

Eine Masse von ganz unterrichteten Leuten betrachten die Chemie als eine in Regeln gebrachte Experimentierkunst, nützlich um Soda und Seife zu machen, besseren Stahl zu fabrizieren, um gute solide Farben auf Seide und Baumwolle zu liefern [1].

Wie Liebig es bereits 1840 beklagte, glauben Laien oftmals, dass es sich bei der Chemie um eine Probierekunst handelt, die von Zeit zu Zeit zufällig ein neues Produkt liefert. Man erkennt nicht ohne weiteres, dass dem klassischen Experiment in den Naturwissenschaften eine Idee oder gar eine Philosophie vorausgeht. Um diesen Zusammenhang zu erläutern, soll als Beispiel die Ausschärfung des Elementbegriffs dienen.

Beispiel Elementbegriff

Eine vorläufige Hypothese zu chemischen Elementen tauchte bereits in den Philosophieschulen des griechischen Altertums auf: Empedokles „redet von den vier Wurzeln aller Dinge, die er in mythischer Weise als Gottheiten fasst. Diese vier Gottheiten stellen das Feuer, die Erde, die Luft und das Wasser dar, aus denen alles Seiende zusammengesetzt gedacht wird. Der Begriff des Elements geht auf ihn zurück“ [2]. Beim näheren Studium dieser Idee erkennt man, dass die griechischen Philosophen solche und andere Gedankengebäude ohne jedes Experiment errichtet hatten: Zwar beruhten die damaligen Leistungen gewiß auf einer Reihe sorgfältiger und geordneter Beobachtungen an der Natur, doch kann hier von einem Experimentieren im wissenschaftlichen Sinne keine Rede sein [2].

Die Alchemie des Mittelalters wurde vor allem von dem Gedanken beherrscht, aus unedlen Metallen Gold herzustellen: Bei der Aufbereitung von Erzen wurden zufällig kleine Mengen an Gold oder Silber ausgeschieden und man probierte in vieler Hinsicht aus, Gold und Silber durch „Metallveredlung“ oder „Transmutation“ zu erhalten. Bei diesen „Probierkünsten“ beobachtete man, dass sich metallisches Kupfer abscheidet, wenn man eine Vitriollösung – heute nennen wir sie Kupfersulfatlösung – mit Eisen versetzt. Der Alchemist van Helmont fand allerdings heraus, dass er aus Vitriollösung auch auf anderen Wegen Kupfer herzustellen vermochte, dass Kupfer „irgendwie“ in der Vitriollösung enthalten war und nur abgetrennt werden musste. Diesen Zerlegungsgedanken griff Boyle in seinem Werk „The Sceptical Chymist“ auf, um zu seiner Theorie zu gelangen (Kap. 11 im elektronischen Anhang): Elemente sind Grundsubstanzen, die sich nicht weiter zerlegen lassen. „Immer wieder betont Boyle, dass es solange nicht angeht, Theorien über chemische Stoffe für gültig zu nehmen, als sie nicht durch die experimentelle Erfahrung gestützt werden“ [2].

Das galt insbesondere für die Phlogistontheorie zur Verbrennung, die die Abgabe einer gewissen „Substanz Phlogiston“ aus dem Brennstoff postulierte – Experimente konnten diese Theorie allerdings nie verifizieren. Erst Lavoisier gelang es, durch den konsequenten Einsatz der Waage die Phlogistontheorie zu stürzen und zu zeigen, dass die reinen Metalle die unzerlegbaren Elemente sind, während die „Metallkalke“ im Experiment Metall und Sauerstoff liefern und deshalb keine Elemente darstellen. Lavoisier erkannte deutlich, dass zwar zerlegbare Substanzen keine Elemente sind, der umgekehrte Schluss aber nicht gilt: Substanzen, die zunächst als unzerlegbar galten, mochten sich durch verbesserte Techniken später als zerlegbar erweisen. Lavoisier stellte deshalb vorsichtig fest (Kap. 13): „Gewisse Stoffe sind als Elemente chemisch bestimmt, sofern und solange wir keine Mittel haben, sie weiter zu zerlegen. Sie sind Elemente für uns und unsere Sichtweise, pour nous, à notre égard“ [2].

Dieser vorläufige Elementbegriff war die Basis des Denkens und Handelns in der Zeit von Lavoisier; Experimente leiteten sich aus der Hypothese einer möglichen Zerlegbarkeit ab und bestätigten diese im Erfolgsfall. Das Experiment erhielt die wissenschaftliche Bedeutung eines Instruments, das über die Gültigkeit von Gesetzmäßigkeiten und Theorien befindet!

Einen weiteren großen Schritt gab es im Jahr 1808, als John Dalton „A New System of Chemical Philosophy“ veröffentlichte. Jeremias Benjamin Richter hatte Ende des 18. Jahrhunderts in seinen „Beyträgen zur Stöchiometrie“ die Gesetzmäßigkeiten zu konstanten Massenverhältnissen publiziert (Kap. 14 im elektronischen Anhang). Darauf aufbauend hatte Dalton die grandiose Idee, jedem Element eine bestimmte Atomart zuzuordnen, die sich in der Atommasse von anderen Atomarten unterscheidet. Die erste Atommasstabelle der Naturwissenschaften schlug er 1808 vor (Abb. 6.1) – von den zwanzig aufgeführten „Elementen“ entpuppten sich später allerdings sechs als chemische Verbindungen: so hielt man etwa „Magnesia“, das heutige Magnesiumoxid, für ein Element.

Mit dieser Hypothese der spezifischen Atommassen wurde ein ganzes Forschungsfeld für die Chemie eröffnet: Die quantitative Zusammensetzung vieler Verbindungen aus ihren Elementen wurde erforscht, entsprechende Anschauungsmodelle und chemische Symbole sind daraufhin entwickelt worden. Auch wenn Dalton zu seiner Zeit noch „magnesia, lime, soda, potash, strontian and barytes“ als Elemente auffasste, obwohl sich die Atommassen als noch völlig unzureichend herausstellten, war die Idee der Atommassen so weitreichend, dass die Chemie erst auf diesem Weg zu einer exakten Wissenschaft werden konnte (Kap. 14).

A			
NEW SYSTEM		ELEMENTS	
"			
CHEMICAL PHILOSOPHY.			

PART I.			

BY			
JOHN DALTON.			

MANCHESTER:			
Printed by G. Bousfield, 112, Broadgate,			
702			
R. BICKERSTAFF, STRAND, LONDON.			
1808.			

○	Hydrogen.	1	⊕	Strontian	86
⊖	Air	5	⊗	Barytes	68
●	Carbon	5	⊖	Iron	56
○	Oxygen	7	Z	Zinc	56
⊖	Phosphorus	9	C	Copper	56
⊕	Sulphur	16	L	Lead	200
⊖	Magnesia	24	S	Silver	190
⊖	Lime	24	⊗	Gold	190
⊖	Soda	28	P	Platina	190
⊖	Potash	42	⊗	Mercury	167

Abb. 6.1 Erste vorläufige Atommasstabelle von Dalton aus dem Jahr 1808 [2]

6.1 Fachliche Schwerpunkte: Experiment, Experimentierfähigkeiten, Sicherheit

Im Sinne der Einleitung hat sich die Chemie als experimentelle Naturwissenschaft entwickelt. Es ist entsprechend zu reflektieren, welche Funktionen das Experiment in der Fachwissenschaft hat, in welcher Weise diese auch für den Chemieunterricht gelten und welche weiteren Funktionen für den Unterricht hinzukommen.

6.1.1 Experiment und Prozess der Erkenntnisgewinnung

Eine der wichtigsten Funktionen des Experiments in der Chemie ist die empirische Erkenntnisgewinnung durch das *Formulieren und experimentelle Überprüfen von Hypothesen*. In der Einleitung wird die Hypothese des Elementbegriffs als historisches Beispiel skizziert, die über Jahrhunderte geprüft worden ist, ehe mit der Idee von John Dalton eine Bestätigung durch die überall reproduzierbaren Messwerte von Atommassen erfolgte.

Zunächst soll diese empirische Erkenntnismethode durch wesentliche Erkenntnisschritte formalisiert werden (Abb. 6.2). Oftmals hört man in unzutreffender Weise, dass nur ein Einzelphänomen zur Postulierung einer Hypothese führen könne und dass ein einziges Experiment ausreichen solle, um eine Hypothese zu bestätigen. Es sind immer mehrere Beobachtungen oder Messungen notwendig, die zunächst geordnet, gesammelt oder verglichen und in einen vermuteten Zusammenhang gebracht werden. Daraufhin ist das Entwickeln einer allgemeinen Hypothese möglich. Wenn man dann genügend Einzelfälle aus der Hypothese ableitet und experimentell überprüft, wird über die Verifizierung oder Falsifizierung entschieden. Eine wiederholte Bestätigung der Hypothese führt in manchen Fällen zu einer neuen Theorie oder zu einer neuen Gesetzmäßigkeit, aus der Prognosen oder Voraussagen möglich werden. Die folgenden drei Beispiele machen das anschaulich.

Torricelli hatte gemeinsam mit Galilei aufgrund von Überlegungen zum „Horror vacui“ die *Hypothese zum Luftdruck* entwickelt (Kap. 2). Im Jahr 1644 realisierte er zur ersten Prüfung der Hypothese das bekannte Quecksilber-Experiment im Labor (Abb. 2.1b) und konnte durch weitere Experimente – etwa durch Luftdruckmessungen auf verschiedenen Höhen eines Bergs – die Hypothese verifizieren und zur Theorie des Luftdrucks gelangen: Luft ist eine Substanz mit spezifischer Dichte, die uns umgebende Atmosphäre weist einen bestimmten Luftdruck auf, der mit zunehmender Höhe über dem Erdboden abnimmt.

Kekulé beschäftigte sich, ausgehend von empirischen Analysen zu Massenverhältnissen der Elemente in vielen organischen Substanzen, mit der Beschreibung dieser Analyseergebnisse durch Formeln. Dabei dachte er immer auch an den räumlichen Aufbau entsprechender Moleküle aus Atomen. Der Versuch, das Benzol-Molekül mit seinen Mitteln zu beschreiben, scheiterte zunächst, dann stellte er 1865 die *Hypothese zur ringförmigen Molekülstruktur* auf (Abb. 6.3a). Um die von ihm postulierte Vierbindigkeit des C-Atoms zu retten – was seinerzeit keineswegs allgemein akzeptiert war – beschrieb Kekulé das Benzol-Molekül zunächst

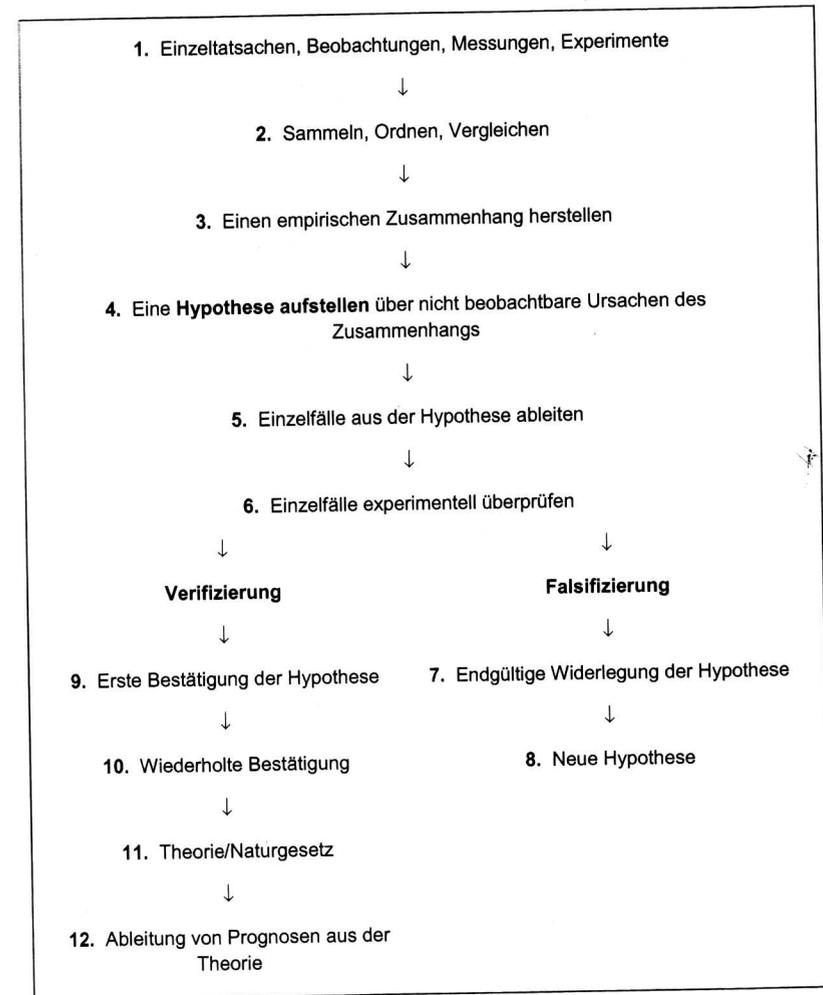


Abb. 6.2 Schrittfolge der empirischen Erkenntnismethode

mit alternativ wechselnden Einfach- und Doppelbindungen, ahnte aber, dass die Bindungen alle äquivalent sind. Von dieser Hypothese ausgehend leitete er viele Einzelfälle und entsprechende Experimente ab und zeigte, dass es dann nur ein einziges monosubstituiertes Molekül C_6H_5Cl geben kann, dass nur genau drei disubstituierte Moleküle $C_6H_4Cl_2$ realisierbar sind und dass nur drei trisubstituierte Moleküle $C_6H_3Cl_3$ existieren (Abb. 6.3b): Alle sechs Bindungen im Benzol-Molekül sind also äquivalent. Mit heutigen instrumentellen Methoden zeigt man, dass

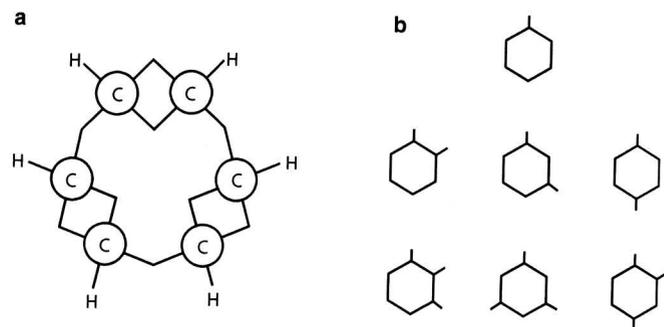


Abb. 6.3 Kekulé's Hypothese von der Struktur des Benzol-Moleküls und einiger substituierter Derivate [3]

der Abstand zwischen benachbarten C-Atomen immer gleich ist, dass der Messwert zwischen den Bindungslängen von Einfach- und Doppelbindung liegt.

Zusätzlich postulierten Kekulé und van't Hoff das räumliche Tetraedermodell zur Struktur des Methan-Moleküls. Aus den Hypothesen abgeleitete Einzelfälle konnten alle experimentell bestätigt werden: Beide Hypothesen – von der Vierbindigkeit des C-Atoms und von der Struktur der Aromaten – wurden nach und nach zu noch heute gültigen Theorien ausgeschärft (Kap. 20).

Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahr 1895 durch Konrad Wilhelm Röntgen arbeiteten viele Wissenschaftler fieberhaft an der *Hypothese der Röntgenstrahlenbeugung*. Max von Laue gelang der Nachweis schließlich im Jahre 1912 und er selbst kommentiert seinen entscheidenden Gedanken folgendermaßen (Abb. 6.4):

Die Entdeckungsgeschichte der Röntgenstrahlinterferenz kennzeichnet so recht den Wert der wissenschaftlichen Hypothese. Viele haben schon lange vor Friedrich und Knipping Röntgenstrahlen durch Kristalle gesandt. Aber ihre Beobachtungen beschränkten sich auf den direkt hindurchgehenden Strahl, an welchem außer der Schwächung durch den Kristall nichts Bemerkenswertes zu sehen war; die viel weniger intensiven abgelenkten Strahlen entgingen ihnen. Erst die Hypothese der Raumgitter bei Kristallen und deren Beugungseigenschaften brachte die Idee, doch einmal dessen Umgebung zu durchforschen [4].

Eine detaillierte Darstellung dieses Erkenntnisweges folgt im elektronischen Anhang (Kap. 24).

6.1.2 Gewinnung von Daten

Neben der wohl wichtigsten Funktion der Hypothesenprüfung ist es eine weitere Funktion des Experiments, Messungen zur Beschreibung von *Substanzen und deren Eigenschaften* durchzuführen: Sie ermöglichen den Vergleich mit Eigenschaften

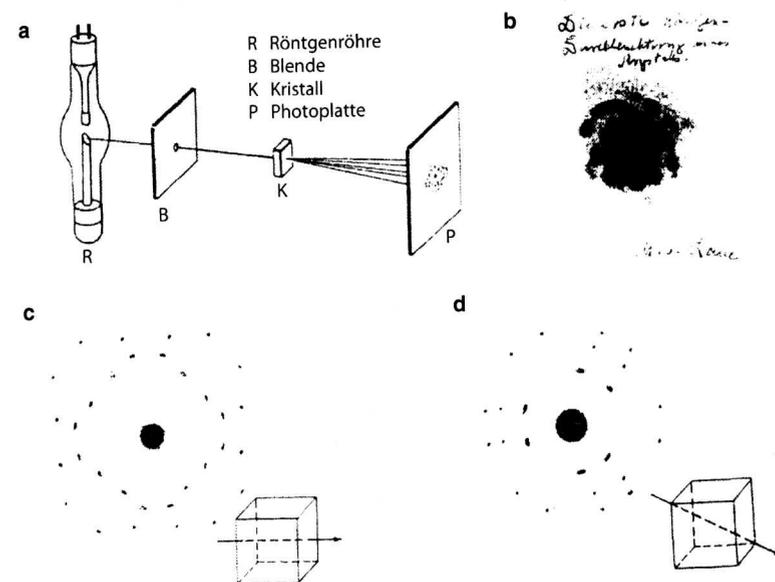


Abb. 6.4 Laue's Notizen zur Hypothese der Verwendung eines Kristalls als spezifisches Gitter zur Interferenz von Röntgenstrahlen [5]

anderer Stoffe. Die Messungen beziehen sich traditionell auf Dichten, Schmelz- und Siedetemperaturen, um mit jeweils drei Parametern eine erste Kennzeichnung von Substanzen zu erhalten. Des Weiteren können hinzukommen: Löslichkeit in Wasser und anderen Lösemitteln, Brechungsindex, Viskosität, optische Aktivität, Wärmeleitfähigkeit, elektrische Leitfähigkeit, pH-Abhängigkeiten, Redoxpotenziale, MS-, IR- und NMR-Spektren etc.

Eine entsprechende Beschreibung für *chemische Prozesse* konnte erfolgen durch die Ermittlung von Massen- und Volumenverhältnissen bei Reaktionen, durch die Stöchiometrie von umgesetzten Stoffmengen der Atome, Ionen oder Moleküle, durch entsprechend daraus ermittelte Summen- bzw. Struktursymbole, die schließlich zu den heute üblichen Reaktionssymbolen führten. Auch Löslichkeitsprodukte, Gleichgewichts- und Geschwindigkeitskonstanten oder Reaktionsordnungen sind charakteristische Kenngrößen für chemische Vorgänge.

In heutigen Laboratorien findet die Beschreibung von Substanzen und Prozessen überwiegend durch *Verfahren der Instrumentellen Analytik* statt: etwa Papier-, Dünnschicht- oder Säulenchromatografie, Gaschromatografie (GC), Massenspektrometrie (MS), Kombinationen von GC und MS, Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), Infrarotspektroskopie (IR), magnetische Kernresonanzspektroskopie (NMR), Röntgenstrukturanalyse. Die entsprechenden Großgeräte sind nicht nur sehr teuer, sondern erfordern auch die fachliche Betreuung durch besonders ausgebildetes Personal. Chemiestudenten lernen die Großgeräte im Experimen-

talpraktikum kennen, Lehrer und Schüler können sie sich in den Chemischen Instituten einer Universität oder bei Führungen durch die Forschungslaboratorien der Industrie erklären lassen.

Es sind allerdings auch Schulgeräte entwickelt worden, die einige der genannten Verfahren anschaulich und didaktisch reduziert vermitteln: beispielsweise von Wiederholt [6] zur *Gaschromatografie* und zur *Differenzthermoanalyse*, von Brockmeyer [7] zur *Röntgenstrukturanalyse* (vgl. auch entsprechende Modellexperimente zur Gaschromatografie (Abschn. 6.6: V6.1) und zur Röntgenstrukturanalyse (Abschn. 6.6: V6.2).

6.1.3 Synthese neuer Substanzen

Die wohl älteste Funktion des „Experimentierens“ war die mehr oder weniger ausgeprägte „Probierkunst“ zur Darstellung von Substanzen, die aus Gemischen der Natur abgetrennt oder als völlig neuartig dargestellt wurden. So gelang es im Jahre 1708 Johann Friedrich Böttger, das Porzellan in Meißen bei Dresden neu zu erfinden, das in China bereits im 6. Jahrhundert bekannt war. Nach Schwedt [8] sind in Tab. 6.1 einige Substanzen mit der ungefähren Zeit angegeben, zu der sie erstmals dargestellt wurden.

Gegenwärtig lesen wir fast wöchentlich von neuen Substanzen wie etwa neuartige Medikamente, Memorymetalle, elektrisch leitfähige Polymere oder Materialien der Nanotechnologie. Die ungeheuer große Zahl der zukünftigen Synthesen neuer Substanzen in den chemischen Laboratorien ist weder begrenzt noch voraussagbar.

6.1.4 Experimentelle Fähigkeiten und Fertigkeiten

Zukünftige Chemielehrer und -lehrerinnen müssen nicht nur selbst experimentieren können, sondern tun es eingebunden in das Unterrichtsgespräch mit einer Schülergruppe, des Weiteren sollen sie das Experimentieren möglichst auch den Lernenden vermitteln. Sie verfügen deshalb über *Fähigkeiten*, Experimente zu planen, durchzuführen und auszuwerten, sie besitzen ebenfalls die manuellen *Fertigkeiten*, um mit entsprechenden Apparaturen, Geräten und Chemikalien der Schulchemie sachgemäß umzugehen und Sicherheits- und Entsorgungsaspekte zu beachten.

Über die experimentelle Grundausbildung hinaus sollen deshalb die Lehramtsstudierenden in fachdidaktischen Experimentalpraktika ein Repertoire an Schulversuchen zu unterrichtsbedeutsamen Themen erarbeiten. Sie müssen Erfahrungen im Umgang mit Experimenten gewinnen, die spezielle Sicherheitsanforderungen verlangen. Dazu gehören u. a. der Umgang mit

- Wasserstoff, Stahlflaschen und Montage der Ventile, Herstellen von Wasserstoff im Gasentwickler und pneumatisches Auffangen im Standzylinder, Knallgasgemischen und Knallgasproben,

Tab. 6.1 Gewinnung einiger Substanzen in der Geschichte der Menschheit [8]

8000 v. Chr.	Keramiken
3700 v. Chr.	Schmuck aus Kupfer, Silber und Gold
3000 v. Chr.	Antimon und Blei in Babylonien, Bronze in Ägypten
2900 v. Chr.	Glas in Ägypten
2400 v. Chr.	Indigofarben in Ägypten
2000 v. Chr.	Schwefel aus heißen Quellen
1200 v. Chr.	Zinn und Zink in Indien
1000 v. Chr.	Eisen durch Rennfeuerofen
500 v. Chr.	Purpur- und Krappfarben, Soda, Pottasche, Gips, Mörtel, Alaun, Ätzkali in Rom
400 v. Chr.	Quecksilber in Griechenland
20–80	Seife, Mineralfarben, Legierungen in Rom
500	Borax, Salpeter, Schwermetallverbindungen in Indien
600	Porzellan in China
850	Salmiak, Essigsäure und Bleiweiß (Bleihydroxidcarbonat)
900	Papier in Kairo
1100	Tinten und Malerfarben
1227	Weingeist (Ethanol) als Heilmittel
1230	Schießpulver in China
1300	Schwefelsäure (Destillation)
1565	Zinkvitriol (Zinksulfat)
1580	Benzoessäure
1648	Salzsäure, Salpetersäure
1669	Phosphor
1671	Lackmus als Indikator
1708	Weißporzellan in Meißen
1727	Silbernitrat für erste Fotos
1746	Schwefelsäure (Bleikammerverfahren)
1747	Zucker aus Rüben
1766	Wasserstoff
1773	Sauerstoff, Stickstoff
1808	Natrium, Kalium, Magnesium, Calcium, Strontium, Barium
1810	Chlor
1827	Aluminium
1828	Harnstoff
1855	Lithium
1867	Dynamit
1870	Indigo
1884	Kunstseide
1894	Argon, Edelgase
1898	Polonium, Radium
1909	Bakelit
1913	Ammoniak
1924	Insulin
1928	Penicillin u. a.

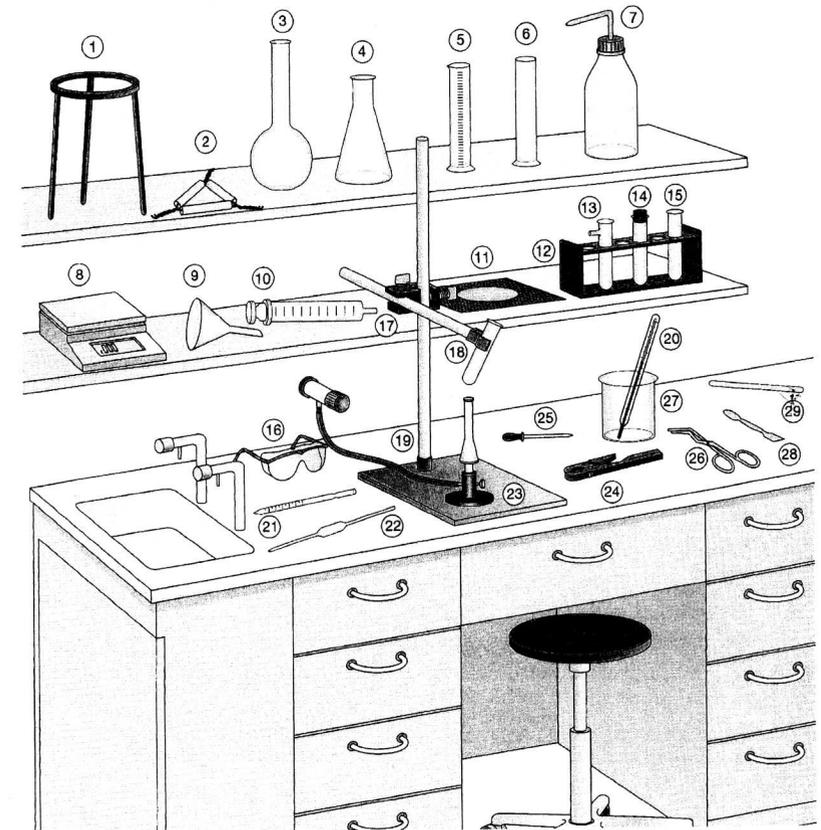
- Methan, Butan, tragbarem Butangasbrenner und Wechsel der Gaskartuschen, Methan-Luft- und Butan-Luft-Gemischen und deren schnelle Reaktionen im Standzylinder,
- Alkalimetallen, deren Aufbewahrung unter Benzin und Schneiden mit einem Messer, Reaktionen mit Sauerstoff, Wasser oder Halogenen, deren Entsorgung in Alkohol,
- Halogenen, der Erzeugung von Chlor im Gasentwickler und dessen Metall-Reaktionen, Brom und dessen Aufbewahrung, Iod und dessen Sublimation,
- giftigem und selbstentzündlichem weißem Phosphor, mit rotem Phosphor, und der sachgerechten Beseitigung von Resten,
- Messgeräten für quantitative Experimente wie Balkenwaage und Digitalwaage, Kolbenprober, Vollpipette, Messpipette, Bürette, Leitfähigkeitsprüfer, pH-Meter etc.
- Batterien und Trafos, Stromkreisen und entsprechendem Zubehör wie Kabel, Krokodilklemmen, Glühlampen, Spannungs- und Strommessern.

In den *Versuchen V6.3 bis V6.10* (Abschn. 6.6) wird exemplarisch am Thema „Alkalimetalle“ der Umgang mit diesen Metallen demonstriert, es werden Reaktionen mit Luft, Wasser und Halogenen beschrieben. Wichtige Schulversuche zu wesentlichen Schulthemen sind der Experimentalliteratur zu entnehmen (etwa [9–12]). Sollen Studierende oder Lernende in Schulen auch Schauversuche mit besonderen Effekten selbstständig durchführen, so sind diese wegen der spezifischen Gefährdungspotenziale sorgfältig unter Aufsicht auszuprobieren.

Bei der praktischen Durchführung der Schulexperimente lernen die Teilnehmer und Teilnehmerinnen eine Vielzahl *laborspezifischer Geräte* kennen. Um eine erste Kenntnis von Geräten des Labors und deren spezifische Namen zu vermitteln, kann ihnen eine Zusammenstellung von Laborgeräten an die Hand gegeben werden (Abb. 6.5). Insbesondere ist der Umgang mit dem Gasbrenner für das zukünftige Experimentieren zu üben (Abb. 6.6) – in diesem Zusammenhang ist es interessant geworden, den Lernenden einen „Laborführerschein“ anzubieten. Die Gerätekenntnis ist insbesondere wichtig, um mögliche Schülerexperimente für den Unterricht planen zu können oder spontan Lehrerversuche ergänzend zum Unterrichtsgespräch durchzuführen, zum anderen ist sie vorteilhaft, um als Fachlehrer die Chemiesammlung in der Schule sachgerecht zu organisieren.

Um Messreihen aufzunehmen und simultan grafische Darstellungen zu erhalten, eignet sich der Anschluss von Messgeräten an den *Computer*. Mit geeigneter Hard- und Software werden Messgeräte und Rechner verbunden, Messwerte in geeigneter Weise aufgenommen und in vielfältiger Weise ausgewertet. Da sich Hard- und Software ziemlich schnell weiterentwickeln, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, die zu dieser Zeit gerade aktuelle Literatur oder Programme aufzuführen.

Ausgewählte Laborgeräte



- | | | |
|--------------------|------------------------------|---------------------------|
| ① Dreifuß | ⑪ Drahtnetz | ⑳ Messpipette |
| ② Tondreieck | ⑫ Reagenzglasständer | ㉑ Vollpipette |
| ③ Stehkolben | ⑬ Reagenzglas mit Ansatzrohr | ㉒ Gasbrenner |
| ④ Erlenmeyerkolben | ⑭ Stopfen | ㉓ Reagenzglas-
klammer |
| ⑤ Messzylinder | ⑮ Reagenzglas | ㉔ Tropfpipette |
| ⑥ Standzylinder | ⑯ Schutzbrille | ㉕ Tiegelfzange |
| ⑦ Spritzflasche | ⑰ Doppelmuffe | ㉖ Becherglas |
| ⑧ Waage | ⑱ Stativklammer | ㉗ Spatel |
| ⑨ Trichter | ⑲ Stativ | ㉘ Glasstab |
| ⑩ Kolbenprober | ㉚ Thermometer | |

Abb. 6.5 Ausgewählte Laborgeräte. (Mit freundlicher Genehmigung vom Verlag Schroedel [13])

Praktikum Umgang mit dem Gasbrenner

Bei Versuchen im Chemieunterricht müssen häufig Stoffe erhitzt werden. Man verwendet dazu Gasbrenner für Erdgas oder Propangas. Nur wenn man ihre Handhabung kennt, kann man gefahrlos mit ihnen umgehen.

Versuch 1: „Führerschein“ für den Gasbrenner



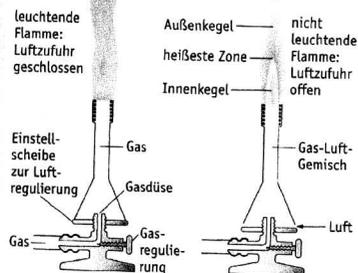
Materialien: Gasbrenner.

Durchführung:

Vorbereitung

1. Stelle den Gasbrenner kippicher auf eine feuerfeste Unterlage.
2. Schließe den Gasschlauch des Brenners an die Gaszuleitung des Tisches an.
3. Schließe die Gaszufuhr und die Luftzufuhr des Brenners.

Achtung: Binde lange Haare zusammen und trage immer eine Schutzbrille. Der Gasbrenner darf während der Arbeit nicht unbeaufsichtigt bleiben.



Inbetriebnahme und Einstellung des Gasbrenners

1. Öffne das Ventil an der Gaszuleitung und dann die Gaszufuhr am Brenner. Entzünde das ausströmende Gas. Arbeite zügig, aber ohne Hektik!
2. Verändere die Höhe der Gasflamme mit der Gasregulierschraube am Brenner, bis die Flamme kräftig gelb leuchtet.
3. Öffne danach die Luftzufuhr, bis du eine blaue nicht leuchtende Flamme erhältst.
4. Die Höhe der Brennerflamme soll der Breite deiner Hand entsprechen. Arbeite nur mit der blauen, aber noch nicht rauschenden Brennerflamme.
5. Um den Brenner zu löschen, schließt du das Ventil an der Gaszufuhr des Brenners.
6. Wiederhole den Ablauf, bis du ihn sicher im Griff hast. Dann hast du den Gasbrenner-Führerschein.

Versuch 2:

Untersuchung der Brennerflamme



Materialien: Gasbrenner, Magnesiastäbchen.

Durchführung:

1. Entzünde den Gasbrenner und stelle eine blaue noch leicht rauschende Flamme ein. Die Flamme besteht aus einem inneren hellblauen und aus einem äußeren dunkelblauen Kegel.
2. Untersuche mithilfe eines Magnesiastäbchens die beiden Flammenkegel. Halte das Stäbchen zunächst einige Zeit ruhig in den inneren Kegel. Ziehe es dann langsam von unten nach oben durch die Flamme.

Aufgaben:

- a) Beschreibe deine Beobachtungen.
- b) Erkläre, wo die heißeste Zone der Flamme ist. Achte besonders auf die Ränder der Flamme und auf den Übergang vom inneren zum äußeren Flammenkegel.

Versuch 3:

Schmelzen von Glas



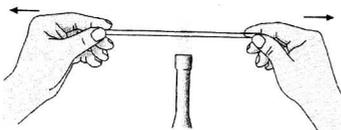
Materialien: Gasbrenner, Glasrohr (etwa 30 cm).

Durchführung:

1. Halte das Glasrohr an beiden Enden fest und erhitze es in der Mitte oberhalb des inneren Flammenkegels. Das Glasrohr soll dabei gleichmäßig gedreht werden.
2. Sobald das Glas anfängt, weich zu werden, ziehe beide Enden außerhalb der Flamme zügig auseinander.
3. Schmilz ein weiteres Glasrohr an einem Ende zu. Drehe es dabei und erhitze das Ende so lange, bis das Glas rot glühend ist.

Aufgabe:

Beschreibe deine Beobachtungen.



6.1.5 Sicherheit und Entsorgung

Es ist selbstverständlich, dass es beim Experimentieren zu Ausbildungszwecken keine Unfälle geben darf, dass Fahrlässigkeiten oder zumindest grobe Fahrlässigkeiten ausgeschlossen werden: Laborleiter und Lehrer können dem Vorwurf der groben Fahrlässigkeit dadurch entgehen, dass sie alle Praktikanten laut und deutlich auf Gefahren hinweisen oder konkrete Sicherheitsmaßnahmen anordnen. Eine gute fachliche und praktisch-experimentelle Ausbildung der Chemielehrer und Lehrerinnen an Universitäten und Seminaren ist die beste Gewährleistung für sachgerechtes und unfallfreies Experimentieren. Außerdem müssen sie mit Sammlung und *Sicherheitseinrichtungen* ihrer Schule bzw. des Labors vertraut sein, den Platz und Gebrauch von Feuerlöschern, Feuerlöschdecke, Löschsand, Notdusche und Verbandkasten kennen. Sie haben sich ebenfalls davon zu überzeugen, dass eine vorschriftsmäßige Kennzeichnung von Standflaschen und die sachgerechte *Entsorgung* von Abfällen und Restchemikalien gewährleistet sind – andernfalls müssen sie die Voraussetzungen dafür schaffen. Des Weiteren ist zu überprüfen, ob sich für gefährliche Substanzen geeignete Ersatzstoffe finden lassen und wie diese im Experiment tatsächlich reagieren.

Einheitlich für alle Bundesländer ist die „*Verordnung über gefährliche Stoffe*“ (Gefahrstoffverordnung, GefStoffV): Sie legt insbesondere die Auszeichnung der Chemikaliengefäße mit den bekannten Gefahrensymbolen fest, mit Gefahrenhinweisen und Sicherheitsratschlägen (R- und S-Sätze). Die TRGS 450 regelt darüber hinaus den „*Umgang mit Gefahrstoffen im Schulbereich*“. Aus deren Anlagen geht hervor, dass folgende Substanzen zwar im Lehrereperiment, aber nicht für Schülerexperimente eingesetzt werden dürfen:

- Sehr giftige Stoffe wie Kohlenstoffdisulfid (Schwefelkohlenstoff), Nitrobenzol, Tetrachlormethan (Tetrachlorkohlenstoff), weißer Phosphor, Kaliumcyanid etc.
- Krebs erzeugende oder fruchtschädigende Stoffe wie Benzol, Nickel, Cobalt, Chrom(VI)-Verbindungen in Form von Stäuben, 1,2-Dibrommethan etc.
- Explosionsgefährliche Stoffe wie Sprengmittel, Schwarzpulver, Mischungen von oxidierbaren Substanzen mit Kalium- oder Natriumchlorat, Pikrinsäure etc.
- Stoffgemische, die Krankheitserreger enthalten, wie pathogene Bakterien- und Pilzkulturen, fäkalen Abwässer u. a.

Im Rahmen einer UN-Konferenz wurde 1992 das neue *Global Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals* verabredet (siehe Grafik am Ende des Vorworts). Diese neuen GHS-Gefahrensymbole gelten weltweit und ersetzen die in den einzelnen Ländern üblichen Symbole. In Universitäten und Schulen sind Chemikaliengefäße und Vorratsflaschen dementsprechend zu kennzeichnen, Arbeitsvorschriften für Experimente müssen entsprechende Sicherheitshinweise enthalten. Auch die Experimentieranleitungen dieses Buches enthalten jeweils eine Sicherheitsleiste mit Gefahrstoffsymbolen zur kurzen Information über mögliche Gefahren.

Abb. 6.6 Praktikum zum Umgang mit dem Gasbrenner. (Mit freundlicher Genehmigung vom Verlag Schroedel [13])

6.1.6 Entsorgung

Заборона отхода

Die Bundesländer haben auf Grundlage der neuen Symbole spezifische Handreichungen für Dozenten und Lehrer herausgegeben – Lehrende müssen sich vor Dienstantritt mit diesen landesspezifischen Regelungen zu Gefahrstoffen und deren Entsorgung vertraut machen. Sie beginnen mit Überlegungen, wie sich beim Experimentieren gefährliche oder umweltschädliche Abfälle verringern oder gar vermeiden lassen, bei welcher Durchführung von Experimenten gefährliche Abfälle erst gar nicht entstehen. Diese Überlegungen können zusammen mit den Schülern und Schülerinnen erarbeitet werden und Teil der aktiven Umwelterziehung sein. Wenn eine alternative Durchführung nicht realisiert werden kann, ist danach zu fragen, wie anfallende problematische Chemikalienreste sachgerecht zu entsorgen sind.

Zur Entsorgung können *drei Wege* unterschieden werden:

1. Umsetzung gefährlicher Stoffe in harmlose Stoffe und deren Beseitigung in das Abwasser: Beispielsweise sind Alkalimetallreste in Spiritus umzusetzen, diese Lösungen mit Wasser zu verdünnen und die verdünnten Lösungen ins Abwasser zu geben.
2. Umsetzung gefährlicher Stoffe und Beseitigung der Produkte in Sammelgefäße: Anfallende Chromat-Abfälle können etwa mit Natriumsulfit-Lösung reduziert und grünfarbene Chrom(III)-salz-Lösungen in den Schwermetallsalz-Behälter gegeben werden.
3. Beseitigung in spezifische Sammelgefäße: Beispielsweise werden Kohlenwasserstoffe getrennt von halogenierten Kohlenwasserstoffen in entsprechenden Behältern zwischengelagert und später einer Entsorgungsfirma übergeben.

Es haben sich *vier Sammelbehälter* für Laboratorien in Schulen bewährt (siehe Grafik im Vorwort):

1. Saure und alkalische Lösungen hoher Konzentration,
2. giftige anorganische Stoffe, etwa Lösungen von Schwermetallsalzen,
3. halogenfreie organische Stoffe, etwa Benzin oder Toluol,
4. halogenhaltige organische Stoffe, etwa Dibromethan oder Bromtoluol.

Sammelbehälter 1 kann nach Neutralisation des Gemischs und starker Verdünnung in das Abwasser entsorgt werden. Gefüllte Sammelbehälter 2–4 sind von Zeit zu Zeit einer Entsorgungsstelle zuzuführen, die durch den Schulträger nachzuweisen ist.

6.2 Vermittlungsprozesse: Funktionen, Auswahlkriterien und Formen des Experiments

Die beschriebenen fachwissenschaftlichen Funktionen des Experiments entsprechen auch fachdidaktischen Funktionen, etwa die Erkenntnisgewinnung durch das

Aufstellen und Prüfen von Hypothesen. So können Sachverhalte, die Schülern unbekannt sind, durch sie „nachentdeckt“ werden – sie lernen dabei die naturwissenschaftliche Erkenntnis-methode kennen. Dieses „*entdeckende Lernen*“ verlangt das Aufstellen von Hypothesen, die Ableitung von Einzelfällen und deren Prüfung durch Planen, Durchführen und Auswerten von Experimenten. Eine detaillierte Beschreibung des „forschend-entwickelnden Unterrichtsverfahrens“ ist bei Schmidkunz-Lindemann [14] zu erarbeiten. Es gibt allerdings auch weitere Funktionen des Experiments im Chemieunterricht.

6.2.1 Funktionen des Experiments

Für den Chemieunterricht diskutiert man Funktionen des Experiments, die keine Entsprechung in der Fachwissenschaft aufweisen, etwa zur Motivation, zur Veranschaulichung, zur Wiederholung, zur Simulation technischer Verfahren, zum Nachvollziehen historischer Versuche. Sie werden exemplarisch durch *Experimente der Thematik „Alkalimetalle und Metallhydroxide“* anschaulich.

6.2.1.1 Einstieg und sachbezogene Motivation

V6.11 Natriumhydroxid auf der Waage

Schüler und Schülerinnen kennen die Waage aus dem täglichen Leben: Sie wiegen sich selbst auf der Personenwaage, wiegen mit der Briefwaage eine Postsendung oder mit der Balkenwaage zwei Kilogramm Apfelsinen auf dem Markt. Immer aber bleibt die Masse der zu wiegenden Portion während des Wiegeprozesses konstant.

Gibt man allerdings auf ein Uhrglas 20–30 Natriumhydroxid-Perlen und wiegt sie auf der Digitalwaage, dann stellt man seltsamerweise fest, dass die Masse mit der Zeit ständig ansteigt. Diese Erscheinung kennen die Jugendlichen nicht und sind durch den kognitiven Konflikt motiviert, dieses Phänomen zu diskutieren und zu erklären (Kap. 3).

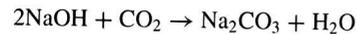
Da nur die Luft von außen hinzutritt und die Perlen seltsam feucht zu glänzen beginnen, kann der Beobachter auf den Wasserdampf aus der Luft schließen und seine Vermutung mit einem Experiment klären: Er löst Natriumhydroxid in Wasser und erkennt, dass dieses Salz nicht nur gut löslich ist, sondern mit Wasser auch stark exotherm reagiert: $\text{Na}^+\text{OH}^- \rightarrow \text{aq} \rightarrow \text{Na}^+(\text{aq}) + \text{OH}^-(\text{aq})$. Allerdings gibt es weitere Gase in der Luft, die für die Massenzunahme der Perlen verantwortlich sein können.

6.2.1.2 Wecken einer Fragestellung

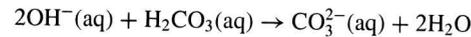
V6.12 Reaktionen von Natriumhydroxid mit Bestandteilen der Luft

Man teilt den Schülern und Schülerinnen mit, dass auch trockene Luft mit dem Natriumhydroxid reagiert. Welches Gas aus der trockenen Luft ist für einen Massenanstieg verantwortlich, der in V6.11 (Abschn. 6.6) beobachtet wurde? Sind es Stickstoff, Sauerstoff oder Kohlenstoffdioxid – oder alle drei Hauptkomponenten

der Luft? Für die Prüfung aller drei Gase wird ein Experiment entworfen, ggf. ein Kolbenprober mit den reinen Gasen gefüllt und zur Reaktion mit festem Natriumhydroxid im angeschlossenen Reagenzglas gebracht. Überraschenderweise reagiert nur das letztgenannte Gas, im Experiment ist eine deutliche Volumenabnahme zu erkennen:



bzw.



6.2.1.3 Überprüfen von Hypothesen

V6.13 Reaktionen von Natronlauge mit Kohlenstoffdioxid

Wenn sowohl reines Wasser als auch Kohlenstoffdioxid mit Natriumhydroxid reagiert, dann müsste die Natriumhydroxid-Lösung mit dem Gas ebenfalls reagieren. Insbesondere ergibt sich die Hypothese, dass eine hochkonzentrierte Natronlauge ein größeres Volumen an Kohlenstoffdioxid löst als das gleiche Volumen einer weniger konzentrierten Lösung. Eine Apparatur wird wiederum mithilfe des Kolbenprobers entworfen, die Hypothese wird geprüft. Vom Sammeln erster Erfahrungen mit festem Natriumhydroxid auf der Waage (V6.11) über die Feststellung, dass das Gas Kohlenstoffdioxid ebenfalls erkennbar mit festem Natriumhydroxid reagiert (V6.12), werden diese Erkenntnisse in einen Zusammenhang gebracht, daraus die Hypothese abgeleitet und experimentell geprüft.

Das Ergebnis nach der Durchführung ist, dass 5 mL einer konzentrierten, etwa 10-molaren Lösung die gesamte Gasmenge von 50 mL Kohlenstoffdioxid im Kolbenprober absorbiert, dass 5 mL der 1 : 10 verdünnten 1-molaren Lösung unter Absorption eines kleineren Volumens reagiert, dass 5 mL der 0,1-molaren Lösung nur eine sehr kleine Gasmenge aufnimmt. Die Hypothese wird damit bestätigt.

6.2.1.4 Sammeln von Daten

V6.14 pH-Werte und Konzentrationen von Natriumhydroxid-Lösungen

Um etwa zu messen, welche pH-Werte für die bei V6.13 (Abschn. 6.2.1.3, 6.6) verwendeten Lösungen gelten, kann man für die erste grobe Einschätzung zunächst das Universalindikatorpapier verwenden, danach ein pH-Meter für den alkalischen Bereich eichen und genaue Werte messen. Da die hochkonzentrierte Lösung für Messungen ungeeignet ist, beschränkt man sich auf die 1-molare und 0,1-molare Lösung: Man misst die pH-Werte 14 und 13 und stellt sie ggf. in den Zusammenhang mit den Konzentrationen an Hydroxid-Ionen.

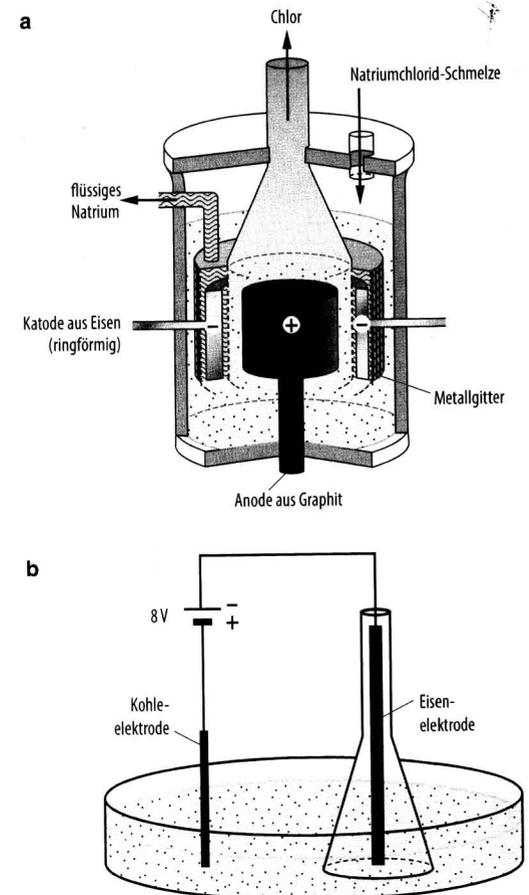
Es können weitere Daten von Lösungen aus Küche, Bad und Garage untersucht bzw. pH-Werte von Lösungen aus der Lebenswelt recherchiert werden. Sie beginnen bei pH 0 der Batteriesäure einer Autobatterie und enden mit pH 13 eines Abflussreinigers (Natriumhydroxid-Lösung).

6.2.1.5 Veranschaulichen eines theoretischen Zusammenhangs

V6.15 Verdünnungsreihe zur Veranschaulichung von pH-Werten

Die in V6.14 (Abschn. 6.2.1.4, 6.6) erhaltenen pH-Werte können die Lernenden nicht ohne Weiteres einordnen und mit der Konzentration der $\text{OH}^-(\text{aq})$ -Ionen in der Lösung korrelieren. Um diesen Zusammenhang anschaulich zu machen, wird eine 1-molare Natronlauge-Lösung vorgegeben, die Konzentration der $\text{OH}^-(\text{aq})$ -Ionen mit $c = 1 \text{ mol/L}$ bzw. 10^0 mol/L festgelegt und über das Ionenprodukt der pH-Wert 14 zugeordnet. Diese Lösung wird um die Faktoren 1 : 10, 1 : 100 und 1 : 1000 verdünnt, pH-Werte 13, 12 und 11 werden gemessen und die Konzentrationen der $\text{OH}^-(\text{aq})$ -Ionen mit $c = 10^{-1}$ bzw. 10^{-2} bzw. 10^{-3} mol/L abgeleitet. Damit wird deutlich, dass der pH-Wert um eine Einheit steigt oder fällt, wenn sich die Konzentration der Lösungen um den Faktor 10 verändert.

Abb. 6.7 a Downs-Zelle zur Herstellung von Natrium [15], b Schulversuch zur Lithiumgewinnung



Dieselbe Messreihe kann mit einer 1-molaren Salzsäure-Lösung durchgeführt werden: Die pH-Werte 0, 1, 2 und 3 sind zu messen, Konzentrationen der $H^+(aq)$ -Ionen mit $c = 10^0 = 1$ bzw. 10^{-1} bzw. 10^{-2} bzw. 10^{-3} mol/L abzuleiten.

6.2.1.6 Simulieren technischer Verfahren

V6.16 Die Gewinnung von Natrium

In einer speziellen Schmelzflusselektrolyse-Apparatur (Downs-Zelle) werden industriell die reinen Alkalimetalle hergestellt, insbesondere Natrium aus reinem Natriumchlorid: $2Na^+Cl^- \rightarrow 2Na + Cl_2$. Dabei sind zylindrische Metallgitter notwendig, um eine Vermischung und Reaktion von entstehendem Natrium und Chlor zu verhindern (Abb. 6.7a).

In Schulversuchen können ebenfalls Alkalimetalle aus Salzschmelzen gewonnen werden. Im vorliegenden Experiment wird Lithium aus Lithiumchlorid hergestellt, dem zur Erniedrigung der Schmelztemperatur etwa 30 % Kaliumchlorid beigemischt sind. Das Vermischen und Reagieren beider entstehender Elemente Lithium und Chlor ist zu verhindern, indem man Plus- und Minuspol der Elektrolyse-Anordnung durch einen Trichter trennt (Abb. 6.7b).

6.2.1.7 Nachvollziehen historischer Experimente

V6.17 Elementaranalyse nach Liebig

Bei dieser Analyse werden bestimmte Portionen organischer Substanzen mit Sauerstoff zur Reaktion gebracht, die gasförmigen Verbrennungsprodukte Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf quantitativ in zwei Absorptionsbehältern bestimmt (Abb. 6.8). Natronlauge sowie Kalilauge absorbieren große Mengen des Gases Kohlenstoffdioxid (V6.13, Abschn. 6.2.1.3, 6.6) und werden bei der Verbrennungsanalyse eingesetzt. Insbesondere hat Justus von Liebig mit großem Erfolg den

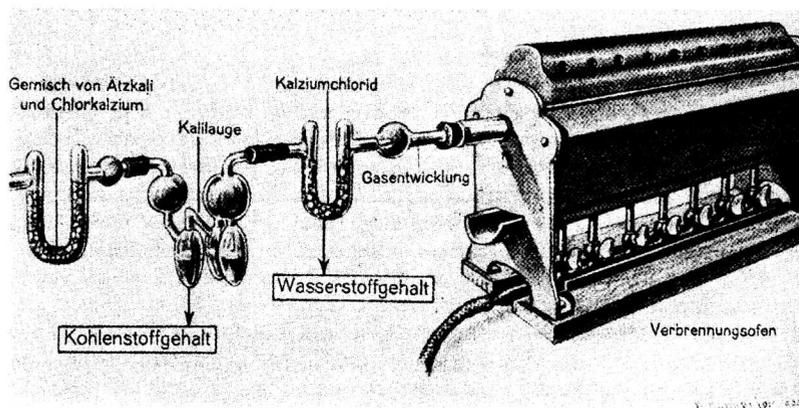
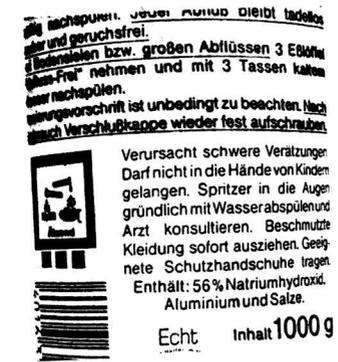


Abb. 6.8 Schema der historischen Elementaranalyse nach Liebig [16]

Abb. 6.9 Etikett eines Rohrreiners vom NaOH-Al-Typ [17]



von ihm entwickelten „Kaliapparat“ eingeführt, der gebildetes Kohlenstoffdioxid in fünf hintereinander geschalteten und halb gefüllten Glaskugeln vollständig aus dem Gasstrom absorbiert (Abb. 6.8). Eine ähnliche Apparatur kann schematisch zum Nachvollzug dieses Analyseverfahrens entworfen und demonstriert werden. Es ist darüber hinaus eine Version möglich, bei der sich das gebildete Gas Kohlenstoffdioxid im Kolbenprober quantitativ sammelt (Abschn. 6.6: V6.17).

6.2.1.8 Wiederholen und Vertiefen von Sachverhalten

V6.18 Reaktion von Rohrreinigern des „NaOH-Al-Typs“

Um behandelte Sachverhalte zu Alkalimetallhydroxiden und Laugen sinnvoll zu wiederholen und zu vertiefen, kann die Badezimmerchemikalie „Rohrreiner“ vorgestellt und untersucht werden. Bereits das Lesen des Etiketts (Abb. 6.9) verrät die Inhaltsstoffe Natriumhydroxid und Aluminium, die Untersuchung zeigt in der Tat das Vorliegen silberfarbener Metallsplitter neben der bekannten weißen Substanz in körniger Form. Das Zusammengeben mit Wasser führt zur stark exothermen und alkalischen Reaktion, das Hinzugeben und Auflösen von kleinen Papierschnitzeln macht die Zersetzungswirkung von heißer, konzentrierter Natronlauge anschaulich. Aluminiumsplitter sind beigemischt, um durch die Bildung der Gase Wasserstoff und Ammoniak einen „Wirbeleffekt“ zu erzeugen, der die Reinigung beschleunigt (Kap. 9).

6.2.1.9 Überprüfen des Lernerfolgs

V6.19 Reaktion von Erdalkalimetallen mit Wasser

Es kann zum Lernerfolg geprüft werden, inwieweit die Schüler die bekannten Reaktionen der Alkalimetalle mit Wasser auf ähnliche Reaktionen von Magnesium und Calcium mit Wasser zu übertragen vermögen. Die Bildung von Hydroxid-Lösungen und Wasserstoff ist bekannt, allerdings fallen auch feste Hydroxide in Form von Suspensionen an. Zur Formulierung der Reaktionssymbole ist die Zusammensetzung der Erdalkalimetallhydroxide zu vermitteln: $Ca^{2+}(OH^-)_2$ bzw.

$\text{Mg}^{2+}(\text{OH}^-)_2$. Falls die Voraussetzungen vorhanden sind, können die entsprechenden Redoxreaktionen abgeleitet und mit Elektronenübergängen interpretiert werden: $\text{Ca} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq}) + \text{H}_2$.

6.2.1.10 Einüben experimenteller Fertigkeiten

V6.20 Schülerexperimente zur Lithium-Wasser-Reaktion

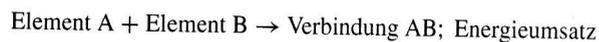
Um auch hinsichtlich der gefährlichen Alkalimetalle und ätzenden Laugen an einer Stelle Schülerexperimente realisieren zu können, ist das Experimentieren mit Lithium möglich. Es lässt sich im Gegensatz zu Natrium oder gar Kalium sicherer handhaben: Reaktionen mit Wasser sind im Becherglas gefahrlos möglich und übliche Indikatortests durchzuführen. Auch der Wasserstoff ist in einer geschlossenen Apparatur wie etwa in einem pneumatisch mit Wasser gefüllten Standzylinder zu zeigen und Knallgas zu demonstrieren (Natrium darf auf diese Weise nicht zur Reaktion gebracht werden!). Durch Messen des Wasserstoffvolumens kann sogar eine quantitative stöchiometrische Auswertung der Reaktion erfolgen: 1 mol Li-Atome + 1 mol H_2O -Moleküle \rightarrow 1 mol $\text{Li}^+(\text{aq})$ -Ionen + 1 mol $\text{OH}^-(\text{aq})$ -Ionen + 1/2 mol H_2 -Moleküle.

6.2.2 Auswahlkriterien für Experimente

Nachdem die verschiedenen Funktionen von Experimenten deutlich geworden sind, werden weitere Kriterien zur Auswahl von Experimenten im Chemieunterricht angeboten und reflektiert: Das jeweilige Experiment soll möglichst

- für die Altersstufe geeignet, d. h. motivierend und interpretierbar sein,
- auf vorhandene Kenntnisse der Schüler aufbauen,
- didaktisch „ergiebig“ sein, also einen bedeutsamen Sachverhalt der Chemie darstellen,
- auf die Gegebenheiten der Schulsammlung zugeschnitten sein,
- eine hohe Wahrscheinlichkeit des Gelingens aufweisen,
- bei der Ausführung kein Sicherheitsrisiko mit sich bringen,
- innerhalb einer angemessenen Zeitspanne durchführbar sein,
- mit einem deutlich erkennbaren Effekt beendet werden,
- als Schülerversuch einsetzbar sein.

Für den **konkreten Unterrichtssachverhalt** der chemischen Reaktion zweier Elemente zu einer Verbindung lassen sich ebenfalls Auswahlkriterien finden, etwa für ein erstes in der Schulbuchliteratur übliches Experiment (Tab. 6.2):



Tab. 6.2 Erfüllung der Kriterien 1–12 zur Auswahl eines ersten Experiments zur chemischen Reaktion zweier Elemente zu einer chemischen Verbindung

Beispiele der Schulbuchliteratur	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bildung von												
Eisensulfid		x	x	x	x	x	x		x	x	x	
Kupfersulfid		x	x	x	x	x	x		x	x	x	
Kupfersulfat-Hydrat		x	x	x	x	x	x	x	x	x		
Magnesiumoxid	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x
Calciumoxid	x	x	x	x		x	x		x	x	x	x
Natriumchlorid			x	x		x			x	x	x	x
Kaliumbromid			x	x	x	x			x	x	x	x
Aluminiumbromid			x	x	x	x	x		x	x	x	
Silberiodid		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Wasser			x	x			x	x	x	x	x	x
Kohlenstoffdioxid	x	x	x	x				x		x	x	x

1. A, B, AB sollen den Schülern möglichst aus dem Alltag bekannt sein.
2. Die Reaktion soll als Schülerversuch durchführbar sein.
3. Die Reaktion soll in brauchbarer Zeit ablaufen.
4. Der Geräteaufwand soll gering sein.
5. A, B, AB sollen sichtbar feste oder flüssige Stoffe sein.
6. A, B, AB sollen sich in den Eigenschaften deutlich unterscheiden.
7. Das Gemisch aus A und B soll gut trennbar sein.
8. AB soll in die Ausgangsstoffe zerlegbar sein.
9. Die Reaktion soll einen deutlichen Energieumsatz zeigen.
10. Sicherheitsanforderungen sollen erfüllt sein.
11. A und B sollen durch Strukturmodelle zu veranschaulichen sein.
12. AB soll durch Strukturmodelle zu veranschaulichen sein.

6.2.3 Ausführungsformen des Experiments

Die häufig verwendete Form zur Durchführung von Experimenten ist das *Demonstrationsexperiment*, das die Lehrperson den Schülern und Schülerinnen vorführt und mit ihnen auswertet. Das *Schülerexperiment* wird zwar als didaktisch wichtig und wertvoll erachtet, allerdings mit dem Argument der fehlenden Unterrichtszeit oder der fehlenden materiellen Ausstattung häufig vernachlässigt. Dennoch sollten Schülerexperimente in keinem modernen Chemieunterricht fehlen. Viele Experimente lassen sich in vereinfachter und optimierter Form erfolgreich im Unterricht einsetzen, insbesondere wenn die Experimentierfähigkeit der Schüler und Schülerinnen systematisch gefördert wird. Der anfängliche „Zeitverlust“ ist als notwendige Investition in den Kompetenzerwerb notwendig und zahlt sich später aus. Eine Mischform ist das *Schülerdemonstrationsexperiment*, das der Lehrer mit einer

Schülergruppe verabredet und mit ihr zusammen durchführt. In Tab. 6.3 sind die Experimentierformen für den Chemieunterricht zusammengefasst.

Insbesondere bei Demonstrationsexperimenten sind *Grundsätze der Gestaltpsychologie* [18] zu beachten, um für den Betrachter die Aufmerksamkeit auf das Wesentliche zu lenken und damit die Wahrnehmung zu optimieren. Beabsichtigte Beobachtungen werden so erleichtert und Auswertungen der Experimente erfolgreicher ermöglicht:

- Teile einer Apparatur sind für den Betrachter so anzuordnen, dass beteiligte Stoffe von links nach rechts fließen.
- Stativmaterial wird, so gut es geht, verdeckt und soll die Beobachtung geplanter Effekte nicht stören. Stative werden vom Betrachter aus hinter der Apparatur angeordnet.
- Es werden möglichst einfache Apparaturen ausgewählt – unnötig komplizierte und schwer durchschaubare Geräte oder Gefäße sind zu vermeiden.
- Verbindungsschläuche oder Rohre laufen möglichst glatt in waagerechter Anordnung. Substanzströme werden soweit als möglich in einer geraden Linie geführt.
- Nicht unmittelbar zum Experiment gehörende Gegenstände und Chemikalien sollen auf dem Experimentiertisch nicht stören; sie sind möglichst aus dem Blickfeld zu entfernen.
- Der geplante Effekt ist visuell, akustisch, geruchs- oder tastwirksam zu verstärken, wenn er von weitem nur ungenügend erkannt wird.

Es ist insbesondere möglich, den *Tageslichtprojektor* zur Verstärkung geplanter Effekte einzusetzen: sowohl durch eine Projektion und Vergrößerung etwa von Petrischalen und darin enthaltene Lösungen als auch durch das hellere Licht des Projektors, wenn man auf der beleuchteten Glasplatte experimentiert und damit besser ausleuchtet. Durch spezifisches Ausrichten des Spiegels kann auch mit dem

Tab. 6.3 Einige Ausführungsformen der Experimente im Unterricht

Lehrerdemonstration
Schülerdemonstration
Schülerexperiment
– arbeitsgleich
– arbeitsteilig
– selbstständig
Realexperiment
Gedankenexperiment
Medial vermitteltes Experiment
Qualitativ, quantitativ
Verschieden nach Substanzmenge:
– Makromaßstab
– Halbmikromaßstab
– Mikromaßstab

Licht des Tageslichtprojektors die Apparatur auf dem Experimentiertisch direkt beleuchtet oder auch nur der Teil der Apparatur erhellt werden, der den Effekt liefert.

Steht eine kleine *Fernsehkamera* (Schwanenhalskamera) zur Verfügung, so ist es auch möglich, einen ungenügend beobachtbaren Effekt vergrößert auf den Monitor zu übertragen oder mit dem Videodatenprojektor zu projizieren. Diese Experimentiermethode ist ebenfalls geeignet, mit kleinen Mengen an Chemikalien auszukommen: „Chemie en miniature“ [19]. Auch die Halbmikrotechnik von Häusler [20] oder die Küvettentchnik von Kometz [21] machen das Experimentieren mit geringen Substanzmengen möglich.

6.2.4 Organisatorischer Ablauf des Experimentalunterrichts

Die Vorbereitung von Experimentalunterricht im Fach Chemie sollte sich nicht auf singuläre Unterrichtsstunden beschränken. Es ist meist eine Reihe von Experimenten einer Unterrichtseinheit auf mehrere Unterrichtsstunden zu verteilen, einzelne Experimente sind am Tag vor dem Unterricht auszuprobieren. Folien für den Tageslichtprojektor oder Arbeitsblätter für Schülerexperimente vorzubereiten und für den Unterricht zu vervielfältigen. Die einzelnen Schritte der Vorbereitung lassen sich wie in Tab. 6.4 gliedern.

6.3 Lernende: Spieltrieb und Neugierverhalten, experimentelle Fertigkeiten

Für Schüler und Schülerinnen im Alter von 10–15 Jahren kommt dem Experiment im Chemieunterricht eine besondere Bedeutung zu, da Spieltrieb und Neugierverhalten eine große Aufgeschlossenheit für Experimente erwarten lassen. Deshalb sind einfache Phänomene und Messungen wie etwa zur Dichte, Löslichkeit, Schmelz- und Siedetemperatur von Stoffen von diesen Jugendlichen hochwillkommen und zur Durchführung als Schülerversuch zu empfehlen. Oftmals besitzen ganz interessierte Schüler bereits einen käuflichen *Experimentierkasten* und kennen viele einfache Experimente: Diese Schüler und Schülerinnen fallen durch ihre Kenntnisse und experimentellen Fertigkeiten besonders auf. Es sind insbesondere die folgenden Kriterien zu reflektieren.

Erste manuelle Fertigkeiten im Umgang mit Experimentiergerät

Im Sachunterricht der Primarstufe sind erste Schülerexperimente etwa zu den Themengebieten Luft und Verbrennung oder Wasser und Lösungen durchgeführt worden, allerdings meist nicht mit Glasgeräten des chemischen Labors, sondern eher mit bekannten Gegenständen aus der Küche. Deshalb ist der sachgemäße Umgang mit Experimentiergerät und Chemikalien unter Beachtung erster Sicherheitsvorschriften zu üben, um Schritt für Schritt die Fertigkeiten für ein problemorientiertes, selbstständiges Experimentieren zu erreichen (vgl. Abb. 6.5 und 6.6 in Abschn. 6.1.4). Eine Besonderheit ist zu beachten: Jungen drängen sich gern in den

Tab. 6.4 Vorbereitung und Durchführung von Experimentalunterricht

Vorbereitung (am Tag zuvor):	Durchführen des geplanten Schülerexperiments Konzipieren des Arbeitsblatts für das Experiment Ausprobieren geplanter Demonstrationsexperimente Zeichnen einer Folie für die verwendete Apparatur Bereitstellen von Geräten und Chemikalien Vorbereiten von Sicherheitsmaßnahmen
Durchführung:	Problem stellen, Schüler diskutieren lassen Geräte (durch Schüler) erläutern und zusammensetzen Apparatur (durch Schüler) zeichnen (Tafel oder Folie) Schülern Zeit lassen, Schemata abzuzeichnen Sicherheitsmaßnahmen erläutern, durchführen Experiment (durch Schüler) realisieren Zu beobachtende Effekte deutlich machen Ablesen der Messgeräte ermöglichen Experiment deutlich beenden (Sicherheit)
Beobachtung, Messwerte:	Beobachtungen sammeln, durch Schüler formulieren Beobachtungen notieren (Tafel, zeitliche Reihenfolge) Ggf. Durchführung teilweise wiederholen Messwerte tabellarisch und/oder grafisch wiedergeben Messfehler und Fehlerquellen diskutieren
Erklärung (Auswertung):	Einzelne Beobachtungen mit Schülern auswerten Ggf. Versuchsteile (durch Schüler) wiederholen Hilfen zur Erklärung anbieten und diskutieren Auf Vorkenntnisse/bekanntere Versuche verweisen Beobachtungen erst einzeln, dann integrativ diskutieren Modellvorstellungen zum Aufbau der Stoffe entwickeln Aus den Modellen Formeln und Reaktionssymbole ableiten Versuchsprotokoll durch Schüler entwerfen Protokoll von allen Schülern ins Heft übertragen lassen Protokoll ggf. als Hausaufgabe stellen <i>Gliederung des Protokolls:</i> – Thema – Problemstellung – Durchführung – Beobachtung – Auswertung (Fehlerdiskussion)
Nachbereitung (nächste Unterrichtsstunde):	Fragen zum Experiment/Protokoll beantworten Ergänzungen ins Protokoll übertragen Auf die Problemstellung zurückkommen und das Problem abschließen Aus dem Ergebnis die neue Thematik ableiten

Vordergrund, übernehmen das Experimentieren und weisen den Mädchen die Rolle des Beobachters oder des Protokollanten zu. Lehrpersonen sollten einen Ausgleich versuchen oder in getrennten Gruppen experimentieren lassen.

Die Gewöhnung an genaues Beobachten

Bisher zufälliges Hinschauen ist nach und nach zu ändern zugunsten eines gezielten Beobachtens, das bereits bei der Planung des Experiments festzulegen ist. Bei quantitativen Messungen sind Messgrößen und Einheiten deutlich zu machen, Messgerä-

te besonders anschaulich vorzustellen und sorgfältig zu demonstrieren, bevor sie bei Schülern und Schülerinnen im selbstständigen Experiment zum Einsatz kommen: der sachgemäße Umgang mit Digitalwaagen ist beispielsweise zunächst zu erläutern, ehe sie durch Lernende selbständig beim Experimentieren verwendet werden.

Das Protokollieren von Denkschritten

Die Fähigkeiten zum Experimentieren werden optimiert, wenn Schüler und Schülerinnen zunächst einfache Protokolle im Unterricht vor Ort oder als Hausaufgabe erstellen. Es wird nicht nur die logische Abfolge der Einzelschritte beim Experimentieren reflektiert und bis zur Routine erlernt, sondern Messwerte können zusätzlich in Tabellenform oder durch grafische Darstellungen wiedergegeben werden. Die letztgenannte Aufgabe ist für den Anfänger besonders schwierig und an ersten Messreihen zu üben, etwa bei der Aufnahme von Temperaturen eines Schmelz- oder Siedevorgangs in Abhängigkeit von der Energiezufuhr. Die Vorstrukturierung der Daten durch kompakte Tabellen und die weitere Übertragung der Daten in grafische Darstellungen müssen an Beispielen mit ansteigender Komplexität erarbeitet und geübt werden. Sie können schließlich mit Computern und passenden Programmen am Bildschirm erstellt und ausgedruckt werden.

6.4 Gesellschaftliche Bezugfelder: Experimente zu Alltag und Umwelt

Schüler und Schülerinnen kennen Substanzen und deren Umwandlungen aus Alltag und Lebenswelt, sie wissen – etwa durch Fragen zur Sortierung und Behandlung des Hausmülls – um die Gefährdung der Umwelt durch problematische Stoffe. Deshalb sind bezüglich gesellschaftlicher Bezugfelder folgende Reflexionen inhaltlicher und handlungsorientierter Art nötig und sinnvoll:

- *Experimente zu Fragen des Umweltschutzes:* Sobald mit der Behandlung einer bestimmten Thematik (etwa Luft, Wasser, Erdboden, Ökologie) die Problematik des Umweltschutzes tangiert wird, sollten diesbezüglich mögliche Experimente demonstriert und diskutiert werden. So konnte Eleni Daoutsali [22] einen geplanten Unterricht zum Autokatalysator, der sowohl Realexperimente mit einem Abgaskatalysator als auch Modellexperimente zur Katalyse des Kohlenstoffmonoxids am Modell-Platinkatalysator zum Inhalt hatte, positiv evaluieren [22].
- Auch hinsichtlich einer praxisnahen *Umwelterziehung* können zur Planung und Durchführung von Experimenten mit den Lernenden gemeinsam Wege reflektiert werden, auf denen möglichst keine Schadstoffe entstehen (bei der Wahl einer Fällungsreaktion keine Bleisalze wie etwa das gelbe Bleiiodid fällen) oder die Entsorgung von Schadstoffen unproblematisch ist (Neutralisieren und Verdünnen von sauren oder alkalischen Lösungen vor deren Entsorgung in das Abwasser).
- *Experimente und Modelle zu Treibhauseffekt und Ozonproblematik:* Die gegenwärtige Diskussion des Klimawandels hat auch Schüler und Schülerinnen er-

reicht. Es erscheint deshalb dringend erforderlich, diese Bedrohung der Menschheit zu diskutieren und möglichst die bekannten Experimente zum Treibhauseffekt zu demonstrieren bzw. mit schwingungsfähigen Molekülmodellen zu zeigen, wie die Energieaufnahme durch die Moleküle der Treibhausgase stattfindet. Insbesondere hat Nina Harsch durch ihr Unterrichtskonzept gezeigt, dass erfolgreiches Unterrichten zu Treibhauseffekt und Ozonproblematik möglich ist [23, 24].

- *Experimente zur Anwendung in Alltag und Technik:* Sobald von einem Experiment ausgehend ein Alltagsbezug möglich ist, sollte dieser hergestellt oder zur sachbezogenen Motivierung aufgezeigt werden. Falls am Schulort die industrielle Herstellung bestimmter Stoffe stattfindet (Zucker aus Rüben, Düngesalze aus dem Bergwerk, Metalle durch Elektrolyse, Lebensmittel wie Fisch- oder Gemüsekonserven, etc.) oder eine andere chemische Industrie präsent ist, sollten sich passende Experimente auch auf diese Techniken beziehen und damit enge Verknüpfungen mit der Chemie in Alltag und Technik vor Ort ausweisen (Kap. 9). Hierzu gehören auch Betriebsbesichtigungen beispielsweise zur Trinkwassergewinnung, Abwasserklärung oder Müllverwertung.
- *Exkursionen und Betriebserkundungen:* Sie geben den Schülern und Schülerinnen Einblicke in Probleme der wechselseitigen Beeinflussung von Laborexperiment und technischer Realisierung im Großmaßstab (beispielsweise Weindestillation im Unterricht und großtechnische Produktion von Branntwein, galvanische Zelle im Unterricht und großtechnische Herstellung verschiedener Batterietypen, Elektrolyse im Unterricht und industrielle Aluminiumgewinnung).
- *Historische experimentelle Entwicklungen für die Gesellschaft:* Schülerinnen und Schüler sollen erfahren, welche große Bedeutung die Herstellungsverfahren vieler Stoffe auf das gesellschaftliche Leben hatten (Steinzeit, Bronze-, Eisen-, Silicium-Zeitalter) oder inwieweit bestimmte Stoffgruppen das gesellschaftliche Leben verändert haben (Liebig's Forschungen und die Bedeutung mineralischer Düngemittel für Landwirtschaft und Lebensmittelproduktion, Brennstoffe und Destillation von Erdöl, Entwicklung von Kunststoffen, Textilien, Medikamenten, Farbstoffen, Baumaterialien etc.).
In bestimmter Weise war auch der „Krieg Vater vieler Dinge“ und hat die Entwicklung bzw. Herstellung mancher Stoffe beschleunigt: Erfindung des Schwarzpulvers im Mittelalter durch die Chinesen und resultierende Feuerwaffen, Zucker aus Rüben nach der Kontinentalsperre durch Napoleon und damit der Einfuhrsperre von Zuckerrohr aus Übersee, Ammoniak- und Nitrat-Synthese zur Herstellung von großen Sprengmittelmengen für den Ersten Weltkrieg, synthetisches Benzin und Kautschuk zur Kriegsführung im Zweiten Weltkrieg, Entwicklung von kernwaffenfähigem Uran und Abwurf erster Atombomben am Ende des Zweiten Weltkriegs. Solche Zusammenhänge sollten im Unterricht nicht unterschlagen werden, vielmehr kann deren Kenntnis bei den Jugendlichen dazu beitragen, auch andere kriegsbedingte, bedrohliche Entwicklungen zu erkennen, zu diskutieren und ihr politisches Handeln darauf auszurichten.
- *Gruppendynamische Prozesse bei der Lösung experimenteller Aufgaben:* Durch die Arbeitsteilung beim Experimentieren in Schülergruppen werden soziales

Verhalten der Gruppenmitglieder, gemeinsame Interessen bzw. Abstimmungen innerhalb der Gruppe und Rücksichtnahme des Einzelnen zugunsten der Gruppenziele gefördert. Insbesondere die gemeinsame Abstimmung zwischen Jungen und Mädchen in einer Experimentiergruppe kann deren Zusammenarbeit positiv beeinflussen und etwaige Vorbehalte abbauen. Schließlich ist es auch die Sicherheit beim Experimentieren, die die Diskussion in der Gruppe beansprucht, den umweltbewussten Umgang mit Chemikalien fördert und damit Umweltbewusstsein und Fähigkeiten zum umweltgerechten Handeln erweitert.

- *Ausstellungen experimenteller Ergebnisse von Schülergruppen:* Werden etwa eigene Untersuchungsergebnisse von Qualitäten der Luft, des Erdbodens oder des Fluss- bzw. des Trinkwassers im Wohnort durch Plakate veröffentlicht, so können sich sachbezogene Diskussionen der „Experten“ mit den Mitschülern anschließen, können sich Kontakte zu schulfremden Besuchern und zu anderen Gesellschaftsgruppen anbahnen. Auch das Programm „Jugend forscht“ führt zur Öffnung des Chemieunterrichts in unsere Gesellschaft und zu einer großen Anerkennung von erstaunlichen Leistungen einzelner Schüler und Schülerinnen. Diese Formen der Erziehung zu Kompetenz, zu Kritikfähigkeit und demokratischer Aufgeschlossenheit unserer Jugendlichen ist ein sehr lohnendes Ziel des Chemieunterrichts!

6.5 Übungsaufgaben

A6.1

Experimente erfüllen in der Chemie und im Chemieunterricht bestimmte Funktionen. Erläutern Sie jeweils drei Funktionen zur Fachwissenschaft Chemie und zum Chemieunterricht mit je einem Beispiel. Skizzieren Sie für den Chemieunterricht die Funktion eines Experiments hinsichtlich eines Unterrichtszusammenhangs Ihrer Wahl.

A6.2

Die Hypothesenprüfung dient sowohl zur Erkenntnis in der Fachwissenschaft als auch zur Erkenntnis im Chemieunterricht. Beschreiben Sie eine historische Hypothese der Naturwissenschaften und deren Prüfung. Entwerfen Sie eine Situation im Chemieunterricht, die zu einer Hypothese führt, skizzieren Sie mögliche Experimente zu deren Prüfung.

A6.3

Zur Durchführung von Schülerexperimenten im Chemieunterricht sind arbeitsgleiche und arbeitsteilige Formen des Experimentierens üblich. Erläutern Sie jeweils drei unterrichtliche Beispiele Ihrer Wahl. Entwerfen Sie für eine Form des Experimentierens ein Arbeitsblatt für die Lernenden.

A6.4

Eine besondere Bedeutung haben Experimente zu quantitativen Messungen. Nennen Sie fünf für den Chemieunterricht geeignete Messgeräte und die zugehörigen Größen zur Messwerterfassung mit Beispielen. Beschreiben oder zeichnen Sie diesbezügliche Experimentieranordnungen.

A6.5

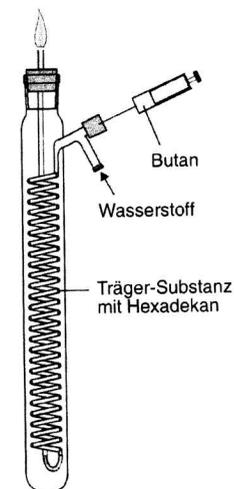
Sicherheitsmaßnahmen und Entsorgung spielen für einen Experimentalunterricht eine große Rolle. Nennen Sie fünf wichtige Maßnahmen zur Sicherheit jeweils am Beispiel eines Schulexperiments. Beschreiben Sie wichtige Entsorgungsmaßnahmen und führen Sie wesentliche Sammelbehälter für Chemikalienreste auf.

6.6 Praktikum**V6.1 Gaschromatografie im Schulversuch****Problem**

Übliche Chromatografie-Geräte der Forschungslaboratorien sind geschlossene Apparaturen, in die man nicht hineinschauen kann (Black Boxes). Zur Veranschaulichung des Analyseverfahrens ist es deshalb didaktisch sinnvoll, eine Apparatur zu demonstrieren, die durch Verwendung eines gläsernen Schlangenkühlers alle Funktionen offen zeigt (siehe Bild). Mit der vorgestellten Apparatur lassen sich etwa Propan und die beiden Isomere des Butans aus dem Campinggasgemisch trennen und nacheinander durch leuchtende Flammen anzeigen.

**Material**

Gaschromatograf, Glasspitze, Gasspritze (10 ml), Butangasbrenner; Wasserstoff

**Durchführung**

Der Schlangenkühler enthält Aluminiumoxid als weiße Trägersubstanz, dessen Oberfläche mit schwer flüchtigem Hexadecan ($C_{16}H_{34}$) versehen worden ist und sich deshalb zur Trennung von Kohlenwasserstoffen eignet. Wasserstoff wird angeschlossen und als Trägergas so lange hindurchgeleitet, bis die Knallgasprobe negativ verläuft. Er wird an der Glasspitze entzündet. Die Gasspritze wird mit dem Gas aus dem Butanbrenner gefüllt, 5 ml werden durch das Septum in den Strom des Wasserstoffs eingespritzt. Das Experiment wird beendet, indem der Wasserstoffstrom abgestellt wird. Vorsicht: Nach dem Abstellen mischen sich Wasserstoff und Luft und auch einige Zeit danach befindet sich noch ein Knallgas-Gemisch im Schlangenkühler!

Beobachtung

Die Wasserstoffflamme brennt unsichtbar (ggf. mit einem Stück Papier nachweisen). Etwa 30 s nach Einspritzen des Butans leuchtet die farblose Flamme hell auf und verlischt, nach kurzer Zeit leuchtet sie noch zwei Mal auf.

V6.2 Schulröntgengerät zur Kristallanalyse**Problem**

Die meisten Apparaturen zur Instrumentellen Analytik sind sehr teure Großgeräte und können in Forschungsinstituten besichtigt werden. Zur Röntgenstrukturanalyse hat die Lehrmittelindustrie ein Schulgerät entwickelt, mit dem – neben den bekannten Schattenaufnahmen – die Interferenzmuster von Einkristallen (Laue-Diagramme) oder Kristallpulvern (Debye-Scherrer-Aufnahmen) und Glanzwinkel der Kristalle (Bragg'sche Winkel) demonstriert werden können (Kap. 24).