

Publikationen in



## Biochemie der Harnsäure und Milchsäure

CLB Chemie in Labor und Biotechnik, 55. Jahrgang, Heft 10/2004

## Hirn-Doping als Unterrichtsthema

CLB Chemie in Labor und Biotechnik, 60. Jahrgang, Heft 05/2009

Vermittlung von Wertebewusstsein im Chemieunterricht

## Mutig wissenschaftliche Ergebnisse auch gegen falsche Behauptungen benennen

CLB Chemie in Labor und Biotechnik, 56. Jahrgang, Heft 09/2005

# Biochemie der Harnsäure und Milchsäure

Prof. Dr. Helmut Gebelein, Martin Holfeld und Prof. Dr. Volker Wiskamp, Universität Gießen, Kaufmännische Schule Dillenburg und Fachhochschule Darmstadt

Gesunde Ernährung und Energiebereitstellung im Körper sind interessante Themen für den Oberstufenunterricht. Im Folgenden werden zwei ausgewählte Fragen zu den komplexen Gebiet beantwortet: Welcher gesundheitliche Nachteil ist möglicherweise mit einem hohen Fleischkonsum verbunden? Wie wird bei intensivem kurzzeitigen Sporttreiben eine Versauerung des Blutes verhindert? Die Antworten erlauben eine Vertiefung des Themas Säuren/Basen/Puffer im Sinne eines Spiralcurriculums.

## Fleischkonsum, Nierensteine und Gicht

Fleisch ist als Eisen- und Eiweißlieferant ernährungsphysiologisch wertvoll. Es ist aber im Vergleich zu vielen anderen Lebensmitteln auch besonders reich an Purinderivaten (Abbildung 1), die vor allem als Ribo- und Desoxiribonukleotide oder Adenosinphosphate vorliegen.

Im menschlichen Körper werden die über die Nahrung aufgenommenen Purine überwiegend zu Harnsäure verstoffwechselt. Unter Beteiligung mehrerer Enzyme wird beispielsweise Adenosinmonophosphat zuerst zu Inosinmonophosphat hydrolysiert, von welchem dann nacheinander Phosphat und Zucker abgespalten werden. An das resultierende Hypoxanthin wird Wasser addiert und das dabei gebildete Xanthin abschließend zur Harnsäure oxidiert (Abbildung 2) [1].

### Die Autoren

Dr. Helmut Gebelein, Professor für Chemiedidaktik an der Universität Gießen, Heinrich-Buff-Ring 58, 35392 Gießen; Dr. Volker Wiskamp, Professor für Chemie an der Fachhochschule Darmstadt, Hochschulstraße 2, 64289 Darmstadt; Martin Holfeld, Chemie- und Sportlehrer an den Kaufmännischen Schulen des Lahn-Dill-Kreises, Uferstraße 22, 35683 Dillenburg

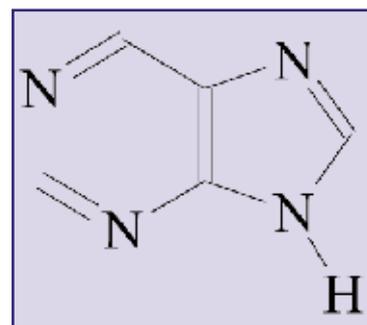
Aufgrund der Harnsäure-Bildung beim Stoffwechsel zählt Fleisch zu den säureüberschüssigen Lebensmitteln (Tabelle ). Die Harnsäure wird über den Urin ausgeschieden. Sie ist allerdings nur mäßig wasserlöslich, so dass eine Kristallisation einsetzen kann, vor allem, wenn die Körperflüssigkeiten krankheits- oder ernährungsbedingt zu sauer sind. In der Niere können sich dann „Steine“ bilden. Besonders schmerzhaft ist die Ablagerung von Harnsäure in den Gelenken (Gicht). Früher hat man Gicht auch als „die Krankheit der Reichen“ bezeichnet, weil sie das Geld hatten, sich mit einer großen Mengen an Fleisch zu ernähren. Eine fleischarme und basenüberschüssige Ernährung kann derartigen gesundheitlichen Problemen vorbeugen.

In einem Versuch können Schüler das Lösungsverhalten von Harnsäure bei verschiedenen pH-Werten vergleichen: Im alkalischen Medium (Natronlauge) ist der Stoff unter Salzbildung (dissoziiertes Anion und Kation) gut löslich; bei anschließender Zugabe überschüssiger Salzsäure wird das Ureat protoniert, und die schlecht wasserlösliche Harnsäure (kovalente Verbindung) fällt aus. (Der Versuch ähnelt sehr dem Experiment „Lösen von Benzoesäure in Natronlauge zu Natriumbenzoat/Fällen von Benzoesäure durch Ansäuern der Benzoatlösung mit Salzsäure“, der zum Grundcurriculum des Oberstufenunterrichts gehört.)

## Respiratorische Kompensation einer Milchsäure-Acidose

Aus dem Sportunterricht kennen die Schüler den Unterschied zwischen der aeroben Energiebereitstellung, z. B. bei einem Langstreckenlauf, und der anaeroben

Abbildung 1:  
Grundgerüst der Purine



Nahrungsmittel	Potentielle Renale Säurebelastung (in mEq/100g)
<b>Säureüberschüssig:</b>	
mageres Schweinefleisch	2,9
Walnüsse	6,8
Weißbrot	3,7
Weizenmehl	6,9
Eigelb	23,4
Quark	11,1
<b>Basenüberschüssig:</b>	
Kartoffeln	-4,0
Sellerie	-5,2
Spinat	-14,0
Radieschen	-3,7
Blattsalate	-2,5
Apfelsinen	-2,7
Ananas	-2,7
Zitronen	-2,5

Tabelle : Säure- und basenüberschüssige Nahrungsmittel [2] (Definition: Jedes Nahrungsmittel enthält eine bestimmte Menge an Säure- und Basenresten, die im Körper eine bestimmte Menge Salz bilden. Bleiben danach Säuren übrig, spricht man von säureüberschüssiger Nahrung, bleiben Basen übrig, so handelt es sich um basenüberschüssige Nahrung.)

Energiebereitstellung, z. B. bei einem 100-Meter-Sprint.

- Aerobere Glucosestoffwechsel:  
 $C_6H_{12}O_6 + 38ADP + 38P + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 44H_2O + 38ATP$
- Anaerobe Glykolyse:  
 $C_6H_{12}O_6 + 2ADP + 2P \rightarrow 2\text{Lactat} + 2H^+ + 2H_2O + 2ATP$

Der anaerobe Weg, – ausgehend vom wichtigsten Energielieferanten Glukose –, ist schnell, liefert aber nur zwei Adenosintriphosphat pro Monosaccharid. Der aerobe Weg ist viel langsamer, allerdings in Hinblick auf die ATP-Ausbeute 19mal wirkungsvoller als der anaerobe.

Bei Schnellsportarten muss die ATP-Bereitstellung rasch geschehen, und der ATP-Nachschub erfolgt deshalb fast ausschließlich anaerob (siehe Kasten s. 370). Die gebildete Milchsäure bewirkt eine pH-Wert-Senkung des Blutes, bei starker körperlicher Anstrengung sogar bis unter 6,9 (metabolische Acidose). (Der Soll-

pH-Wert des Blutes wird meist mit 7,4 angegeben; Schwankungen zwischen 7,38 und 7,42 gelten als unbedenklich.) Damit eine pH-Änderung nicht lebensbedrohlich wird, enthält das Blut Puffer, u. a. das System Kohlensäure/Hydrogencarbonat (Abbildung 3), das den Schüler aus dem Mittelstufenunterricht bekannt sein sollte (vgl. [4]).

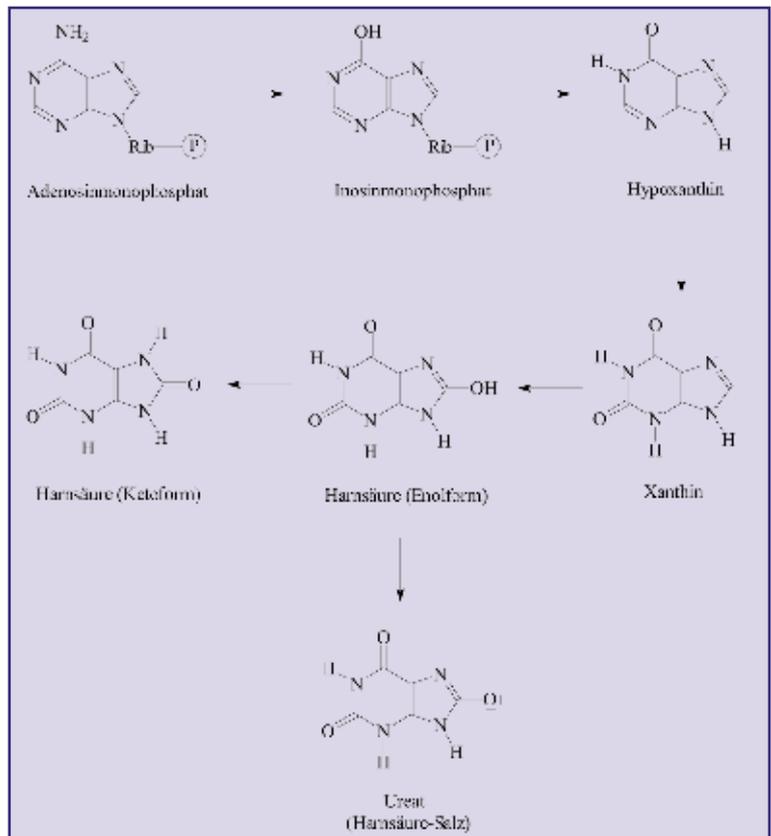


Abbildung 3: Kohlensäure/Hydrogencarbonat-Puffer

Die Protonen der Milchsäure werden zunächst durch die Pufferbase (Hydrogencarbonat) abgefangen. Dabei sinkt deren Konzentration, während die der korrespondierenden Puffersäure (Kohlensäure) im venösen Blut steigt. Nach der Hasselbalch-Henderson-Gleichung (Abbildung 3) müsste dann der pH-Wert sinken. Um dies zu vermeiden, reagiert der menschliche Körper mit einer Steigerung des Atemzeitvolumens. Der Sprinter „bekommt kaum Luft“, so dass vermehrt Kohlenstoffdioxid über die Lunge abtransportiert und deshalb dem chemischen Gleichgewicht entzogen wird, bis das ursprüngliche Verhältnis von Pufferbase und -säure wieder hergestellt ist (respiratorische Kompensation).



Abbildung 2: Purin-Abbau



Eigentlich wäre es logisch, dem Organismus den pH-Ausgleich durch den Verzehr überwiegend basenüberschüssiger Nahrungsmittel (s. Tabelle S. 379) zu erleichtern. Doch direkte Einflüsse der Nahrung auf den pH-Wert des Blutes konnten bislang nicht nachgewiesen werden. Basische Lebensmittel wirken sich bei regelmäßigem Genuss dennoch positiv auf die Pufferwirkung des Blutes aus, weil sie die Pufferkapazität erhöhen.

Eine Stabilisierung des pH-Wertes des Blutes beim Sporttreiben ist durch die Einnahme von hydrogencarbonathaltigen Basenpulvern wie Sport-Basica [5] möglich, welche die entstandene Milchsäure abfangen. Dann ist auch die Regenerationsphase nach der sportlichen Aktivität kürzer. (Basenpulver werden auch zur allgemeinen Entsäuerung des Körpers eingesetzt. Denn eine durch Krankheit oder fälsche Ernährung bedingte Übersäuerung ist gefährlich, weil sie die Kapillardurchblutung vermindert und das Risiko für einen Herzinfarkt oder Hirnschlag erhöht.)

## Experimente

### Löslichkeit von Harnsäure in Abhängigkeit vom pH-Wert

Eine Spatelspitze Harnsäure wird in ein Reagenzglas mit 2-3 ml Wasser gegeben. Es wird soviel 1 mol/l Natronlauge zugetropft, bis der Feststoff in Lösung gegangen ist (gelegentlich schütteln). Dann wird überschüssige 1 mol/l Salzsäure zugetropft, wobei die Harnsäure wieder ausfällt.

Um ATP als Energielieferant zu verstehen, sind die Zahlenwerte für die freien Enthalpien der stufenweisen Hydrolyse des Moleküls hilfreich [3]: Die Reaktion von Adenosintri-phosphat mit Wasser zu Adenosindiphosphat und Phosphat liefert  $-30,5$  kJ/mol, die von Adenosintri-phosphat mit Wasser zu Adenosinmonophosphat und Diphosphat  $-32,5$  kJ/mol. Diphosphat hydrolysiert weiter zu zwei Molekülen Phosphat, verbunden mit einer freien Enthalpie von  $-33,5$  kJ/mol. Es können also insgesamt zwei sehr energiereiche Phosphorsäureanhydrid-Bindungen konsumiert werden. Die viel weniger exergonische Hydrolyse der orthoglycosidischen P-O-C-Einheit im Adenosinmonophosphat zu Adenosin und Phosphat (ca.  $-9$  kJ/mol) spielt bei der Energieversorgung der Muskeln praktisch keine Rolle. Wenn man einen Löffel des Säureanhydrids Phosphor(V)-oxid in ein Becherglas mit Wasser gibt, bildet sich unter heftigem Zischen und Erwärmen Phosphorsäure – ein geeignetes Experiment, um Schülern ergänzend die Energie zu verdeutlichen, die in dem P-O-P-Strukturelement steckt!

### Modellversuch zur respiratorischen Kompensation einer metabolischen Acidose [6]

2,5 g Natriumhydrogencarbonat werden in einem 250-ml-Becherglas in 100 ml Wasser gelöst. Der pH-Wert der Lösung wird mit einem pH-Meter ermittelt. (Von den Autoren gemessener Wert:  $\text{pH} = 8,2$ ). Ein Modell-Blutpuffer (Hydrogencarbonat/Kohlensäure) wird hergestellt, in dem zu der magnetisch leicht gerührten Lösung 18 ml 0,1 mol/l Salzsäure und danach tropfenweise weitere Säure gegeben werden, bis der pH-Wert 7,4 beträgt. Zur Modellierung einer metabolischen Acidose werden dieser Pufferlösung 10 ml 1%ige Milchsäure zugesetzt, und der pH-Wert der Reaktionsmischung wird gemessen. (Von den Autoren gefundener Wert:  $\text{pH} = 7,2$ ) Zu Modellierung der respiratorischen Kompensation der Acidose wird 1-2 Minuten kräftig gerührt, wobei Gasblasen ( $\text{CO}_2$ ) ausgetrieben werden. Danach wird der pH-Wert erneut gemessen. (Von den Autoren gemessener Wert: Nach 2,5 Minuten ist der pH-Wert auf 7,4 gestiegen. Bei längerem Umrühren steigt er bis auf 7,6.)

### Literatur

- [1] Voet, D.; Voet, J. G.; Pratt, C. W.: Fundamentals of Biochemistry, Wiley, New York, 1999, S. 712-719
- [2] Remer, M.: Journal of american dietetic association 1995, S. 791-797
- [3] wie [1], S. 362
- [4] Asselborn, W.; Jäckel, M.; Risch, K. T. (Hrsg.): Chemie heute – Sek. II, Schroedel, Hannover, 2003, S. 125-126
- [5] Klopfer Nährmittel GmbH: Informationsblatt zu „Sport-Basica“; Ismaing, 2004; info@basica.de
- [6] Klimt, F.: Wasser- und Elektrolythaushalt, Säure/Basen-Haushalt, Skript zur Vorlesung Sportmedizin II, Institut für Sportmedizin und Motologie der Philipps-Universität Marburg/Lahn, 1984

Realisiert in Zusammenarbeit mit

Webdesign-Hofgeismar

MODERNE  
KONZEPTE  
WEBSITE  
KREATIVITÄT  
GRAFIK  
DYNAMIK

# Hirn-Doping als Unterrichtsthema

Martin Holfeld, Homberg, und Volker Wiskamp, Darmstadt

Mit „Hirndoping“ bezeichnet man Versuche, durch pharmazeutische Mittel die Leistung des Gehirns zu erhöhen. Insbesondere will man schnellere Lernfähigkeiten und eine möglichst lange Wachphase erreichen. Gerade Schüler und Studenten unterliegen in Zeiten von Prüfungsvorbereitungen der Versuchung, solche Substanzen missbräuchlich einzunehmen. Militärstrategen hingegen wünschen sich entsprechende Leistungen – und Substanzen – für Soldaten. Im Folgenden werden die gebräuchlichsten davon in chemischer Struktur und Synthese vorgestellt.

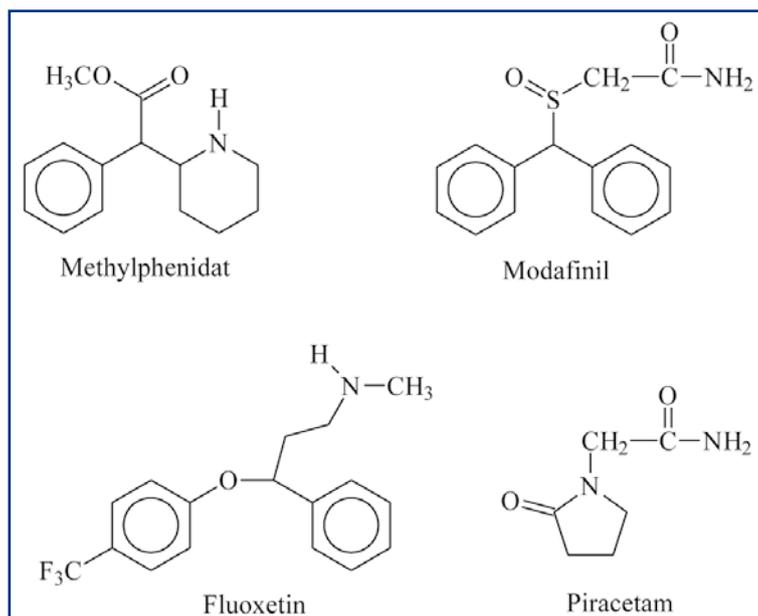
Berichte in Tageszeitungen und Journalen über Hirndoping nehmen zu (z. B. [1-3]). Und man muss nicht lange im Internet surfen, um zu dem Thema ernstgemeinte oder fiktive, auf jeden Fall aber schockierende Aussagen wie diese zu finden (hier gekürzt wiedergegeben):

- „Gerade in der Ära der Globalisierung könnten Lernpillen der Bundesrepublik helfen, im internationalen Standortwettbewerb besser zu bestehen. Deutschland ist arm an Bodenschätzen, umso wichtiger für

die Volkswirtschaft ist die geistige Leistungsfähigkeit der Nation.“ [4]

- „Bei künftigen Bewerbungsgesprächen wird dem Bewerber gesagt: Wir erwarten von unseren Angestellten vollen Einsatz, der liegt heute bei 60 bis 70 Wochenstunden. Aber wir erwarten auch, dass Sie bereit sind, Mittel zu schlucken, die Ihre Produktivität erhöhen. Wir wollen Sie nicht dazu zwingen, aber es würde vielleicht Ihre Chancen steigern, angestellt zu werden, wenn Sie dazu bereit sind.“ [5]
- „Auf einer Pressekonferenz gab die Neuropsychologin und Leibnizpreisträgerin des Jahres 2010, Rita Lien, bekannt, sie nehme seit Jahren Hirndopingmittel ein. Frau Lien bot an, den mit mehreren Millionen Euro dotierten Forschungspreis zurückzugeben. Die meisten ihrer bahnbrechenden Arbeiten seien unter dem Einfluss von Wachmachern und konzentrationsfördernden Mitteln entstanden; nur so habe sie dem ungeheuren Druck standhalten können, in immer kürzerer Zeit neue Ergebnisse produzieren und große Summen Drittmittel einwerben zu müssen. Die Forscherin entschuldigte sich bei ihren Mitarbeitern, der Universität sowie der Öffentlichkeit und erklärte ihren Rückzug aus der Wissenschaft.“ [6]

Abbildung 1: Strukturformeln der Hirn-Dopingmittel Methylphenidat, Modafinil, Fluoxetin und Piracetam.



Holfeld



Wiskamp

## Die Autoren

Dr. **Martin Holfeld**, Chemie- und Sportlehrer am Theodor-Heuss-Gymnasium in Homberg; Dr. **Volker Wiskamp**, Professor für Chemie an der Hochschule Darmstadt, Fb. Chemie und Biotechnologie.

So wie im Sport „höher – weiter – schneller“ offensichtlich ohne unerlaubte Hilfsmittel kaum noch realisierbar ist, bahnt sich auch im Arbeitsleben an, dass Spitzenleistungen besondere „Muntermacher“ erfordern, die effektiver wirken als der gesellschaftlich akzeptierte Kaffee.

Bevor wir anfangen, „Brave New World Revisited“ zu schreiben und ein Weltbild zu entwerfen, in dem die Forscher nicht mehr dem Humboldtschen Ideal anhängen, sondern Rivalen im Kampf um Ruhm und Ehre sind, in dem der Studienkommilitone kein solcher, sondern lediglich ein Konkurrent um den zukünftig raren Arbeitsplatz und in dem der Arbeitskollege kein Partner im Team ist, sondern abgehängt und als erster in die Arbeitslosigkeit geschickt werden muss, möchten wir Vorschläge unterbreiten, wie das Thema Hirn-Doping in den Chemieunterricht integriert werden kann, um dort mit jungen Erwachsenen den Wahnsinn einer sich selbst beschleunigenden Zeit zu reflektieren, sie davor zu schützen und ihnen einfach als Mentor zur Verfügung zu stehen.

Vier relativ oft zweckentfremdet verwendete pharmazeutische Wirkstoffe werden im Folgenden mit ihren Formeln (Abbildung 1), Wirkungsweisen und zwei ausgewählten Synthesen vorgestellt.

## Methylphenidat

Recht häufig wird das Arzneimittel Methylphenidat (zur Synthese siehe Abbildung 2), das vor allem unter dem Markennamen Ritalin bekannt ist, missbraucht. Therapeutisch findet es insbesondere Anwendung bei der Aufmerksamkeitsdefizit/Hyperaktivitätsstörung (ADHS). Es gibt schwache Hinweise darauf, dass Methylphenidat bei nicht kranken Menschen deren Wachheit und Konzentrationsfähigkeit fördert und in hoher Dosierung auch euphorisierend wirkt. Dies mag für manchen Schüler oder Studenten, der in kurzer Zeit eine riesige Stoffmenge für eine Klausur lernen muss, attraktiv sein. Methylphenidat ist wie die Neurotransmitter Dopamin und Noradrenalin (Abbildung 3) ein Derivat des 1-Amino-2-Phenylethans (zur Diskussion von Leitstrukturen siehe [7]) und bewirkt, dass diese länger im synaptischen Spalt – dessen Funktionsweise wird erklärt, sofern sie nicht schon aus dem Biologieunterricht bekannt ist – zwischen den einzelnen Nervenzellen verbleiben und es so zu vermehrten Signalsendungen, also höherer Hirnaktivität, kommt.

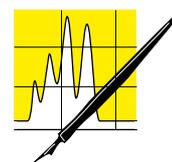
## Modafinil

Das zweite zum Hirn-Doping gerne missbrauchte Medikament ist Modafinil (zur Synthese siehe Abbildung 4), welches regulär gegen zwanghafte Schlafanfänge eingesetzt wird. Es steigert Wachheit und Aufmerksamkeit, weil es ähnlich wie Methylphenidat die Entfernung von Noradrenalin auf dem synaptischen Spalt verlangsamt. (Im Sport steht Modafinil auf der Liste

der verbotenen Substanzen. Eine prominente Doping-Sünderin war die Sprint-Weltmeisterin Kelli White.)

## Fluoxetin

Da sich in Schule, Studium und Beruf gestresste Menschen oft unglücklich fühlen, sind sie leicht versucht, Antidepressiva wie Fluoxetin, eher unter den Handelsnamen Prozac oder Fluctin bekannt, zu nehmen. Das sind Stoffe, die verhindern, dass die Wirkung von Serotonin (Abbildung 3), dem so genannten Glückshormon, zu rasch nachlässt.



AUFSÄTZE

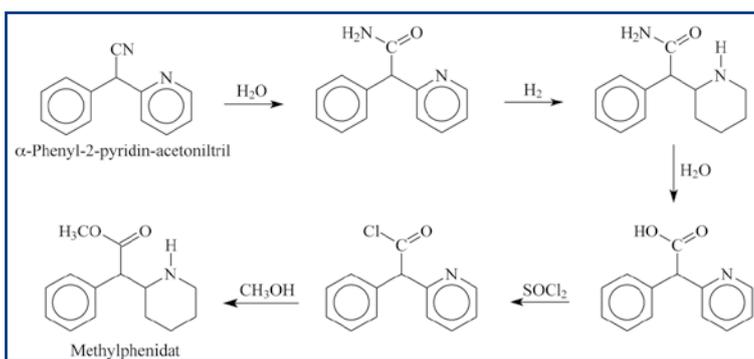


Abbildung 2: Schema zur Synthese von Methylphenidat [8].

Abbildung 3: Strukturformeln der Neurotransmitter Dopamin, Noradrenalin und Serotonin sowie ihre Leitstruktur.

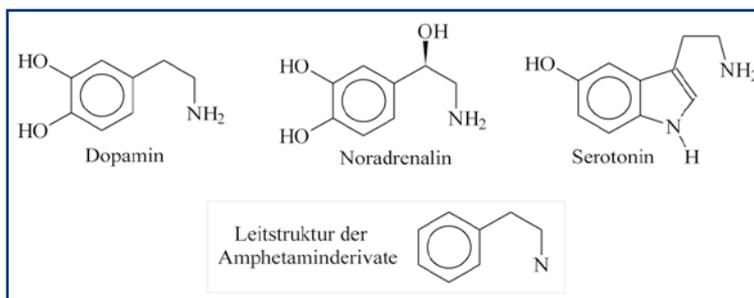
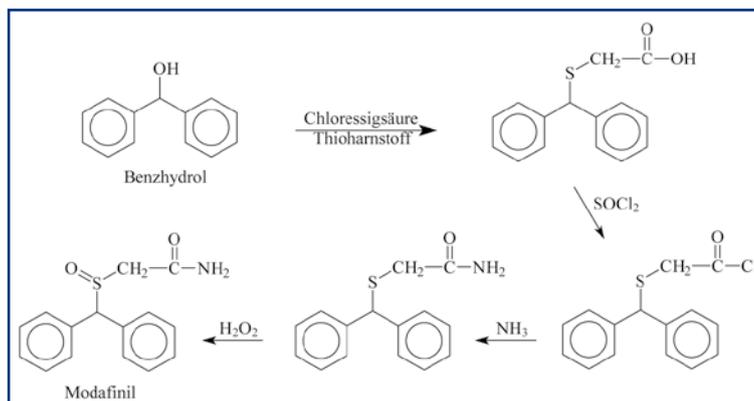


Abbildung 4: Schema zur Synthese von Modafinil [9].



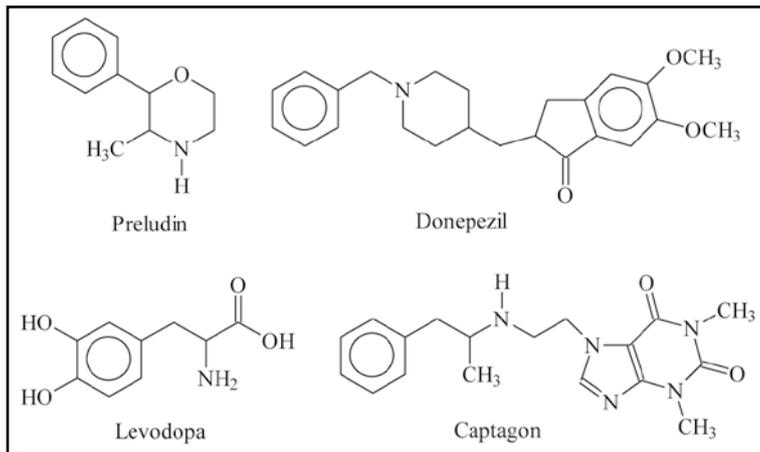


Abbildung 5: Preludin (Stimulanz) und drei weitere als „Neuro-Enhancer“ häufig missbrauchte Medikamente – Donepezil (Alzheimer-Medikament), Levodopa (Parkinson-Medikament) und Captagon (Antidepressivum) [10].

### Piracetam

Ein viertes Medikament, das häufig missbraucht wird, ist Piracetam. Es wirkt u. a. gegen Gedächtnis-, Konzentrations- und Denkstörungen und wird deshalb bei Demenz-Erkrankung (aber nicht gegen die Alzheimer-Krankheit) verschrieben. Sein Wirkungsspektrum klingt für Hirn-Doper durchaus vielversprechend.

Piracetam ist das Lactam eines Derivates der  $\gamma$ -Aminobuttersäure. Diese wirkt allerdings anders, und zwar als Beruhigungsmittel. In diesem Zusammenhang muss betont werden, wie irrsinnig und gleichzeitig traurig es ist, dass viele Menschen, die sich tagsüber und bis spät in die Nacht hinein mit den hier beschriebenen Muntermachern dopen, dann Beruhigungs- und Schlafmittel nehmen (müssen), um wieder zur Ruhe zu kommen.

### Zum Schluss

Übrigens: Hirn-Doping ist nicht neu. Schon der Yeah-Yeah-Yeah-Urschrei der Beatles soll unter dem Einfluss von Preludin (Abbildung 5), einer amphetaminähnlichen und in den sechziger Jahren beliebten Aufputschdroge, zustande gekommen sein [3]. Da kann man – mit den Beatles – nur sagen: „Help!“ **CLB**

### Literatur

- [1] J. Maier, Eine Pille für eine Eins, Die Zeit Nr. 52, Rubrik: Wissen, 17.12.2008
- [2] A. Loll, S. Baltzer, Mit Ritalin durch die Prüfung, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Rubrik: Beruf und Chance, 1.11.2008
- [3] S. Donner, Hirndoping – lassen Sie's lieber, Bild der Wissenschaft 2009, Heft 4, S. 24-31
- [4] <http://www.spiegel.de/schulspiegel/wissen/0,1518,464131,00.html>
- [5] <http://www.3sat.de/3sat.php?http://www.3sat.de/kulturzeit/themen/121325/index.html>
- [6] <http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/966321&z=798884>
- [7] V. Wiskamp, M. Holfeld, W. Proske, Leitstrukturen, CLB (Beilage Memory) 59 (2008), Heft 2, M10-M11
- [8] <http://www.drhuwer.de/ads/medikamente/RITAMONO.pdf>
- [9] <http://wapedia.mobi/de/Modafinil>; A. Kleemann, J. Engel, B. Kutscher, Pharmaceutical Substances, Thieme Medical Publishers 2001
- [10] Nähere Informationen zu den Medikamenten findet man rasch im Internet (Eingabe der entsprechenden Namen).

Realisiert in Zusammenarbeit mit

Webdesign-Hofgeismar

MODERNE  
KONZEPTE  
WEBSITE  
KREATIVITÄT  
GRAFIK  
DYNAMIK

# Mutig wissenschaftliche Ergebnisse auch gegen falsche Behauptungen benennen

Hans-Ludwig Krauß und Volker Wiskamp, Universität Gießen und Fachhochschule Darmstadt

Die Vermittlung von Werten erfolgt in der Schule hauptsächlich im Religions-, Ethik- und Philosophieunterricht. Doch auch im Fach Chemie lassen sich Denkanstöße entwickeln, die Wertefragen aufwerfen und Wertebewusstsein bei den Schülern erzeugen können. Dafür zeigt dieser Artikel einige Beispiele (vgl. [1-3]).

## Faszination der Zuverlässigkeit

Man stelle ein Glas über eine brennende Kerze, und das Licht geht bald aus. Schon ganz junge Menschen können das Experiment durchführen, immer wieder mit dem gleichen Erfolg. Verblüffend ist die Zuverlässigkeit des naturwissenschaftlichen Phänomens. Ist Zuverlässigkeit nicht auch im menschlichen Leben erstrebenswert?

Diese sehr selbstverständliche Grunderfahrung bezüglich der Zuverlässigkeit der Naturgesetze lässt sich auch älteren Schülerinnen und Schülern in einem für sie nicht naheliegenden Experiment vermitteln; entsprechend den Forderungen des hessischen Lehrplans für den Chemieunterricht an Gymnasien soll in Jahrgangsstufe 9 das „Gesetz der konstanten Proportionen“

### Die Autoren

**Prof. Dr. Volker Wiskamp** studierte Chemie an der Universität Bochum, dem Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim-Ruhr sowie an der Universität Berkeley. Danach war er vier Jahre lang Polymerforscher bei Bayer. Seit 1989 vertritt er an der Fachhochschule Darmstadt die „Anorganische und Organische Chemie“ in der Lehre. Sein wissenschaftliches Arbeitsgebiet ist die Didaktik der Chemie mit den Schwerpunkten Hochbegabtenförderung, Bildungspartnerschaften Schule/Hochschule/Industrie, fächerübergreifender Unterricht sowie Experimentieren in Kindergärten und Grundschulen.

**Hans-Ludwig Krauß** studierte an der Universität Gießen Chemie, Sport und Religion für das Lehramt am Gymnasium in der Sekundarstufe II. Nach dem zweiten Staatsexamen war er drei Jahre als Lehrer am Christian-Wirth-Gymnasium in Usingen und als Ausbildungsbeauftragter für erziehungs- und gesellschaftswissenschaftliche Fragen in der Referendarausbildung am Studienseminar Frankfurt III tätig. Seit 2003 ist Krauß wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Didaktik der Chemie der Universität Gießen. Dort arbeitet er an seiner Dissertation, aus der die vorliegende Publikation hervorgeht.



vermittelt werden. Lässt man identische Mengen Blei oder Kupfer mit jeweils variierenden Mengen Schwefel vollständig zur Reaktion kommen, so werden die Jugendlichen verblüfft feststellen, dass unabhängig von den eingesetzten Massen jeweils konstante, „verlässliche“ Verhältnisse im Endprodukt auftreten. Gäbe es dieses Gesetz nicht, und würde sich die Zusammensetzung von Verbindungen nach den eingesetzten Massen richten, so wäre die Welt um uns herum nicht beschreibbar und Leben könnte nicht existieren.

## Einzigartigkeit

Jedes Salz kristallisiert in seiner charakteristischen Kristallform, die durch eine Elementarzelle beschrieben werden kann. Trotzdem gleicht kein Pyritkristall dem anderen, kein Bergkristall seinem Nachbarn. Jedes Mineral und Gestein ist einzigartig, ein Unikat, geschaffen von dem Künstler Natur. Eine Mineraliensammlung finden die meisten Schüler einfach schön. Und sie staunen noch mehr, wenn ihnen bewusst wird, dass jedes Material eine besondere Begabung hat. Aus Kalkstein beispielsweise wird beim Erhitzen Kohlenstoffdioxid ausgetrieben und gebrannter Kalk für die Bauindustrie bleibt zurück. Aus Naturgips kann man das Kristallwasser thermisch austreiben und erhält ein Material, das z. B. für einen Gipsverband nützlich sein kann. Aus Borax lässt sich Glas schmelzen, und Schwefel kann über seine rasch abgekühlte Schmelze Gummieigenschaft erlangen. Wie ist es dazu im Vergleich mit uns Menschen? Ist nicht auch jeder von uns ein einzigartiges Geschöpf mit unverwechselbaren Eigenschaften und Fähigkeiten, berufen zu etwas Besonderem? Das Staunen über so viel Einzigartigkeit kann zu religiösen Lebenseinstellungen ermutigen.

## Misstrau dem Ähnlichen!

Amylose und Cellulose sind Polykondensate der Glucose mit der empirischen Formel  $[C_6H_{10}O_5]_n$  und verbrennen exotherm zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Die beiden Makromoleküle sind also ähnlich – und doch einzigartig. Denn ein „kleiner“ strukturchemischer Unterschied in den Molekülen, die  $\alpha$ -glykosidische Verknüpfung der Bausteine in der Amylose bzw. die  $\beta$ -glykosidische Verknüpfung in der isomeren Cellulose, hat enorme Konsequenzen: Die Amylose ist wasserlöslich und für uns Menschen ein wichtiges Nahrungsmittel, welches mit

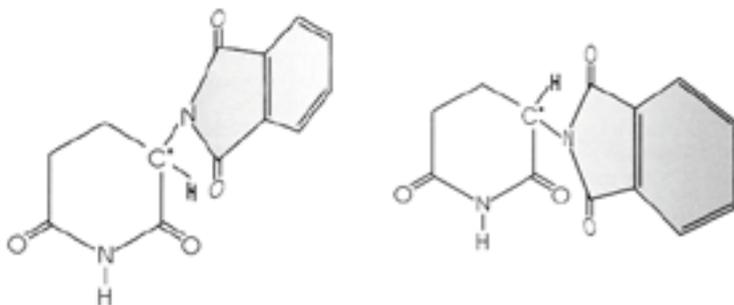
Hilfe unseres Enzyms Amylase zu Glucose hydrolysiert, während die Cellulose von uns nicht verstoffwechselt werden kann. Letztere ist wasserunlöslich und dient u. a. zum Aufbau pflanzlicher Fasern. Vorsicht also beim Beurteilen der Eigenschaften isomerer Verbindungen! Zu diesem Thema gibt auch die – traurige – Contergan-Geschichte (siehe Abbildung unten) viele Denkanstöße.

Ohne es böse zu meinen, sollte man als Lehrer seine Schüler einmal ins Bockshorn jagen. Nachdem man die Verbrennung von Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid und dessen Struktur erarbeitet hat, frage man nach der Struktur des Verbrennungsproduktes von Silizium. Die meisten Schüler antworten:  $O=Si=O$ . Logisch gedacht, denn Elemente einer Gruppe im Periodensystem zeichnen sich durch die gleiche Anzahl von Außenelektronen und ähnliches chemisches Verhalten aus. Doch der „kleine“ Unterschied in der Größe der C- und Si-Atome macht dem Analog-Denker einen Strich durch die Rechnung. Wäre das Siliziumatom in der Tat kleiner, könnte es wie das Kohlenstoffatom mit Sauerstoffatomen Doppelbindungen ausbilden. Dann wäre Quarz ein Gas, und unser Planet (und damit die Menschheit) würde so nicht existieren.

Auch in einfachen Element-Eigenschaftsreaktionen lässt sich diese Einsicht sehr anschaulich im Mittelstufenunterricht vermitteln: Analoge Reaktionsprinzipien der Alkalimetalle mit Wasser zeichnen sich im Detail jedoch durch kleine aber feine Unterschiede in der Reaktionsheftigkeit aus. Wenn auch Kalium der „Zwillingsbruder“ des Natrium ist, wie es Primo Levi formuliert [4]; so ist es doch das Geschäft des Chemikers, dem „Fast-Identischen“ und dem „Praktisch-Gleichen“ zu misstrauen. Kleinste Unterschiede können fatale Folgen haben, wie auch im „richtigen Leben“ aus einem „beinahe“ noch kein „ganz und gar“ wird.

## Die Mischung macht's

Die Natur liefert nicht nur eine Vielzahl einzigartiger Stoffe, sondern auch einzigartige Stoffmischungen. Gut ausgetüfelt, wie Chlorophylle, Carotine



Die L- und die R-Form (v.l.) von Thalidomid (Handelsname: Contergan) haben unterschiedliche physiologische Wirkungen. Die biologische Aktivität des R-Thalidomids führt zu Beruhigung; die andere Form erzeugt Fehlbildungen bei Embryos, nimmt die Mutter die Substanz ein. Da entsprechende Meldungen noch nicht zentralisiert waren, erkannte man die fatale Wirkung von L-Thalidomid erst, nachdem tausende Babys mißgebildet zur Welt gekommen waren (siehe Bild-Titelausschnitt vom 11. April 1962).

## Fettbestimmung nach Caviezel®

BÜCHI



### Specken Sie Ihren Aufwand bei der Fettbestimmung ab:

Die Caviezel® Methode kombiniert eine einfache und schnelle Probenvorbereitung mit der gaschromatographischen Analyse des Extraktes. Ohne Zwischenschritte erhalten Sie in kürzester Zeit zuverlässige Ergebnisse für Gesamtfett, Buttersäure und Fettsäuren.

#### ■ Extraktionseinheit B-815

In einem Schritt können bis zu vier Proben gleichzeitig, innerhalb von 30 Minuten extrahiert und verseift werden.

#### ■ Detektionseinheit B-820

In weniger als 10 Minuten wird der Gesamtfettgehalt mittels gaschromatographischer Technik bestimmt.

#### ■ Autosampler B-821

Das System lässt sich mit einem Probengeber für 48 Proben ausrüsten. Dies erhöht den Probendurchsatz und ermöglicht den automatisierten Betrieb.

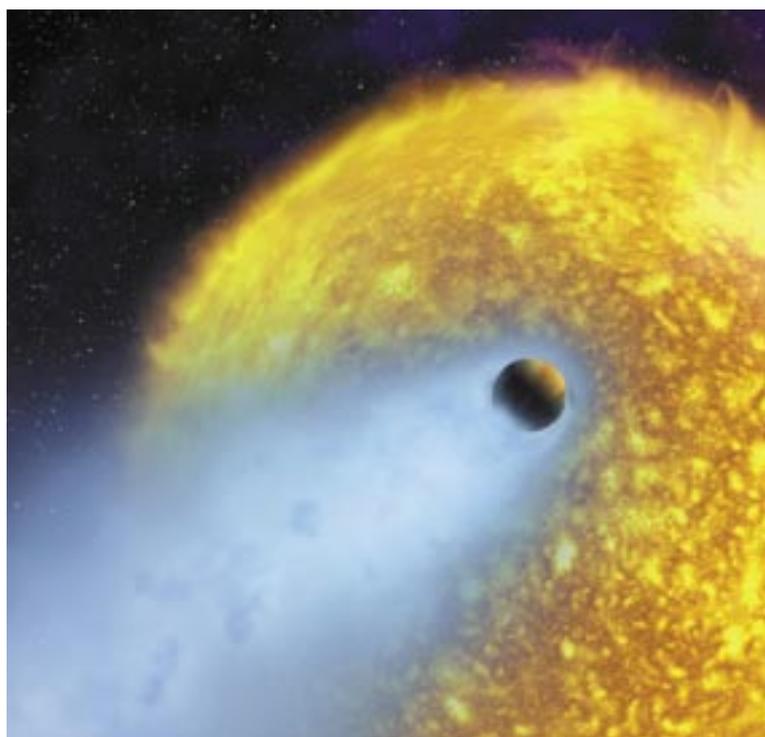
Erfahren Sie mehr über die Caviezel® Methode. Fordern Sie einfach ausführliche Informationen an oder besuchen Sie uns im Internet.

BÜCHI Labortechnik GmbH  
Am Porscheplatz 5  
D-45127 Essen  
Freecall 0800 414 0 414  
deutschland@buchi.com

www.buechigmbh.de

und Xanthophylle in den Blättern der Pflanzen kooperieren, um einen großen Teil des sichtbaren Lichtes für die Fotosynthese zugänglich zu machen. Und ist nicht auch die Luft ein geniales Stoffgemisch? Enthielte sie nämlich deutlich mehr Sauerstoff, würde auf Erden vieles verbrennen. Umgekehrt, bei einem zu geringen Sauerstoffgehalt, würden zahlreiche Lebewesen ersticken. Ähnlich verhält es sich mit dem Kohlenstoffdioxid in der Luft. Wäre da weniger, gäbe es die Fotosynthese nicht. Und bei zuviel des Gases würde der Treibhauseffekt noch verheerendere Folgen nach sich ziehen. Wenn den Schülern derartige Feinordnungen in der Natur bewusst werden, bleibt vielleicht ein Gefühl der Ehrfurcht vor ihr. Verdeutlichen lässt sich dies sehr anschaulich, indem beispielsweise Verbrennungen – etwa von Glucose – in reinem Sauerstoff durchgeführt werden: Ist die Sauerstoffzufuhr ausreichend, so reicht eine kleine Funke, und die organische Materie reagiert in einer stark exothermen Umsetzung nahezu vollständig mit dem bereitgestellten Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser. Entsprechend lassen sich übliche Redoxreaktionen mit dem sehr viel ungeeigneteren Oxidationsmittel Stickstoff kaum durchführen – hier gelingt bestenfalls die Umsetzung mit Magnesium zu Magnesiumnitrid. An einen Katabolismus organischer Materie unter den Bedingungen etwa des menschlichen Organismus (ca. 37°C, Normaldruck) ist da nicht zu denken.

Astronomen haben einen extrasolaren Planeten entdeckt, die so nahe einen sonnenähnlichen Stern umfliegt, dass er große Mengen seiner Materie ins Weltall ablässt. Den Jupiter-ähnlichen Gasplaneten HD 209458b zwischen Sonnenfeuer und Weltall-Kälte, dessen Umlaufbahn nur sieben Millionen Kilometer von dem Stern entfernt ist, visualisierte der Künstler Alfred Vidal-Madjar (Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, France). Leben wie wir es kennen gibt es nur in einem sehr engen Temperaturbereich, sicher nicht auf solch einem Planeten (Abb.: NASA).



So kann man die Überlegung „Die Mischung macht's“ auch auf den schmalen Temperaturkorridor übertragen, der bestehen muss, damit Lebensformen existieren können. Verglichen mit stellaren Bedingungen von vielen Millionen Grad Celsius leben wir auf der Erde quasi am absoluten Nullpunkt. Dass dennoch der Mensch auf einen Temperaturkorridor von ca. 35-40°C beschränkt bleiben muss, um den Ablauf seiner biochemischen Prozesse zu gewährleisten, unterstreicht die Sensibilität der Naturbalance. Selbst wenn man alle bakteriellen Lebensformen mit einbezieht, so kann das Leben, wie wir es kennen, eine maximale Temperaturspanne von –20°C bis +90°C tolerieren. Experimente mit Trockeneis oder – wenn vorhanden – flüssigem Sauerstoff und flüssigem Stickstoff führen die surreal anmutenden Umweltbedingungen vor Augen, die herrschen würden, wenn wir mit minimal veränderten Temperaturbedingungen „leben“ müssten.

### Vom dummen Jungen und von gescheiterten Professoren

Ehrfurcht vor dem Leben kann sich bei Schülern u. a. entwickeln, wenn sie sich der Perfektion biochemischer Prozesse bewusst werden. Wem gelingt es besser, Fette zu hydrolysieren oder Eiweiße in Aminosäuren zu zerlegen, als den körpereigenen Lipasen bzw. Proteasen. In Anbetracht der Effektivität dieser Biokatalysatoren verblissen Haber-Boschs Eisenkatalysator zur Ammoniak-synthese oder Wilkinsons Hydrierkatalysator vor Neid.

Experimentell zeigt sich der enorme energetische Aufwand bei der Luftverbrennung zur Herstellung geringer Mengen Salpetersäure aus der Umsetzung von Luftstickstoff mit Luftsauerstoff und anschließender Zugabe von Wasser. Die technischen Anstrengungen des Menschen zur Herstellung von Nitraten aus dem reaktionsträgen elementaren Stickstoff können sich nicht mit den biokatalytischen Meisterleistungen der Stickstoff-fixierenden Mikroorganismen messen, die unter „natürlichen“ Temperatur- und Druckbedingungen jährlich bis zu 200 Millionen Stickstoff umsetzen, Dreiviertel des natürlichen Stickstoffkreislaufs.

Technische Katalysatoren zu entwickeln und die interessanten Strukturen von Proteinen aufzuklären sind zwar forschende Meisterleistungen, doch es dürfen Wetten darauf angenommen werden, dass es keinem Chemikern gelingen wird, Aminosäuren zu naturidentischen Proteinen zu polykondensieren. Schopenhauer brachte es auf den Punkt: „Jeder dumme Junge kann einen Käfer zertreten, aber alle Professoren der Welt können keinen zusammensetzen.“

### Im Anfang war das Wort

Strukturchemisch noch interessanter als die Proteine ist die DNA, die das menschliche Genom bestimmt. Dieses als Reihenfolge der lediglich vier verschiedenen, an ein aus Phosphorsäure und Desoxyribose entstande-

nes Polykondensat gebundenen Stickstoffbasen Adenin, Thymin, Guanin und Cytosin aufzuschreiben, erfordert etwa 1000 tausendseitige Bücher. Eine gewaltige Informationsmenge, die über das Werden von Leben entscheidet.

Vom chemischen Standpunkt aus betrachtet ist es besonders reizvoll zu bedenken, welche Bindungsvoraussetzungen gegeben sein müssen, damit Information generell chemisch kodiert werden kann. Aus diesen Überlegungen heraus lassen sich nämlich auch Charakteristika der verschiedenen Bindungstypen erarbeiten: Damit Information in einer spezifischen Abfolge von Molekülen kodiert werden kann, wird eine Bindungsstruktur benötigt, die variable Moleküle verknüpfen kann und zudem eine lineare und somit gerichtete Anordnung ermöglicht. Dies ist nur mit Hilfe einer kovalenten Bindungsform möglich; eine Kristallstruktur als Folge einer Ionenbindung verfügt über keine spezifische und variable Molekülfolge; sie eignet sich aber, um mit Hilfe eines elektrischen Feldes zwischen Kationen und Anionen zu selektieren und damit für bestimmte Ionensorten Reaktionswege zu sperren und wiederum andere zu eröffnen. Schwache Wechselwirkungskräfte wie etwa Wasserstoffbrückenbindungen verfügen wiederum über eine eigene besondere biologische Bedeutung: Sie ermöglichen kurzfristige und kurzzeitige Reaktionen auf Umweltsignale, da diese Informationen durch chemische Signale, also kurze Bindungsbildungen und Ablösungen übermittelt werden. Man denke nur an die Konsequenzen, wenn kurzzeitige Umweltreize wie Glockenschlag oder Autohupen nicht wieder aus der Wahrnehmung verschwinden würden, sondern noch Stunden im Bewusstsein nachhallen würden.

Dass also der Bauplan jedes Organismus in einer Abfolge von vier Basen kodiert ist und so sehr elegant eine enorme Informationsfülle materialisiert werden kann, ist eines der ergreifenden Wunder des Lebens. Der Evangelist Johannes drückte diesen fachwissenschaftlichen Zusammenhang folgendermaßen aus: *„Im Anfang war das Wort (im griechischen Original: Logos – Information), und das Wort ward Fleisch.“*

## Feuerspeiende Drachen

Dank der in der DNA gespeicherten Daten sind wir keine feuerspeienden Drachen. Diesen merkwürdigen Gedanken kann man mit folgendem Experiment initiieren. Man gebe ein Stückchen Glucose in eine Kaliumchloratschmelze und beobachte die sehr heftige Verbrennung. Dabei entstehen aus dem Zucker Kohlenstoffdioxid und Wasser. In einem Kalorimeter kann man anschließend die Verbrennungswärme messen. Glucose ist für uns Menschen ein wichtiger Energielieferant, der in unserem Körper ebenfalls zu Kohlenstoffdioxid und Wasser verbrannt wird. Dabei wird die gleiche Energie frei wie bei der Verbrennung in der Kaliumchloratschmelze oder im Kalorimeter. Die Energiefreisetzung erfolgt aber in ganz kleinen Schüben (Hess'scher Satz), so dass die Energie nicht explo-

sionsartig verpufft, sondern sinnvoll genutzt werden kann, vor allem zur Produktion von energiereichem Adenosintriphosphat sowie zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur.

Ohne die Gültigkeit des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik – so kann man folgern – lässt sich „Leben“, wie wir es kennen, nicht vorstellen. Die dosierte Freisetzung der im Kalorimeter messbaren Verbrennungsenthalpie lässt sich mit Hilfe des bekannten „Blue-Bottle“ Experiments sehr anschaulich modellieren. Dabei wird Glucose mit verdünnter Natronlauge und Methylenblau-Lösung versetzt, wodurch es zu periodischen Reaktionsabläufen kommt, bei denen Glucose mit Hilfe des Methylenblaus zu Gluconsäure oxidiert wird, wobei sich die Farbe der Lösung von blau nach farblos ändert. Beim anschließenden Schütteln tritt Luftsauerstoff hinzu und oxidiert seinerseits die Leukoform des Methylenblaus, wodurch sich die Farbe der Lösung wieder zu blau verwandelt. Letztlich fungiert Methylenblau als Elektronenvermittler, und an der eigentlichen Umsetzung sind trotz des Zwischenschrittes letztlich nur Glucose und Sauerstoff beteiligt, entsprechend der Verbrennung im Kalorimeter.

Die oxidative Spaltung von Glucose zu Brenztraubensäure, dessen oxidative Decarboxylierung und die Reaktionsfolgen im Zitronensäurezyklus sind im technischen Reaktor bislang nicht realisiert worden. Chemiker sind einfach nicht intelligent genug dazu (Entschuldigung!), die erforderlichen Katalysatoren herzustellen. Dies schafft nur die Natur auf Basis der in der DNA vorhandenen „Kochvorschriften“.

## Dinosaurier-Atome

*„Alles ist im Fluss“*, sagte schon Heraklit. Auf molekularer Ebene bedeutet dies, dass sich Atome ständig umgruppieren und andere Verbindungen eingehen. Betrachten wir exemplarisch den Kohlenstoffkreislauf auf der Erde, in dem das Kohlenstoffdioxid eine zentrale Stellung einnimmt. Die Meerespflanzen nehmen bei ihrer Fotosynthese 90 Milliarden Tonnen  $\text{CO}_2$  pro Jahr auf, während die Meerestiere bei ihrer Atmung jährlich die gleiche Menge  $\text{CO}_2$  produzieren. Die Landpflanzen benötigen 120 Milliarden Tonnen  $\text{CO}_2$  pro Jahr für ihre Fotosynthese. Die Hälfte davon liefern die Landlebewesen durch Ausatmen nach. Die andere Hälfte wird bei der Verwesung und Zersetzung von Pflanzen, Tieren und Menschen ergänzt. Die  $\text{CO}_2$ -Bilanz wäre insgesamt ausgeglichen, wenn da nicht mehr als fünf Milliarden Tonnen  $\text{CO}_2$  wären, die bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und -gas zum Energiebedarf vor allen der wohlhabenden Nationen jährlich in die Luft geblasen werden. Wenn Schüler das Prinzip des chemischen Gleichgewichts verstanden haben, wissen sie, dass das Ökosystem Erde auf dieses Mehr an Kohlenstoffdioxid reagieren muss! Wer die Lebensbedingungen auf unserem Planeten nicht verändern, sondern sie so belassen will, wie sie sind, – weil sie gut sind –, muss sich danach fragen, welche Beiträge zur Verringerung des  $\text{CO}_2$ -



Ausstosses er persönlich und die Gesellschaft insgesamt leisten können.

Neben der Schärfung des Umweltbewusstseins eignet sich die Diskussion von Stoffkreisläufen auch zur Reflexion über die Vergänglichkeit allen Lebens. Wenn Kohlenstoffatome ständig im Fluss sind, sollten wir doch zumindest einige C-Atome in uns tragen, die früher schon einmal einem Dinosaurier gehört haben. Oder mit den Worten von Lucretius: „*Und es vergeht nichts ganz und gar von dem, was auf unserer Welt erscheint: denn die Natur baut ein Ding aus des anderen Trümmer und duldet die Geburt des einen nur durch des anderen Tod.*“

Auch diese weitreichenden, die Fantasie der Schülerinnen und Schüler beflügelnden Überlegungen lassen sich sehr leicht aus einigen grundlegenden Experimenten zum Kohlenstoffkreislauf ableiten:

- Löslichkeit von Kohlenstoffdioxid in Wasser,
- Nachweis von Kohlenstoffdioxid bei der Verbrennung organischer Substanzen,
- Sauerstoffnachweis bei der Fotosynthese (Wasserpest),
- Stärkenachweis in Laubblättern,
- Thermische Zersetzung von Kalkstein,
- Kohlendioxidnachweis beim Verbrennen von Kraftstoffen.

### Das Chaos wird immer größer

Wasser und Ethanol zu mischen ist kinderleicht. Die beiden Komponenten der Mischung dann aber voneinander zu trennen, d. h., den geordneten Ausgangszustand wieder herzustellen, ist aufwändig und energieintensiv (Destillation).

Alle freiwillig ablaufenden Prozesse sind richtungsgebunden: sie verlaufen immer in Richtung einer Zunahme einer Gleichverteilung der inneren Energie auf möglichst viele Freiheitsgrade – einen Zustand, den wir phänomenologisch mit „Unordnung“ assoziieren.

Dazu ein Vergleich. Wer schon einmal sein Zimmer

aufgeräumt hat, weiß, dass dies mit Arbeit verbunden ist. Der Ordnung Schaffende kann dabei richtig ins Schwitzen und außer Atem kommen, denn sein Stoffwechsel muss intensiviert werden; er verbraucht Nahrung, tierische und pflanzliche. Für sein Leben wird also anderes Leben geop-

fert. Mit diesem Gedanken kann ein Brückenschlag zu den Themen „Einbettung des Menschen in natürliche Kreisläufe“ und „Ehrfurcht vor dem Leben“ nach Albert Schweitzer gebaut werden: „Ich bin Leben, das leben will, inmitten von Leben, das leben will.“

Hierzu ein zweiter Gedanke. Jedes Lebewesen ist ein hoch geordnetes offenes System, dessen Ordnung nur mit Hilfe des Stoffwechsels – Austausch mit der Umgebung – aufrecht erhalten werden kann. Die dazu erforderlichen Verbrennungsreaktionen sind mit einer Entropiezunahme und einem Energieverlust in Form des Produktes der Entropieänderung und der Temperatur,  $\Delta S \cdot T$ , verbunden (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Da der Begriff „Entropie“ umgangssprachlich mit „Unordnung“ oder „Chaos“ übersetzt werden kann, lautet für die Schüler das Fazit, dass mit der Existenz von Leben das Chaos auf der Erde und im Universum insgesamt immer größer wird. *Die Entropie steigt mit der Zeit; die Zeitachse läuft in Richtung Tod.* Eine metaphysische Betrachtung, Tatsächlich kann das Chaos auf der Erde insgesamt abnehmen. Nur die Entropie des Gesamtsystems – einschließlich des Weltalls – nimmt durch Lebensprozesse zu.

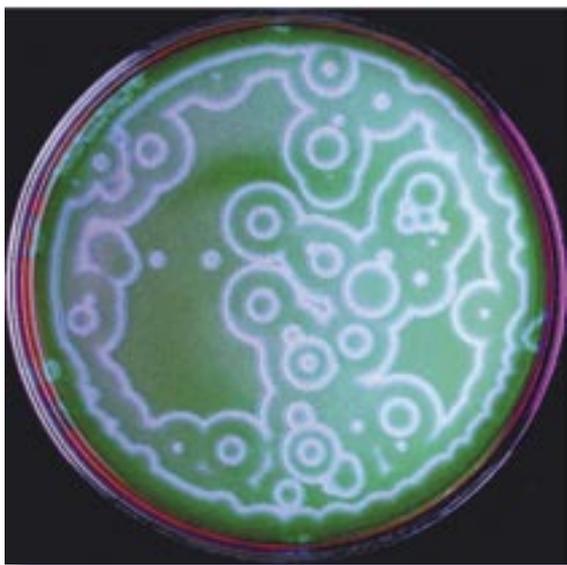
Hierzu die Äußerung einer 19jährigen Schülerin: „*Besonders eindrücklich war für mich zu erfahren, dass alles auf der Welt im Zusammenhang steht und ein Handeln eine Reaktion mit sich führt. Es war schon interessant zu entdecken, was hinter dem Phänomen Mensch steht und wie kompliziert das alles ist, was für uns selbstverständlich ist.*“

### Gegensätze fördern Leben

Lebende Systeme erfordern Potentialgefälle, z. B. eine niedrige Sauerstoffkonzentration im Zellinneren und eine hohe auf der Außenseite der Zellmembran. Vergleichbar einer Batterie, die nur so lange funktioniert, bis die anfangs am Pluspol vorliegenden Oxidations- und die anfangs am Minuspol vorhandenen Reduktionsmittel durch Elektronenaustausch verbraucht sind. Aber letztlich sind es vielerlei chemische Dualitäten, die jeder Form von Leben, wie wir es kennen, unabdingbar vorausgehen: Chemische Energiespeicherung in Form des ATP ist nur möglich auf Grund der Abstoßungstendenz gleichgerichteter negativer Ladungen, die auf engem Raum konzentriert sind, was sich sehr eindrucksvoll durch die Hydrolyse von Phosphorpentoxid im Schulversuch simulieren lässt.

Gäbe es die elektrischen Polaritäten nicht, die sogar letztlich für die Struktur der Atome und damit für alle bekannten chemischen Reaktionen verantwortlich sind, so könnte eine so simple und doch so wirkungsvolle Methode der Energiespeicherung, wie wir sie im ATP vorfinden, nicht realisiert werden. Aber auch Konzentrationsgradienten, wie die von Natrium- und Kaliumionen im intra- und extrazellulären Raum sind verantwortlich für die Erregungsleitung am Nerven, was sich ebenfalls in einem sehr anschaulichen Schülerexperiment, verändert nach [6], zeigen lässt. An Stelle des in der Vor-

Fernab vom chemischen Gleichgewicht läuft die Belusov-Zhabotinsky-Reaktion ab (Abb.: Lipscher/Pörtner, Kantonsschule Baden, Schweiz).



schrift eingesetzten Reineisenstabes, der umständlich zu bestellen ist und etwa 40 Euro kostet, lässt sich das Experiment auch sehr einfach mit handelsüblichen Zimmermannsnägeln durchführen, wie sie in jedem Baumarkt zu bekommen sind. Durch die so ermöglichte Experimentierform des Schülergruppenversuchs können die Jugendlichen Einzelheiten wie die Periodizität der Erregungsleitung und die zeitlichen Besonderheiten der Reaktion eingehend beobachten.

Man darf also pointieren, dass letztlich die chemischen Gegensätze (Konzentrationsgradienten, Ladungsunterschiede und Potentialgefälle) unser Leben maßgeblich bestimmen; sie sind unabänderlich, und jedes Bemühen, einen dauerhaften Ausgleich dieser chemischen Dualitäten zu erreichen, würde nichts anderes als den Tod des Organismus zur Folge haben. Vielleicht kann uns das lehren, auch in unserem Alltag mit Gegensätzen und Spannungen leben zu lernen, weil sie als unabdingbare Eigenschaft zum Leben hinzu gehören, statt stets darauf aus zu sein, jegliche Form von Widerspruch und Verschiedenheit in einem gegenseitigen Ausgleich auflösen zu wollen.

### Der wahre Öko-Freak muss Chemie-Ingenieur werden

Wer seine Umwelt liebt, muss sie schützen. Dazu braucht er Fachkompetenz. Wer Chemie-Ingenieur ist, weiß, dass man bakteriell verseuchtes Wasser mit Chlor oder Ozon desinfizieren, farbiges Wasser mit Wasserstoffperoxid bleichen oder die Farbstoffe an Aktivkohle absorbieren, saures Wasser neutralisieren kann etc. Fast alle Methoden zur Wasser-, Luft- und Bodenreinigung bzw. -reinigung basieren auf chemischen Prinzipien. Es lohnt sich also, Chemie zu studieren, denn dann kann man sein Fachwissen zum Schutz der Umwelt einsetzen.

Bedenkt man die gesellschaftliche Relevanz der Chemie, so muss einen die medienwirksame aber fachlich unhaltbare Vereinheitlichung der Bedeutungen von Biologie und Chemie sehr verärgern: Biologie wird in der öffentlichen Wahrnehmung mit natürlich und gesund assoziiert, während Chemie mit den Attributen künstlich und giftig behaftet ist. Dass dies nicht so ist, und dass sämtliche elementaren Lebensvorgänge in erster Linie chemisch-physikalische Prozesse darstellen, lässt sich den Schülerinnen und Schülern bei vielerlei Themen eindrücklich demonstrieren (Redoxvorgänge, Protolysen, Puffersysteme, Enthalpie und Entropie etc.) Stellvertretend sei hier die Bemerkung eines Schülers der Jahrgangsstufe 11 herausgegriffen, der im Anschluss an das oben beschriebene Experiment zur Simulation der Reizweiterleitung an Nerven formulierte: „*Dass der menschliche Körper ein geniales Produkt der Natur ist, stand für mich schon immer fest. Mit Hilfe der Chemie kann man in Teile dieses Systems einblicken und es vielleicht begreifen. Jedoch wird hier erst klar, wie viel Würde jedem Menschen zukommen sollte ...*“

## Wasser ist Menschenrecht

Das Vater-Unser-Gebet müsste um eine Zeile „... unser täglich Wasser gib uns heute ...“ erweitert werden, denn Wasser ist ein essentielles Lebensmittel und damit ein Menschenrecht. Das findet nicht nur die Organisation „Brot für die Welt“, die eine Aktion unter dem Motto gestartet hat. Wir haben dieses Thema mit Schülern und Studenten diskutiert, ihnen die Probleme mit der weltweiten Trinkwasserversorgung, Ursachen der zunehmenden Grundwasserverschmutzung und technische und wirtschaftliche Aspekte der Trinkwasserherstellung erläutert [7]. Die Chemie hat viel zu dem Thema zu sagen, und die jungen Menschen hören interessiert zu, wenn im Zusammenhang mit Wasser nicht nur die chemische Formel, das Dipolmoment, die Aggregatzustände, die Verdampfungsenthalpie, die Knallgasreaktion und Hoffmanns Zersetzungsgesetz behandelt werden.

## Chemie – Fluch oder Segen

Dass mit Hilfe chemischer Prozesse sauberes, trinkbares Wasser hergestellt werden kann, ist ein Segen. Umgekehrt ist es ein Fluch, dass viele Gewässer auf der Erde vor allem durch Industrieabwässer, Pestizid- und Arzneimittelrückstände etc. kontaminiert sind. Die berühmten beiden Seiten derselben Medaille. Die Anwendung der Chemie ist janusköpfig. Dies kann u. a. auch am Verhalten zweier unterschiedlicher Halogenverbindungen gegenüber Licht sowie den verschiedenen Eigenschaften des Ammoniumnitrats erläutert werden kann.

Die Entdeckung der fotochemischen Zersetzung der Silberhalogenide hat die Fotografie ermöglicht. Diese wiederum war am Ende des 18. Jahrhunderts ein wesentliches Mittel der Aufklärung und Demokratisierung. Denn soziale und gesellschaftliche Missstände konnten im Bild festgehalten und über die Zeitungen weltweit publiziert werden. Schreckliche Momentaufnahmen des Krieges konnten unbeteiligten Zivilisten eindrücklich nahegebracht werden etc. Die Empfindlichkeit von Dichlordifluormethan, einer anderen Halogenverbindung, gegenüber dem UV-Anteil des Sonnenlichtes hat der Erde und ihren Bewohner das Ozonloch „beschert“. Dabei war der Stoff zunächst als Treibgas und Kühlmittel hoch willkommen. Ist den Erfindern und Verkäufern der Verbindung die Schuld zu geben, dass sie deren Fotochemie in höheren Schichten der Atmosphäre nicht voraussahen? Nein. Sie konnten die dort ablaufenden radikalischen Kettenreaktionen nicht ahnen. Gerade die Geschichte des Difluordichlormethans, ähnlich wie die des DDTs, lehrt, dass man vor Folgeschäden einer Erfindung niemals gefeit ist. „*Die Auswirkungen gehen alle an*“, heißt es in Dürrenmatts Schauspiel „Die Physiker“. Problematisch ist hier wiederum, dass eine kollektive Verantwortlichkeit der Gesellschaft schnell auch zu „Nicht-Zuständigkeitsbekundungen“ einzelner führen kann: wo alle zuständig und verantwortlich sind, kann sich er einzelne leicht in Untätigkeit flüchten, oh-



AUFsätze

ne Sanktionen fürchten zu müssen. „Was alle angeht, können auch nur alle lösen ...“ (Dürenmatt), aber: es muss dennoch einzelne Ansprechpartner geben, die eine größere Verantwortung tragen als andere.

Kommen wir zum Ammoniumnitrat. Diese Salz wurde im Unterricht als Bestandteil zahlreicher Düngemittel kennen gelernt. Am Rande der üblichen Nachweisreaktionen auf Ammonium- und Nitrat-Ionen haben wir die Schüler gebeten, eine Spatelspitze der Substanz im Reagenzglas zu erhitzen. Die Verblüffung aufgrund einer Verpuffung war bei den Jungforschern groß: Sie hatten entdeckt, dass Ammoniumnitrat auch ein Sprengstoff ist! Nun kann eine Entdeckung nicht zurück genommen werden, und die Frage stellt sich, wie man damit umgeht (Verantwortungsethik). Der Mensch darf Ammoniumnitrat selbstverständlich zu friedlichen Sprengzwecken, z. B. im Bergbau oder beim Feuerwerk, einsetzen. Er darf den Stoff aber nicht zu etwaigen Terroranschlägen missbrauchen.

Wir haben die Schüler einen Aufsatz zum Thema „Chemie – Fluch oder Segen der Menschheit“ schreiben lassen [8]. Des Weiteren haben wir sie gebeten, einen Eid für Naturwissenschaftler zu verfassen, und ihre Texte mit dem Wortlaut des Eides verglichen, den die Gesellschaft Deutscher Chemiker 1994 formuliert hat: „ ... Alle GDCh-Mitglieder sind sich bewusst, dass sie als Naturwissenschaftler in besonderem Maße für die Auswirkungen ihrer beruflichen Tätigkeit auf Mensch und Natur verantwortlich sind.“

Ausgangspunkt dieser Aufgabenstellung an die Schülerinnen und Schüler war die Frage, wie denn überhaupt im konkreten Fall die Verantwortung, die der Kodex der GDCh formuliert, aussehen könne: Kann ein Wissenschaftler finanziell regresspflichtig gemacht werden? Sicher nicht. Worin besteht denn dann aber eigentlich die Verantwortung, die der Wissenschaftler „in besonderem Maße“ trägt? Wie aus der folgenden Formulierung einer 13jährigen Schülerin ersichtlich ist, kann es nur um eine gewissenhafte Methode des Forschens und die ehrliche und mutige Präsentation seiner Ergebnisse gehen: „Hiermit verpflichte ich mich, ehrlich und mutig auch gegen falsche Behauptungen wissenschaftliche Ergebnisse zu benennen und keine gesicherten Informationen zurückzuhalten. Außerdem verspreche ich eine gewissenhafte Forschung und Beratungsfunktion für politische Gremien.“

Eindrücklicher kann man bei jungen Menschen im Chemieunterricht Denkanstöße zur Werteerziehung kaum anstoßen.

### Vergraben und Versenken

An dieser Stelle können die Schüler mit zwei prinzipiellen Aspekten ethischen Verhaltens konfrontiert werden: Handelt man *gesinnungsethisch* oder *verantwortungsethisch*, was sich mit Hilfe des folgenden Zitats von Max Weber differenzieren lässt: „Wenn die Folgen einer aus reiner Gesinnung fließenden Handlung üble sind, so gilt ihm [dem Gesinnungsethiker] nicht der Handelnde, son-

dern die Welt dafür verantwortlich, die Dummheit der anderen Menschen oder der Wille des Gottes, der sie so schuf. Der Verantwortungsethiker dagegen rechnet mit eben jenen durchschnittlichen Defekten der Menschen, [...] er fühlt sich nicht in der Lage, die Folgen eigenen Tuns, soweit er sie voraussehen konnte, auf andere abzuwälzen. Er wird sagen, diese Folgen werden meinem Tun zugerechnet [...]“

Überträgt man diese grundsätzlichen Überlegungen auf konkrete chemiespezifische Problemstellungen, so kann man erörtern: Welche Risikoabwägungen sollten bedacht und welche Gefahren ausgeschlossen werden, bevor es zu Herstellungszulassungen und Lagerungsbefugnissen kommen kann? Welche Sicherheitsbestimmungen und Beglaubigungen müssen erfüllt sein, bevor Chemikalien verkauft und exportiert werden dürfen? Wer kann die Ausfuhrkontrolle überwachen? Wie lassen sich Behauptungen aufrecht erhalten, ein Staat produziere Giftgas, wenn alle dazu erforderlichen Ausgangsstoffe auch harmlosen und gesellschaftlich nutzbringenden Zwecken dienen können?

Ergänzen lässt sich, dass manchmal nicht die Herstellung und Nutzung, sondern die Entsorgung von Chemikalien ein massives und nachhaltiges Problem darstellt. Man denke an die gebrauchten Brennstäbe aus Kernkraftwerken oder aus den mit Kernenergie angetriebenen russischen Unterseebooten. Man verglast sie, gießt sie in Beton und vergräbt sie schließlich in unterirdischen Salzstöcken oder man versenkt sie einfach in der Barents-See.

### Staunen ist Sehnen nach Wissen

Wenden wir uns lieber dem Schönen zu, und staunen wir über das Wachsen in einem chemischen Garten, über das Ausschlagen eines Silberbaums oder über die Bewegungen eines Tintentropfens, der in ein Wasserglas fällt. Bei diesen Experimenten ist der Zufall der Gestalter des Ästhetischen, und das ist gut. Das sinnliche Erleben darf im Chemieunterricht nicht zu kurz kommen. Die anschaulich wesentliche Qualität eines Phänomens zu hinterfragen und zu reflektieren und von dieser logisch schlussfolgernd zum unsichtbaren Kern des Wesens vorzudringen, entspricht dem Bedürfnis gerade jüngerer Menschen nach Auseinandersetzung mit dem Ästhetischen als Lerngegenstand selbst [9]. Diese pädagogische Erkenntnis fasste schon Thomas von Aquin zusammen: „Staunen ist ein Sehnen nach Wissen.“

Aber auch in höheren Jahrgangsstufen lassen sich mit Hilfe ansprechender Experimente Schönheit und Vergänglichkeit chemischer Kunstwerke anschaulich demonstrieren. Ein besonders schönes Beispiel bietet die Umsetzung des Redoxindikators Safranin mit alkalischer Hydroxyaceton-Lösung (in der Petrischale mit Overhead-Projektion). Hier kommt es durch eine Redoxreaktion zwischen Safranin und Hydroxyaceton einerseits und der Leukoform des Farbstoffes und Luftsauerstoff andererseits zu wunderschönen Farbspielen, die an Selbst-

storganisation und Musterbildung von Zellstrukturen erinnern [10].

Die Schülerinnen und Schüler werden spielerisch ermuntert, darüber nachzudenken, wie chemisch-physikalische Grundprinzipien (Entropiemaximierung in der Umgebung und lokale Musterbildung im System) auf zentrale lebensbestimmende Funktionen (Organisation und Ordnungsgrad lebender Systeme) Einfluss nehmen, und wie feinsinnig und staunenswert die Naturordnung beschaffen ist.

## Wahrheit

Der echte Forscher will im Faust'schen Sinne wissen, was die Welt im Innersten zusammen hält. Sein Durst nach Wahrheit ist unstillbar. Verlassen wir die Poesie und fragen, was uns der Chemieunterricht vielleicht über die „Wahrheit“ lehren kann.

Wenn die Schüler gelernt haben, dass Calcium- mit Oxalationen schwerlösliches Calciumoxalat ergeben, sollte man ihnen zwei Proben aushändigen und sie bitten zu prüfen, welche davon Calciumionen enthalte. Probe A:  $\text{CaCl}_2$ -Lösung, Probe B:  $\text{CaCl}_2$ -Lösung, der überschüssige EDTA-Lösung zugesetzt wurde. Die Schüler tropfen zu jeder Probe Kaliumoxalat-Lösung und beobachten nur bei der ersten Probe die Bildung eines weißen Niederschlages. Dann schreiben sie in ihr Protokollheft: „Probe A enthält Calcium-Ionen, Probe B nicht.“ Der zweite Teil der Aussage ist falsch. Doch so, wie die Schüler analysiert haben, konnten sie die Wahrheit nämlich nicht erkennen, denn die durch den sechszähligen Chelatliganden Ethylendiamintetraacetat komplexierten Calciumionen werden von Oxalationen nicht angegriffen, und eine Niederschlagsbildung bleibt dementsprechend aus. Die Schüler sind verblüfft, dass sie sich getäuscht habe.

Ebenso interessant ist in einer Weiterführung die Umkehrung dieses Gedankens: denn auch eine wahrheitsgetreue Formulierung kann richtig und trotzdem nutzlos sein. Die Schülerinnen und Schüler müssen lernen, im Blick auf naturwissenschaftliche Aussagen zwischen Wert und Wahrheit von Aussagen zu unterscheiden. Lässt man die Jugendlichen z. B. die Gruppenreaktionen der Halogenide in Schülerexperimenten erforschen, so können einige wahre Aussagen durch den Lehrer zur Hilfestellung formuliert werden. Die Schülerinnen und Schüler bekommen nun den Auftrag, diese bezüglich ihres Wahrheitsgehalts experimentell zu überprüfen („Aus ammoniakalischer Lösung fällt kein Silberchlorid aus.“) oder andere tatsächlich wahre Formulierungen bzgl. ihres Wertes zur Deutung der Experimente zu hinterfragen („Silber ist ein chemisches Element und steht im Periodensystem der Elemente.“)

Vielleicht können Schülerinnen und Schüler auf diese experimentell eröffnete Weise auch kritischer gegenüber den vielen Aussagen werden, die sie im täglichen Leben machen, hören oder lesen. Wie steht es da mit Wert und Wahrheit gerade bei modernen populistischen

Formulierungen, die allzu gerne in den Medien kommuniziert werden?

## Trivial, aber wertvoll

In diesem Artikel sollte es nicht versäumt werden, einige triviale Vorzüge von experimentellen Schülerübungen zu betonen. Wer experimentiert, muss gewissenhaft sein, sauber arbeiten und Ordnung halten. Meistens werden Schülerversuche in Kleingruppen durchgeführt, in denen jeder kooperieren und sogar Teamgeist entwickeln muss. Neben dem Lernen von chemischen Prinzipien und Reaktionsgleichungen erfolgt also das Lernen einiger Kardinaltugenden. Kopfnote für das Zeugnis können bei chemischen Schülerversuchen bestens ermittelt werden!

## Danksagung

Herzlicher Dank gebührt Prof. Helmut Gebelein, Didaktik der Chemie der Universität Gießen, für sein großes Interesse an der vorliegenden Arbeit und seine Unterstützung.

## Literatur

- [1] H.-L. Krauß, Dissertation, Universität Gießen, in Vorbereitung
- [2] V. Wiskamp, M. Holfeld, H.-L. Krauß, W. Proske, Chemie im Rahmen von religions- und sozialpädagogischen Kinder- und Jugendprogrammen, PdN-ChiS 54 (2005), Heft 1, S. 25-30
- [3] V. Wiskamp, H.-L. Krauß, S. Müller-Langsdorf, Naturwissenschaftliches Experimentieren und Religionspädagogik in Kindertagesstätten, Theorie und Praxis der Sozialpädagogik (TPS), im Druck
- [4] P. Levi, Das Periodische System, Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, 4. Aufl. München 1999, S. 66
- [5] [http://www.algordanza.ch/Pages\\_Deutsch/Algordanza.htm](http://www.algordanza.ch/Pages_Deutsch/Algordanza.htm)
- [6] M. Ducci, M. Oetken, Die Erregungsleitung am Nerven in elektrochemischen Modellexperimenten, MNU 52/1 (1999), S. 28-33
- [7] V. Wiskamp, Naturwissenschaftliches Experimentieren – nicht erst ab Klasse 7, 2. Aufl., Shaker Verlag, Aachen, 2005, Kapitel 4.9, S. 41-44
- [8] V. Wiskamp, Schüleraufsätze zum Thema „Chemie – Fluch oder Segen der Menschheit“, Chemie und Biologie (c + b) 2000, Heft 2 & 3; [http://www.swisseduc.ch/chemie/c+b/23\\_00/](http://www.swisseduc.ch/chemie/c+b/23_00/)
- [9] D. Freeß, Naturphänomene wahrnehmen und deuten – Ästhetisches Lernen, Grundlagen der Schulpädagogik, Band 44, Schneider Verlag Hohengeren, 2002
- [10] H. Kunz, Prinzipien der Selbstorganisation – Untersuchungen zu strukturbildenden Prozessen und Entwicklung einer experimentellen Konzeption zur Einbindung dieser Thematik in einen zeitgemäßen Chemieunterricht (2001); <http://docserver.bis.uni-oldenburg.de/publikationen/dissertation/2001/kunpri01/inhalt.html>



AUFsätze