotos ohne weitere Quellenangabe wurden vom Autor dieser Arbeit aufgenommen. Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen hingegen wurden am Fachbereich Biowissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt a.M. angefertigt (Rasterelektronenmikroskop, Herr M. Ruppel).

## 17.6 Übersicht: Tabellen

Tab. 1: Mögliche Veränderungen am Füllgut bei fehlender Barriere .....	14
Tab. 2: Beispiele für die Anwendung von Packstoffen.....	15
Tab. 3: Sauerstoffdurchlässigkeit verschiedener Kunststoffe .....	18
Tab. 4: Abhängigkeit der Sauerstoffdurchlässigkeit von Dichte und Polarität.....	19
Tab. 5: Beeinflussung der Sauerstoffdurchlässigkeit durch Metallisierung .....	20
Tab. 6: Wasserdampfdurchlässigkeit verschiedener Kunststoffe .....	24
Tab. 7: Beeinflussung der Wasserdampfdurchlässigkeit durch Metallisierung .....	26
Tab. 8: Anwendung thermisch belastbarer Kunststoffe als Verpackungsmaterial .....	29
Tab. 9: Versuche aus der Sicht des Lehrplanes Chemie (Gymnasialer Bildungsgang).....	38
Tab. 10: Versuche aus der Sicht des Lehrplanes Chemie (Bildungsgang Realschule).....	39
Tab. 11: Fachdidaktische Arbeiten zum Thema „Lebensmittelverpackungen“ (Übersicht) ...	49
Tab. 12: Auflistung der in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsvorschriften.....	72
Tab. 13: Versuche zur Komplexchemie in einfachen Experimenten.....	77
Tab. 14: Einfach durchzuführende Experimente zum Thema „Redoxreaktionen“ .....	78
Tab. 15: Versuche zu Säure-Base-Reaktionen in einfachen Experimenten.....	79
Tab. 16: Versuche zum Chemischen Gleichgewicht in einfachen Experimenten .....	79
Tab. 17: Einfache Experimente zum Thema „Makromoleküle/Monomere“ .....	80
Tab. 18: Barrieren für Sauerstoff, Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf und Licht.....	81
Tab. 19: Mechanische und thermische Eigenschaften von Kunststoffen, Metall und Glas.....	81
Tab. 20: Vergleich ausgewählter Eigenschaften der Metalle Aluminium und Eisen .....	84
Tab. 21: Vor- und Nachteile von Glasflaschen und PET-Flaschen .....	85
Tab. 22: Struktur und Eigenschaften einer Verbundfolie (PA-6/PE-LD).....	88
Tab. 23: Vergleich der Stoffklassen Metall, Kunststoff und Glas .....	89
Tab. 24: Denkstufen des Forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens.....	91
Tab. 25: Ermittlung des Aufbaus einer aus mehreren Komponenten bestehenden Folie .....	98
Tab. 26: Ermittlung des Aufbaus einer aluminiumhaltigen Folie .....	104
Tab. 27: Beispiel für ein Analytisch-synthetisches Unterrichtsverfahren (Zink-Luft-Batt.) .	110
Tab. 28: Bestandteile von Joghurt-Verpackungen (Experten-Unterricht) .....	112

Tab. 29: Lichtschutzfunktion bei Lebensmittelverpackungen (Chemie im Kontext).....	115
Tab. 30: Metall Dosen (Chemie im Kontext).....	118
Tab. 31: Vergleich von PA-6, PET, PC und regenerierter Cellulose (Experimente).....	121
Tab. 32: Zerlegung von Polymeren (Chemie im Kontext).....	122
Tab. 33: PVC (Wahldifferenzierter Chemieunterricht).....	125
Tab. 34: Verpackung für Schulmilch (Projektunterricht) .....	128
Tab. 35: Mögliche Formen von Aluminium als Verpackungsmaterial.....	136
Tab. 36: Anwendungseigenschaften flexibler transparenter Packstoffe im Vergleich .....	137
Tab. 37: Vor- und Nachteile von Glasflaschen und PET-Flaschen .....	143
Tab. 38: Vergleich aus lebensmittelhygienischer Sicht (Glas und PET) .....	143
Tab. 39: Übersicht über die bei der Lehrerfortbildung durchgeführten Experimente .....	147
Tab. 40: Bestimmung der Dicke der Aluminiumschicht einer Milchverpackung .....	162
Tab. 41: Bestimmung des Aluminiumanteils einer Butter-Einpackfolie .....	162
Tab. 42: Bestimmung der Dicke der Aluminiumschicht einer Chipstüte .....	163
Tab. 43: Redoxpotenziale zum vorliegenden Experiment .....	165
Tab. 44: Identifizierung dreier verschiedener Verpackungskunststoffe nach vier Kriterien .	181
Tab. 45: Vorversuche zur Identifizierung der Kunststoffe .....	182
Tab. 46: Rohdichten einiger Kunststoffe .....	182
Tab. 47: Schmelzbereiche einiger Thermoplaste .....	182
Tab. 48: Reaktion der Dämpfe von Kunststoffen beim Erhitzen im Glühröhrchen .....	183
Tab. 49: Brennverhalten (Flammenfärbung).....	183
Tab. 50: Beständigkeit von Kunststoffen gegen ausgewählte Lösemittel .....	183
Tab. 51: Ergebnisse aus der Untersuchung einer Deckfolie .....	194
Tab. 52: Ergebnisse aus der Untersuchung der Tiefziehschale.....	195
Tab. 53: Weichmachersubstanzen in PVC-haltigen Verpackungsmaterialien.....	213
Tab. 54: Fluoreszenzantworten von Weichmachersubstanzen .....	214
Tab. 55: Ansatz zur Untersuchung von Weichmachersubstanzen .....	215
Tab. 56: Untersuchung von Weichmachersubstanzen (Dünnschichtchromatografie).....	216
Tab. 57: Acetaldehyd-Konzentrationen nach Erhitzen von PET-Portionen .....	217
Tab. 58: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (PP-Beutel) .....	229
Tab. 59: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Milchschlauch, PE-LD) .....	231
Tab. 60: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Frischhaltefolie, PE-LD).....	232
Tab. 61: Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Aluminiumfolie).....	233
Tab. 62: Thermisches Verhalten einiger thermoplastischer Kunststoffe (PS, PP, PET). .....	237
Tab. 63: Unterscheidung zweier Glassorten hinsichtlich ihrer Wasserbeständigkeit .....	240
Tab. 64: Zusammensetzung zweier Glassorten.....	241
Tab. 65: Unterscheidung zweier Glassorten hinsichtlich einer alkalischen Reaktion .....	242
Tab. 66: Titrimetrische Erfassung der alkalische Reaktion .....	243
Tab. 67: Unterschiedliche Typen von Borosilicat-Gläsern .....	243
Tab. 68: Nachweis der pH-Absenkung mit Bromthymolblau (CO <sub>2</sub> -Austritt) .....	257
Tab. 69: Volumetrische Bestimmung von permeiertem CO <sub>2</sub> aus Coca-Cola-Getränk.....	263
Tab. 70: Massenänderung durch CO <sub>2</sub> -Verlust im Überblick .....	265
Tab. 71: Erhaltene Nettowerte der CO <sub>2</sub> -Volumina im Überblick, bezogen auf 7 Tage .....	265
Tab. 72: Prozentuale Anteile der Permeanten Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf.....	266
Tab. 73: Freisetzung von Kohlenstoffdioxid aus verschiedenen Getränkeflaschen. ....	269
Tab. 74: Durchlässigkeiten für Wasserdampf im Überblick.....	275
Tab. 75: Vergleich der Wasserdampfdurchlässigkeiten verschiedener Kunststofffolien .....	279
Tab. 76: Intensität der chemischen Reaktion in Abhängigkeit von der Belichtungsstärke....	284
Tab. 77: Eigenschaften und Anwendungen der hier behandelten Kunststoffe .....	289
Tab. 78: Stoffliste mit Gefahrenkennzeichen und Entsorgungshinweisen .....	291

## 17.7 Literatur

- [1] Decker, J. et al.: „Der Alltag und der Chemieunterricht“. NiU-PC 35 (1987) Nr. 25, S. 2-4 (188-190)
- [2] Barke, H.-D.: „Chemieunterricht erscheint nicht so sinnlos, wenn man den Stoff auch im Alltag anwenden kann.“ NiU-PC 35 (1987) Nr. 25, S.38-40
- [3] Piringer, O. G.: „Verpackungen für Lebensmittel“. VCH, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, 1993
- [4] Stehle, G.: „Verpacken von Lebensmitteln.“ Behr, Hamburg, 1997
- [5] Wanjek, J.: „Einflüsse von Alltagsorientierung und Schülerexperimenten auf den Erfolg von Chemieunterricht.“ Inaugural-Dissertation, Münster, 2000
- [6] Bader, H. J.: „Auswirkungen der Thematik ‚Recycling‘ auf die Einstellung der Schüler zum Chemieunterricht, zur Chemie und zu Umwelt- und Energieproblemen.“ chimica didactica 12, 65 (1986), S. 61
- [7] Behrendt, J. et al.: „Alltagsorientierter Chemieunterricht – erprobter Unterricht in der Sekundarstufe I“. NiU-Chemie 8 (1997) Nr. 37, S. 9-16
- [8] Pfeifer, P.: „Praxisorientierter Chemieunterricht – konkret.“ NiU-Chemie 7 (1996) Nr. 31 (S. 4-6)
- [9] „Qualitätserhaltung durch MAP-Verpackung“. Frischelogsitik, Ausgabe 1/2006
- [10] „Lebensmittelrecht“. Beck-Texte im dtv, 2. Aufl., 2005
- [11] Ahlhaus, O.E.: „Verpackung mit Kunststoffen“. Hanser, München, Wien, 1997
- [12] Buchner, N.: „Verpackung von Lebensmitteln“. Springer, Berlin, Heidelberg, 1999
- [13] Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH (GVM) Wiesbaden, Recycling-Bilanz für Verpackungen, 14. Ausgabe, November 2007 (Zugriff: 28.12.2008), <http://www.env-it.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do>
- [14] Sandmeier, D.; Ziegleder, G.: „Beeinträchtigung der Qualität verpackter Lebensmittel durch verringerten Lichtschutz“. Verpackungs-Rundschau 45 (1994) Nr. 8 S. 47-51, Technisch-wissenschaftliche Beilage
- [15] Eisenbrand, G.; Schreier, P. (Hrsg.): „Römpp Lexikon Lebensmittelchemie“. Thieme, Stuttgart, New York, 1995
- [16] Glöckner, W. (Hrsg.): „Handbuch der experimentellen Chemie“. Sekundarbereich II, Band 1. Aulis Verlag Deubner, Köln, 2002
- [17] Heiss, R., Eichner, K.: „Haltbarmachen von Lebensmitteln“. Springer, Berlin, 2002

- [18] Nentwig, J.: „Kunststoff-Folien“. 2. Aufl., Hanser, München, Wien, 2000
- [19] Franck, A.: „Kunststoff-Kompodium“. 5. Aufl., Vogel Buchverlag, Würzburg, 2000
- [20] „Keep it fresh“. Verpackungs-Rundschau 5/2004, S. 82-84
- [21] EAFA Infoil 13: Frühling 2002, S. 7, <http://www.alufoil.org/media> (Internetzugriff: 2.8.2006)
- [22] Information GEROLSTEINER BRUNNEN GMBH & CO. vom 18.10.2000
- [23] Mündliche Mitteilung der Firma Schmalbach-Lubeca, 8.10.1999
- [24] Woebcken, W. (Hrsg.): „Kunststoff-Lexikon“ (Stoeckert). Hanser, München, Wien, 1998
- [25] Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Käseverpackungen – gar nicht so langweilig“. MNU 58/8 (2005) S. 482-486
- [26] Bouma, K., Stavenga, K., Draaijer, A.: “Domestic Use of Food Packaging Materials in the Netherlands”. Report NDFCM010/01, Groningen, Niederlande, August 2003, Internetadresse: [www.vwa.nl](http://www.vwa.nl)
- [27] Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e. V. (FKN): „Der Getränkekarton. Kreislaufverpackung mit Zukunft“. Wiesbaden, Dezember 1997
- [28] Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Die Dicke der Aluminiumschicht von Verpackungsfolien“. MNU 57/5 (2004) S. 285-289
- [29] FKN: Broschüre „Nachgefragt. Lebensmittel im Karton“. Februar 1999
- [30] Ökobilanz für Getränkeverpackungen II, Umweltbundesamt, 2002
- [31] Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e. V. (FKN): „Der Getränkekarton. Kreislaufverpackung mit Zukunft“. Wiesbaden, Dezember 2000
- [32] Landesvereinigung für Milch und Milcherzeugnisse Hessen e.V.: „Schulmilch im Getränkekarton – ökologisch vorteilhaft“. [www.agrinet.de](http://www.agrinet.de) (Internet-Zugriff: 9.4.2006)
- [33] Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Wie dicht sind Getränkeflaschen?“ Chem. Sch. (Salzbg.) 20 (2005), Nr. 1, S. 3-7
- [34] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Verpackungsverordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen“. (6. Januar 2006)
- [35] „Der Brockhaus in fünfzehn Bänden“. Band 14, F. A. Brockhaus GmbH, Leipzig – Mannheim, 1998

- [36] „Der Brockhaus in fünfzehn Bänden“. Band 3, F. A. Brockhaus GmbH, Leipzig – Mannheim, 1997
- [37] Gudjons, H., Winkel, R. (Hrsg.): „Didaktische Theorien“. Mit Beiträgen von W. Klafki et al.; Bergmann und Helbig, Hamburg, 1999
- [38] Hessisches Kultusministerium: „Lehrplan Chemie - Gymnasialer Bildungsgang“
- [39] Hessisches Kultusministerium: „Lehrplan Chemie – Realschule“
- [40] Flint, A.: „Ist unser heutiger Chemieunterricht schon zeitgemäß?“ In: Frankfurter Beiträge zur Didaktik der Chemie, Band 1. Verlag Harri Deutsch; Thun, Frankfurt am Main, 1998
- [41] Scheible, A.: „Ist unser Chemieunterricht noch zeitgemäß?“ MNU 22 (1969), Heft 8
- [42] Gräber, W.: „Untersuchungen zum Schülerinteresse an Chemie und Chemieunterricht“. Chemie in der Schule Chem. Sch. 39 (1992) 7 / 8
- [43] Häußler, P. et al.: „Naturwissenschaftsdidaktische Forschung – Perspektiven für die Unterrichtspraxis“. IPN, Kiel, 1998
- [44] Rossa, E.: „Chemie Didaktik. Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II.“ Cornelsen Verlag Scriptor, Berlin 2005
- [45] Pfeifer, P. et al.: „Konkrete Fachdidaktik Chemie“. Oldenbourg Schulbuchverlag GmbH, München, Neubearbeitung, 3. Aufl. 2002
- [46] Tausch, M.W.: „Didaktische Integration – die Versöhnung von Fachsystematik und Alltagsbezug“. Chemie in der Schule 47 (2000) 3
- [47] Just, E.: „Alltagsorientierung im Chemieunterricht“. NiU-Chemie 8 (1997) Nr. 37, S. 4-8
- [48] Sommer, K., Pfeifer, P.: „Aluminium - Vom Fachunterricht zum Fächer verbindenden Lernen“. Unterricht Chemie 13, 2002, Nr. 68, S. 10-13 (62-65)
- [49] Haupt, P.: „Aluminium in Zeitungsberichten“. Unterricht Chemie, 13, 2002, Nr. 68, S. 47 (99)
- [50] Stübs, R., Heldt, N.: „Die Bestimmung des Zinnionen-Gehalts in Ananaskonserven“. CHEMKON, 6. Jahrgang, 1999, Nr. 2, S. 75-79
- [51] Christiansen, D. et al.: „Müll kann man nicht *weg* werfen!“ Unterricht Chemie, 14, 2003, Nr. 73, S. 11-15
- [52] Glimm, S., Schäfer, J.: „Aluminium – Ein Werkstoff für die Welt von heute und morgen“. Unterricht Chemie, 13 (2002), Nr. 68, S. 4-9 (56-61)

- [53] Klaetsch, H., Schmidkunz, H.: „Die Bewertung der Chemie durch Schülerinnen und Schüler in unterschiedlichen Neigungsgruppen“. Reihe: Zur Didaktik der Physik und Chemie, Band L14, GDCP Kiel, Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 1994, S. 193-195]
- [54] Schmidkunz, H., Klaetsch, H.: „Die Bewertung der Chemie durch Schülerinnen und Schüler – Die Meinungen unterschiedlicher Neigungsgruppen“. NiU-Chemie 6 (1995) Nr.27, S. 9-11 (59-61)
- [55] Piosik, R.: „Projektunterricht, Thema `Getränkeverpackungen´, in Sekundarstufe I“. Chem. Sch. 44 (1997) 3, S. 106-108
- [56] Wanjek, J., Barke, H.-D.: „Einfluß eines alltagsorientierten Chemieunterrichts auf die Entwicklung von Interessen und Einstellungen“. Reihe: Zur Didaktik der Physik und Chemie, Band L18. Hrsg.: GDCP, Kiel. Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 1998, S. 286-288
- [57] Woest, V.: „Organische Stoffe des Alltags – Alltagsorientierter Unterricht in Chemiekursen“. NiU-Chemie 8 (1997) Nr. 37, S. 28-31
- [58] El-Marsafy, M.K., Schwarz, P.: „Mikrochemisches Experimentieren mit Pfennig und Dose“. CHEMKON/9, Jahrg. 2002/Nr.3, S. 147-149
- [59] De Vries, T., Martin, J., Paschmann, A.: „Heimexperimente – Ein erprobtes Projekt zum Thema *Elektrochemie* in der Sek. II“. CHEMKON 2006, 13, Nr. 4, S. 171-177
- [60] Albrecht, U. et al.: „Chemie der Dosenravioli“. Unterricht Chemie, 13, 2002, Nr. 69, S. 12-16 (116-120)
- [61] Pfeifer, P., Bruchner, G.: „Aluminium und Experimente“. Unterricht Chemie, 13, 2002, Nr. 68, S. 35 (87) – 40 (92)
- [62] Bader, H.J., Sgoff, D.: „Recycling von Getränkekartons“. Chemkon 1 (1994) Nr. 4, S. 197
- [63] Wagner, G.: „Werkstoffe aus Milch und Zucker – Biologisch abbaubare Werkstoffe im Chemieunterricht“. NiU-Chemie 10 (1999) Nr. 50, S. 24 (74) – 30 (80)
- [64] Hallstein, H.: „Rohstoffliches Kunststoffrecycling“. Chemie in der Schule, 47 (2000) 1, S. 17-19
- [65] Bader, H. J., Acs, L.: „Der PET-Kreislauf – Wie aus alten Kunststoffflaschen neue Kunststoffflaschen werden“. NiU-Chemie 7 (1996) Nr. 32 S. 42-46 (92-96)
- [66] Woest, V., Marks, R.: „Chemie-Lernprojekt mit Produkten des Alltags – Thema ‚Getränkedosen‘“. Chem. Sch. 45 (1998) 5, S. 293-297
- [67] Schleinitz, K.-D.: „Verpackungen und Ökobilanzen“. Chem. Sch., 45 (1998) 1, S. 46 – 49
- [68] Saling, P.: „Ökoeffizienz-Analyse der BASF“. MNU 60/2 (1.3.2007), S. 89-98

- [69] Eisner, W. et al.: „Elemente Chemie I“. Ausgabe A, Unterrichtswerk für Gymnasien. Klett, Stuttgart, 1995
- [70] Asselborn, W. (Hrsg.) et al.: „Chemie heute“, S I – Gesamtband (Hessen, Gymnasium) Schroedel, Hannover, 2001
- [71] Blume, R. et al.: „Chemie 8/9“ für Hessen, Sekundarstufe I, Cornelsen, Berlin, 1999
- [72] Blume, R. et al.: „Chemie 10“ für Hessen, Sekundarstufe I, Cornelsen, Berlin, 2000
- [73] „Elemente Chemie II“, Gesamtband. Klett, Stuttgart, 2000
- [74] Asselborn, W. (Hrsg.) et al.: „Chemie heute“, Sekundarbereich II. Schroedel, Hannover, 1998
- [75] Demuth, R. (Hrsg.) et al.: „Chemie im Kontext. Sekundarstufe II“, Cornelsen, Berlin, 2006
- [76] Kremer, A.; Stäudel, L.: „Projekt Naturwissenschaften – Verpackung“. Ernst Klett Verlag, Stuttgart, 1996
- [77] Haas, P.: „Arbeitsblätter Chemie im Alltag“. Klett, Stuttgart, 2000
- [78] Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Wie durchlässig sind Verpackungsfolien für Sauerstoff?“ CHEMKON 13 (2006), Nr. 1, S. 21-26
- [79] Franik, R.: „Eigenschafts-Struktur-Denken oder Bindungs-Struktur-Empirie“. PdN-Ch. 5/41. Jg. 1992, S. 1
- [80] Riedel, E.: „Anorganische Chemie“. 2., verb. Aufl., de Gruyter, Berlin, New York, 1990
- [81] Schröter, W. et al.: „Taschenbuch der Chemie“. Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/M, 1980
- [82] Amann, W. et al.: „Elemente Chemie II“. Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1989
- [83] Dehnert, K. et al. (Hrsg.): „Allgemeine Chemie“. Schroedel, Hannover, 1993
- [84] Christen, H.R.: „Chemie“. Diesterweg/Salle/Sauerländer, Frankfurt a. M., Aarau, 1978
- [85] Mortimer, C.E.: „Chemie“. 5. Aufl., Thieme, Stuttgart, 1987
- [86] Ammedick, E. et al.: „Lehrbuch der Chemie“. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1971
- [87] Fachvereinigung Behälterglasindustrie e.V., Systemvergleich von Glas- und PET-Gebinden für karbonisierte Mineralwässer und Erfrischungsgetränke, Düsseldorf (1998)
- [88] Kunststoff im Mehrweg, Technisch-Wissenschaftliche Beilage, Verpackungs-Rundschau 11 (1996) 64

- [89] Glas gegen PET, Verpackungs-Rundschau 11 (1998) 22
- [90] Bukatsch, F.; Glöckner, W. (Hrsg.): „Experimentelle Schulchemie“ (Studienausgabe, „Anorganische Chemie - Nichtmetalle II“, Band 2). Aulis, Köln, 1977
- [91] Bukatsch, F., Glöckner, W. (Hrsg.): „Experimentelle Schulchemie. Band 9“ (Organische Chemie III). Köln, Aulis, 1977
- [92] Clayden, J. et al.: „Organic Chemistry“, Oxford University Press, Oxford, 2001
- [93] Oberbach, K.: „Saechtling Kunststoff-Taschenbuch“. Hanser, München, 1998
- [94] Stuart, H.A., Klages, G.: „Kurzes Lehrbuch der Physik“. Springer, Berlin, 1984
- [95] Braun, D.: „Erkennen von Kunststoffen“. Hanser, München, 1998
- [96] „Das große Tafelwerk interaktiv“. Cornelsen, Berlin, 2003
- [97] Kaltofen, R. et al.: „Tabellenbuch Chemie“. Deutsch, Thun, 1986, S. 147
- [98] Tausch, M. (Hrsg.): „Stoff – Formel – Umwelt“. Buchner, Bamberg, 1993
- [99] Pfeifer, P.: „Struktur-Eigenschafts-Konzept - Chemische Zusammenhänge erschließen, verstehen und anwenden“. Unterricht Chemie\_18\_2007\_Nr. 100/101, S. 36-41
- [100] „Empfehlungen zur Gestaltung von Lehrplänen bzw. Richtlinien für den Chemieunterricht“. MNU, 53/3, 15.04.2000, S. IV-XIV
- [101] Demuth, R.: „Das Stoff-Teilchen-Konzept. Entwicklung und Bedeutung von Teilchenvorstellungen in der Chemie und im Chemieunterricht“. Unterricht Chemie\_18\_2007\_Nr. 100/101, S. 12-16
- [102] Wißner, O.: „Stoffeigenschaften verstehen – Aufgaben zum Basiskonzept ‚Strukturen und Eigenschaften‘“. Unterricht Chemie\_18\_2007\_Nr. 100/101, S. 55-57
- [103] Schmidkunz, H., Lindemann, H.: „Das Forschend-entwickelnde Unterrichtsverfahren“. Harms pädagogische Reihe, Schriften für die Schulpraxis, Band 72, List, München, 1981
- [104] Huntemann, H. et al.: „Chemie im Kontext – ein neues Konzept für den Chemieunterricht?“ CHEMKON/6. Jahrg. 1999/Nr. 4, S. 191-196
- [105] A. Draaijer et al.: „Non-invasive. Novel method for oxygen determination“. Verpackungs-Rundschau 3 (2002) 97f, TWB 53, S. 97f
- [106] „Kinderleichte Qualitätskontrolle“. Verpackungs-Rundschau 9 (1999), S. 22
- [107] Roesky, H.W., Möckel, K.: „Chemische Kabinettstücke“. VCH, Weinheim, 1996

- [108] Stark Verlagsgesellschaft mbH, Freising: „Abitur – Prüfungsaufgaben mit Lösungen“. Leistungskurs Chemie (Baden Württemberg): Abiturprüfung 1994, Aufgabe III/I, S. 94-13
- [109] Stark Verlagsgesellschaft mbH, Freising: „Abitur – Prüfungsaufgaben mit Lösungen“. Grundkurs Chemie (Bayern): Abiturprüfung 2004, Aufgabe II, S. 2004-7
- [110] Reske, J.: „Kompostierbare Kunststoffe. Eine neue Technologie bahnt sich ihren Weg.“ Mitt Umweltchem Ökotox 11. Jahrg. 2005 / Nr. 1, [www.oekochemie.tu-bs.de/ak-umweltchemie/mblatt/2005/b1h105.pdf](http://www.oekochemie.tu-bs.de/ak-umweltchemie/mblatt/2005/b1h105.pdf), (Internetzugriff: 2. Oktober 2006)
- [111] Daus, J. et al.: „Untersuchung des Fortbildungsverhaltens von Chemielehrerinnen und Chemielehrern“. CHEMKON 2004, 11, Nr. 2, S. 79-85
- [112] Stübs, R.: „'Chemie aus der Lebenswelt der Schüler' in der Chemielehrerausbildung“. Zur Didaktik der Physik und Chemie, Band L15. Hrsg. GDCP, Kiel. Leuchtturm-Verlag, Alsbach, 1995, S. 104-106
- [113] Kranz, J., Schorn, J.: „Chemie Methodik“. Cornelsen-Scriptor, Berlin, 2008
- [114] Häusler, K., Rampf, H.: „270 chemische Schulversuche“. Oldenbourg, CVK, München, 1976
- [115] Gerdes, E.: „Qualitative Anorganische Analyse“. 2. Aufl., Springer, Berlin, 2001
- [116] Jander, G., Blasius, E.: „Lehrbuch der analytischen und präparativen anorganischen Chemie“. Hirzel, Stuttgart, 1973
- [117] Informationsblatt zum Aluminium-Test Merckoquant der Fa. Merck (Art. 1.100.15.0001)
- [118] Merck, E.: „Komplexometrische Bestimmungsmethoden mit Titriplex®.“ E. Merck, Darmstadt ohne Jahresangabe, S. 22 f.
- [119] Jakube, H. D., Jeschkeit, H.: „Fachlexikon ABC Chemie, Band 2“. Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 1987
- [120] Dehnert, K. et al.: „Allgemeine Chemie“. Schroedel, Hannover, 1979, S. 186
- [121] Lühken, A., Bader, H. J.: „Herstellung von Glas und Email im Mikrowellenofen“. PdN-Ch 21/51. Jahrgang 2002, S. 41-44)
- [122] Peter, R.: „Ein einfacher Demonstrationsversuch zum Umschmelzen von Aluminiumschrott“. PdN-Ch 3/35. Jahrgang 1986, S.29 f.
- [123] Jander, G.: „Einführung in das anorganisch-chemische Praktikum“. Hirzel, Stuttgart, 1987, 12. überarb. Aufl.

- [124] Schulze, G., Simon, J.: „Jander / Jahr Maßanalyse“. Walter de Gruyter, Berlin, 14. Aufl., 1986
- [125] Recycling –Clearing-Stelle des Informations-Zentrums Weißblech e.V. (IZW), Internetzugriff: 02.03.2002
- [126] Holleman, A.F., Wiberg, E.: „Lehrbuch der Anorganischen Chemie“. Walter de Gruyter, Berlin, 1964
- [127] Gerdes, E.: „Qualitative Anorganische Analyse“. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 1995
- [128] Holleman, A.F.: „Lehrbuch der anorganischen Chemie / Holleman-Wiberg“. 91.-100. Aufl., de Gruyter, Berlin, New York, 1985
- [129] Sternberg, M.: „Glasklar und doch unzerbrechlich.“ Indikator (Klett-Magazin), Ernst Klett Verlag, Stuttgart, Nr. 31, III / 2000
- [130] Bader, H. J.: „Kunststoff-Recycling“. Praxis-Schriftenreihe: Abt. Chemie; Bd. 40. Aulis-Verlag Deubner, Köln, 1983
- [131] Domininghaus, H.: „Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften“. 3. Aufl., VDI, Düsseldorf, 1988
- [132] Falbe, J., Regitz, M. (Hrsg.): „Römpp Chemie Lexikon Band 1“. Thieme, Stuttgart, 1989
- [133] Aufgaben zur Chemie-Olympiade 2004
- [134] Falbe, J., Regitz, M. (Hrsg.): „Römpp Chemie Lexikon Band 5“. Thieme, Stuttgart, 1992
- [135] Hernandez et al.: „Plastics Packaging“, Hanser 2004
- [136] Piringer, O.G.; A.L. Baner (Hrsg.): „Pastic Packaging Materials for Food“. Wiley-VCH, 2000
- [137] [http://www.mcanac.co.jp/bunya/kb\\_image/pdf\\_01.pdf](http://www.mcanac.co.jp/bunya/kb_image/pdf_01.pdf)
- [138] Falbe, J., Regitz, M.: „Römpp-Chemie-Lexikon Band 3“. Thieme, Stuttgart, 1990
- [139] Wöhrle, F. et al.: „Rund um`s Papier.“ NiU-Chemie 6 (1995) Nr. 29, S. 26-30 (180-184)
- [140] <http://www.uni-tuebingen.de/AK-Meyer/pdf/mi11.pdf> „Kohlenhydrate“.  
(Internetzugriff: 22.07.2006)
- [141] [http://www.chemie.uni-greifswald.de/~biochem/teaching/prakt\\_biochem/prakt\\_biochem\\_A\\_WS2005.doc](http://www.chemie.uni-greifswald.de/~biochem/teaching/prakt_biochem/prakt_biochem_A_WS2005.doc), „Biochemie-Übungen“, S. 7. (Internetzugriff: 22.07.2006)

- [142] Sommer, K.; Pfeifer, P.: „Chemisches Grundwissen anwenden.“ Unterricht Chemie, 15, 2004, Nr. 79 (41-52)
- [143] Beyer, H.: „Lehrbuch der Organischen Chemie.“ 22. Aufl., Hirzel, Stuttgart, 1991
- [144] Bukatsch, F; Glöckner, W. (Hrsg.): „Experimentelle Schulchemie.“ Band 8 (Organische Chemie II), Aulis, Köln, 1977
- [145] Kiechle, H.: „Leistungskurs Biochemie“. Diesterweg / Sauerländer, Frankfurt am Main, Aarau, 1984
- [146] Lechner, K.: „Biochemie“. Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1982
- [147] Kaltenborn, U.: „Die Eignung von Diagnoseverfahren zur Beurteilung der Frühphase der Oberflächenalterung von Epoxidharz-Formstoffen bei simultaner elektrischer und klimatischer Beanspruchung“. Darmstädter Dissertation, D17, 2005. (Internetzugriff am 5.5.2010 unter: <http://deposit.d-nb.de>)
- [148] Falbe, J., Regitz, M. (Hrsg.): „Chemie Lexikon Römpp“. Band 2, Thieme, Stuttgart, 1990
- [149] Schmidt, H.J., Finke, D., Wortmann, K.: „Die quantitative Elementaranalyse im forschenden Experimentalunterricht“. Aulis, Deubner, 1986
- [150] Neu, C., Bader, H.J.: „PVC – Schulversuche zu einem umstrittenen Kunststoff“. Frankfurter Beiträge zur Didaktik der Chemie, Band 1. Deutsch, Thun, Frankfurt am Main, 1998
- [151] Zorll, U. (Hrsg.): „Römpp Lexikon. Lacke und Druckfarben“. Thieme, Stuttgart, 1998
- [152] Neu, C.; Bader, H.J.: „Möglichkeiten der experimentellen Erschließung des Themas PVC im Chemieunterricht.“ CHEMKON/4.Jahrg. 1997/Nr.3, S.126 f.
- [153] Neu, C.: „Entwicklung von Schulversuchen zum Thema PVC“. Staatsexamensarbeit, WS 1995/96
- [154] Welle, F.: „Acetaldehyd in PET-Flaschen bestimmen“. Verpackungs-Rundschau 11 / 2000, TWB 51, S. 70-72
- [155] Risch, K., Seitz, H.: „Organische Chemie“. Schroedel, Hannover, 2003
- [156] Schweizerisches Lebensmittelbuch, Kapitel 42A: Farbstoffe für Lebensmittel. - Bundesamt für Gesundheitswesen. - Bern, 1990, [www.bag.admin.ch/slmb/pdf2003/42A\\_Farbstoffe%20f.%20lebensm.pdf](http://www.bag.admin.ch/slmb/pdf2003/42A_Farbstoffe%20f.%20lebensm.pdf), (Internet-Zugriff: 19. 02. 2005)
- [157] Bukatsch, F., Glöckner, W. (Hrsg.): „Experimentelle Schulchemie“, Band 3 (Anorganische Chemie, Metalle). Aulis, Köln, 1977

- [158] Braune, W. et al.: „Pflanzenanatomisches Praktikum“. Fischer, Stuttgart, 1971
- [159] Verband Kunststoffherstellende Industrie: „Eigenschaften von Kunststoffen: Verhalten bei Zugbelastung“. Foliensammlung
- [160] Bader, H. J. (Hrsg.): „Handbuch der experimentellen Schulchemie, Sekundarstufe II“ (Band 12: „Kunststoffe, Recycling, Alltagschemie“). Aulis, Köln, 1997
- [161] Hund, M. et al.: „Handbuch (524201) CASSY®Lab“, LD Lehr- und Didaktiksysteme der Firma Leybold, 17.3.2006
- [162] Müller, P.: „Neutralglas - ein Werkstoff im Dienste der Gesundheit“. PdN-Ch. 8/39. Jg. 1990
- [163] Boeck, H. et al.: „Chemische Schalexperimente“. Band 3, Anorganische Chemie, zweiter Teil. Volk und Wissen Volkseigener Verlag, Berlin, 1978
- [164] Rothweil, M.: „Glas als Verpackungsmaterial“. Übungen zum Chemieunterricht II, S.11, Semesterarbeit, Sommersemester 1999
- [165] Schmidt, T.: „Identifizierung und Untersuchung pharmazeutischer Gläser durch Laser-Ablation-ICP-MS.“ Dissertation, eingereicht an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I der Humboldt-Universität zu Berlin. <http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/schmidt-torsten-2001-11-09/HTML/front.html#front>
- [166] „Schott Fiolax® Spezialglasröhren zur Herstellung pharmazeutischer Primärpackmittel.“ ([www.schott.com/rohrglas](http://www.schott.com/rohrglas))
- [167] Kamp, H.; Schrepper, R.: „Chemische Formeln und Daten“. Klett, Stuttgart, 1995
- [168] Technical Data Sheet, ZA675, Hearing Aid Battery, renata batteries, [www.renata.com](http://www.renata.com)
- [169] Hamann, C. H., in: Jansen, W., Glöckner, W., Weißenborn, H.G. (Hrsg.): „Handbuch der experimentellen Chemie, Elektrochemie, Band 6“. Köln, 1999
- [170] Hamann, C.H., Vielstich, W.: „Elektrochemie“. Weinheim, 2005<sup>4</sup>
- [171] <http://www.vaisala.com/instruments/servicesupport/userguides/humidity/...>: „Bedienungsanleitung Vaisala Feuchtekalibrator HMK15“, 2006, S. 1, 4, 62. Internetzugriff: Okt. 2008
- [172] Bukatsch / Glöckner: „Experimentelle Schulchemie“. Physikalische Schulchemie 1, Band 5. Aulis, 1977

## Lebenslauf

Name: Bernd Landsgesell  
Geburtstag: 13.05.1954  
Geburtsort: Bad Soden-Salmünster  
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder  
Staatsangehörigkeit: deutsch

1961-1965            Grundschule in Bad Soden-Salmünster

1965-1973           Gymnasium: Ulrich-von-Hutten-Schule in Schlüchtern  
(math.-naturwiss. Zweig / Allgemeine Hochschulreife)

1974-1975           Zivildienst (Universitätsklinik Göttingen)

1975-1982           Studium an der Universität Göttingen

                          Diplomprüfung Biologie (1982)  
                          Erstes Staatsexamen Biologie/Chemie für das Lehramt an Gymnasien  
                          (1982)

1983-1984           Referendariat an der Helmholtzschule in Frankfurt a.M.  
(Thema der pädagogischen Prüfungsarbeit: „Neutralisation von sauren  
Lösungen durch alkalische Salze“ in Jahrgangsstufe 11)  
Zweite Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien

Seit 1985            Lehrer an der Privaten Kant-Schule in Frankfurt a.M. (Gymnasium mit  
vorgeschalteter Grundschule) für die Fächer Chemie und Biologie

1987                 Zusatzprüfung zum Erwerb der Befähigung für das Lehramt an  
Hauptschulen und Realschulen (Fachdidaktik Chemie und Physik)

1991                 Erweiterungsprüfung zur Zusatzprüfung (Biologie)

Seit 1999            Doktorand im Arbeitskreis von Prof. Dr. Bader  
am Institut für Didaktik der Chemie  
der Goethe-Universität Frankfurt a.M.

### Veröffentlichungen:

Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Die Dicke der Aluminiumschicht von Verpackungsfolien“. MNU 57/5 (2004) S. 285-289

Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Wie dicht sind Getränkeflaschen?“ Chem. Sch. (Salzbg.) 20 (2005), Nr. 1, S. 3-7

Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Käseverpackungen – gar nicht so langweilig“. MNU 58/8 (2005) S. 482-486

Landsgesell, B., Bader, H. J.: „Wie durchlässig sind Verpackungsfolien für Sauerstoff?“ CHEMKON 13 (2006), Nr. 1, S. 21-26

### Vorträge:

09.09.2004 21. Fortbildungs- und Vortragstagung der Fachgruppe Chemieunterricht (GDCh) in Bremen: „Verpackungsmaterialien für Lebensmittel – ausgewählte experimentelle Ansätze zur Gewinnung von Erkenntnissen über Aufbau und Funktion“ (Experimentalvortrag)

17.09.2007 GDCh-Wissenschaftsforum Chemie in Ulm: „Lebensmittelverpackungen als Thema im Chemieunterricht“ (Poster, CU\_024)

### Lehrerfortbildung:

28.02.2008 Lehrerfortbildungszentrum des Instituts für Didaktik der Chemie (Ifbz), Goethe-Universität Frankfurt a.M.: „Lebensmittelverpackungen - Erschließung des Themas für den Einsatz im Chemieunterricht“ (Prof. Dr. Hans Joachim Bader, Bernd Landsgesell)