

# CHEMIE UND ENERGIE IN SCHÜLERLABOREN

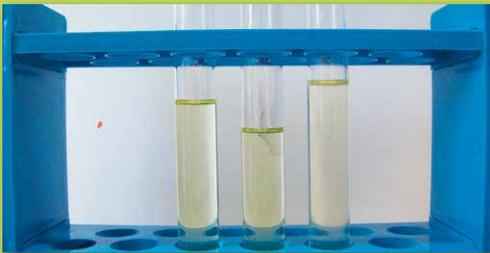
gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

## WAS GIBT ES? WAS IST ZU TUN?





# CHEMIE UND ENERGIE IN SCHÜLERLABOREN

---

WAS GIBT ES? WAS IST ZU TUN?

## **Impressum**

Herausgeber: Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor  
Prof. Dr. Petra Mischnick (Projektleitung)  
Dr. Ilka Deusing-Gottschalk (Projektbearbeitung)  
Technische Universität Braunschweig  
Institut für Lebensmittelchemie /  
Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor  
Schleinitzstr. 20  
38106 Braunschweig  
p.mischnick@tu-braunschweig.de  
i.deusing-gottschalk@tu-braunschweig.de  
Januar 2015  
Auflage: 1000 Stück

Dieses Projekt wurde von der Deutschen Bundesstiftung  
Umwelt gefördert.  
Die Veröffentlichung wurde von der Gesellschaft Deutscher  
Chemiker unterstützt.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den jeweiligen  
Autoren.  
Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet.  
Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag  
für die Richtigkeit der Angaben sowie für eventuelle  
Druckfehler keine Haftung.

Alle Rechte vorbehalten.  
Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handels-  
namen oder sonstiger Kennzeichen in dieser Broschüre  
berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von  
jedermann frei benutzt werden dürfen. Es kann sich auch  
dann um gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln,  
wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Layout und Herstellung: Druck- und Verlagshaus Zarbock  
GmbH & Co. KG  
Sontraer Str. 6, 60386 Frankfurt

Chemische Produkte sind überall in unserem Alltag vorhanden, sie tragen dazu bei, ihn angenehm zu machen und sie sind eine wichtige Basis für den Fortschritt. Allerdings geht von chemischen Produkten und chemischen Produktionsprozessen auch ein hohes Potential für Umweltbelastungen aus, Belastungen, die möglichst vermieden oder vermindert werden müssen. Schon seit Jahren befassen sich daher zahlreiche Chemiker mit Ansätzen und Prinzipien einer nachhaltigen Chemie. Fachbehörden und Unternehmen arbeiten daran, die Gesellschaft Deutscher Chemiker hat eine gleichnamige sehr aktive Fachgruppe und auch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat etliche Umweltforschungsvorhaben zur nachhaltigen Chemie gefördert. Es geht im Ansatz der nachhaltigen Chemie vereinfacht gesagt darum, die Nutzung stofflicher Ressourcen und deren Umwandlung so zu betreiben und dahingehend zu erforschen, dass kein Schaden für zukünftige Generationen entsteht.

Nicht zuletzt weil die Kaufentscheidung der Menschen für mehr oder weniger umweltfreundliche und nachhaltige Produkte, die sichere Anwendung von Produkten, ihre fachgerechte Entsorgung bzw. das Recyclingverhalten der Menschen einen großen Einfluss auf das Umweltentlastungspotential von Produkten nehmen, ist eine möglichst gute Information der Bevölkerung erforderlich. Damit dies gelingen kann, sollte eine Basis für ein grundlegendes Verständnis und eine Offenheit gegenüber chemiebasierten Sachinformationen bereits so früh als möglich angelegt werden, nämlich schon in der Kindheit und Jugend. Daher sollten alltagsbezogene Ansätze und Inhalte nachhaltiger Chemie altersgerecht vermehrt Einzug in die außerschulische Bildung und in den Schulunterricht halten. Außerdem kann sich dadurch das Bild von Chemie in der Gesellschaft ändern. Kinder und Jugendliche können beispielsweise die Erfahrung machen, dass das Fach Chemie nicht nur sehr viel mit ihrem Alltag zu tun hat, sondern auch, dass chemisches Wissen dabei helfen kann, die Umwelt zu schützen. Auch ein Bewusstsein dafür, dass man als Chemikerin oder Chemiker im Beruf durchaus einen Beitrag zum Schutz der Umwelt leisten kann, wird so geweckt. Einen Ansatz dazu liefert die naturwissenschaftlich-technisch Umweltbildung.

Sie stellt eine Schnittmenge von Umweltbildung und Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) mit Bildung für Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT-Bildung) dar. Die naturwissenschaftlich-technische Umweltbildung hat zum Ziel, Wissen über naturwissenschaftliche und technische Aspekte nachhaltigkeitsrelevanter Fragestellungen interdisziplinär zu vermitteln, eine umweltbezogene naturwissenschaftliche Grundbildung sowie eine umweltbezogene technische Allgemeinbildung zu befördern, Bewertungskompetenzen, Gestaltungskompetenzen, Naturwissenschaftsmündigkeit und Technikmündigkeit in Bezug auf eine nachhaltige Entwicklung zu stärken, Umweltbewusstsein zu fördern und Umwelthandeln zu motivieren. Sie sollte zudem altersgerechte berufsorientierende Anteile beinhalten.

Eine Reihe von Beispielen aus Förderprojekten der DBU zeigen die Möglichkeiten auf, diese Disziplinen und ihre Ziele miteinander zu spannenden und sinnstiftenden Umweltbildungsangeboten mit experimentellem Charakter zu verknüpfen. Eine besondere Bedeutung kommt hier den mehr als einhundert chemischen Schülerlaboren in Deutschland zu. In den Schülerlaboren NatLab der FU Berlin, FreiEx der Universität Bremen, Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor der TU Braunschweig, NanoBioLab der Universität des Saarlandes und dem Freilandlabor FLEX der Universität Siegen werden und wurden in den letzten zwei bis drei Jahren altersgerecht für verschiedene Klassenstufen fundierte experimentelle Umweltbildungsangebote im Rahmen von DBU-Projekten entwickelt und sind von Schulklassen oder von Kursen buchbar. Ein weiteres Beispiel für einen chemiebezogenen Umweltbildungsansatz ist die interaktive Wanderausstellung „T-Shirts, Tüten & Tenside – Die Ausstellung zur Nachhaltigen Chemie“ von DBU, GDCh, VCI und DECHEMA. Sie tourt derzeit durch Deutschland und thematisiert die Herausforderungen einer an Nachhaltigkeit orientierten Chemie im Überblick.

Chemische Produkte können aber auch direkt dabei helfen die Umwelt zu entlasten, zum Beispiel in einem der größten Umweltschutzprojekte unserer Generation – der Energiewende – tragen chemische Produkte dazu bei, sie zu gestalten: Mittels Photovol-

## VORWORT

taikzellen und Windrädern wird regenerativ Strom erzeugt, Dämmmaterialien helfen Energie einzusparen, Batterien und Akkumulatoren speichern Energie, um einige prominente Beispiele zu nennen.

Die Energiewende kann nur dann gut gelingen, wenn sie von politischer Seite transparent, sicher und zielorientiert gesteuert und von der Gesellschaft breit getragen wird. Dies setzt unter anderem eine gute wissenschaftliche Beratung der Politik voraus und eine Akzeptanz der Bevölkerung sowie eine solide Information der Menschen. Zwar ist die grundsätzlich breite Akzeptanz in der Bevölkerung für den Ausstieg aus der Kernenergie und den Umbau der Energiesysteme vorhanden – wie verschiedene Studien zeigen –, die konkrete Ausgestaltung wirft jedoch auch in der Gesellschaft Fragen auf. Damit diese Fragen sachlich diskutiert und politische Entscheidungen wissenschaftsbasiert von den Menschen bewertet werden können, bedarf es einer ausgewogenen, inhaltlich fundierten Information und einer professionellen Bildung.



**Dr. Heinrich Bottermann**

Geschäftsführer  
Deutsche Bundesstiftung  
Umwelt



**Ulrike Peters**

Deutsche Bundesstiftung  
Umwelt, Leiterin Referat  
Umweltinformations-  
vermittlung

Schülerlabore können hier eine wichtige Rolle übernehmen, die über einen reinen Wissenschaftstransfer deutlich hinausgeht. Als außerschulischer Lernort und als Ort von Lehreraus- und Lehrerfortbildungen können sie neue wissenschaftliche Erkenntnisse schnell in den außerschulischen und schulischen Unterricht transportieren. Ein fundiertes naturwissenschaftlich-technisches Grundwissen sowie die Fähigkeit, gesellschaftliche Zusammenhänge zu verstehen, die mit naturwissenschaftlichen Fragestellungen verknüpft sind, stellen Grundvoraussetzungen für die Teilnahme der Bürger an wichtigen gesellschaftlichen Diskussions- und Entscheidungsprozessen dar. Schülerlabore haben daher auch die Aufgabe, jungen Menschen eine Bildung zuteilwerden zu lassen, mit der sie die Grundlagen der Gesellschaft verstehen können.

Das breite Themengebiet „Chemie und Energie“ kann chemischen Schülerlaboren vielfältige Anknüpfungspunkte liefern, sich diesen Aufgaben im Sinne einer naturwissenschaftlichen Umweltbildung zu stellen. Diese Broschüre soll nun einen Beitrag für eine intensive Auseinandersetzung der Akteure in Schülerlaboren und Schulen mit dieser Auf-

gabe leisten. Sie beschreibt experimentelle pädagogische Angebote zum Themenspektrum „Umwelt und Energie“ in chemisch arbeitenden Schülerlaboren im deutschsprachigen Raum. Die Angaben basieren auf einer breiten Erhebung, die dankenswerter Weise unter der Federführung von Frau Prof. Dr. Petra Mischnick, TU Braunschweig, durchgeführt wurde. Es wird ein Überblick über bestehende Angebote gegeben, durch den deutlich wird, dass manche Themen mit dazugehörigen Experimenten zum Beispiel aus dem Gebiet Energieumwandlung oder Photovoltaik bereits in einer ganzen Reihe von Schülerlaboren angeboten werden. Andere Themen jedoch – so werden Sie bei weiterer Lektüre feststellen – sind entgegen ihrer ebenfalls großen Bedeutung für die Energiewende in Deutschland noch nicht oder kaum Gegenstand von Bildungsangeboten chemischer Schülerlabore. Die Erhebung und Diskussion des vorhandenen Spektrums derzeitiger Bildungsangebote in den chemischen Schülerlaboren zeigt also auch auf, wo ggf. noch Lücken sind, die gefüllt werden können und sollten, damit die Relevanz der Energiewende im Fächerbezug der Chemie vermehrt Einzug in die außerschulische Bildung und den schulischen Unterricht hält.

*Ulrike Peters* *Ulrike Peters*

Die Studie „Chemie und Energie in Schülerlaboren“, dessen Ergebnisse in dieser Broschüre dokumentiert werden, vereint zwei Themen, die für die Gesellschaft Deutscher Chemiker von hoher Relevanz sind: Die große Bedeutung der Beiträge aus der Chemie zur Energieversorgung der Zukunft darzustellen sowie das naturwissenschaftliche und insbesondere chemische Verständnis bereits in der schulischen Ausbildung zu fördern. Die GDCh hat sich daher gerne bereit erklärt, dieses Projekt zu unterstützen und ihren Beitrag zu leisten, die Ergebnisse des Projekts einer größeren Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Schülerlabore, also zumeist außerschulische Lernorte, in denen Schülerinnen und Schüler selbstständig experimentieren können und somit eigenständig Erfahrungen im Umgang mit naturwissenschaftlichen Fragestellungen sammeln, erfreuen sich seit vielen Jahren einer wachsenden Beliebtheit. Sie sind ein erfolgreiches Werkzeug, um jungen Menschen naturwissenschaftliche Inhalte und naturwissenschaftliches Denken auf attraktive Weise näherzubringen und ihnen ein Verständnis für die Rollen von Chemie und anderen Naturwissenschaften für die Lösung der großen Herausforderungen unserer Zeit zu vermitteln. Daher ist es wünschenswert, dass in Schülerlaboren auch gezielt aktuelle Fragestellungen aufgegriffen werden. Die Schülerinnen und Schüler erhalten dadurch wichtige Einblicke und Kompetenzen, um die wissenschaftlichen Grundlagen der entsprechenden politischen und gesellschaftlichen Diskussionen besser zu verstehen bzw. sich an diesen zu beteiligen.

Die Rolle der Chemie für die Energieversorgung der Zukunft ist hierfür besonders geeignet. Handelt es sich hier doch um eines der drängendsten Herausforderungen, mit denen wir uns auseinandersetzen müssen. Fossile Energieträger sind begrenzt und neue Verfahren und Technologien zur Bereitstellung, Speicherung und effizienten Nutzung von Energie werden dringend benötigt. Die Chemie als Querschnittswissenschaft spielt bei all diesen Themen eine herausragende Rolle. So etwa bei der Synthese von Kraftstoffen aus Biomasse, der Nutzung des Sonnenlichts in der Photovoltaik, der Speicherung von Elektrizität in Batterien oder der Entwicklung neuer Materialien zur effizienteren Nutzung der Energie, beispielsweise in neuen Leuchtstoffen, Leicht-

bauwerkstoffen für Anwendungen aus der Mobilität oder zur Wärmedämmung. Überall sind neue Entwicklungen und Durchbrüche in der Chemie nötig, oder, wie an anderer Stelle einmal treffend zusammengefasst: Unsere zukünftige Energieversorgung wird noch chemischer werden.

Diese Tatsache ist allerdings in der breiten Öffentlichkeit noch nicht in ausreichendem Maß angekommen. Umso wichtiger, auch im Chemieunterricht sowie den ergänzenden Angeboten der Schülerlabore diesen Themenkomplex aufzugreifen und die Schülerinnen und Schüler mit den Möglichkeiten und Chancen, die die Chemie bietet, vertraut zu machen. Dies ist auch deswegen zu begrüßen, weil Chemie dadurch in einem positiv belegten Kontext thematisiert wird, nämlich als wichtiger und entscheidender Teil der Lösung und Voraussetzung für eine globale nachhaltige Entwicklung und nicht, wie landläufig noch häufig vorherrschend, als Problemverursacher. Dies spricht Jugendliche an und hilft, die Chemie als Fach attraktiver zu machen und dadurch die Zahl derjenigen, die sich für einen Beruf in der Chemie entscheiden zu erhöhen.

Die vorliegende Broschüre wendet sich an alle in Schulen und vor allem an außerschulischen Lernorten Engagierte. Sie vermittelt einen Einblick in aktuelle Themen der chemischen Energieforschung und wie diese Inhalte in Schülerlabore Eingang finden können. Damit leistet sie auch einen wichtigen Beitrag für den satzungsgemäßen Auftrag der GDCh, die chemieorientierte Ausbildung zu fördern und bietet wertvolle Anstöße zur Weiterentwicklung der Schülerlabore. Ich hoffe daher, die Broschüre findet die gewünschte breite Resonanz, die sie ohne Zweifel verdient hat.

*Wolfram Koch*



**Wolfram Koch**

Geschäftsführer der  
Gesellschaft Deutscher  
Chemiker e.V.

# INHALT

KAPITEL	SEITE
<b>Vorwort</b> .....	<b>3</b>
Dr. Heinrich Bottermann, Geschäftsführer der DBU und Ulrike Peters, Leiterin Referat Umweltinformationsvermittlung der DBU	
<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
Prof. Dr. Wolfram Koch, Geschäftsführer der GDCh	
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>1 Experimentelle Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren – Was gibt es?</b> .....	<b>11</b>
Ilka Deusing-Gottschalk, Petra Mischnick, Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor, Technische Universität Braunschweig	
<b>2 Stimmen aus der Fachwissenschaft</b>	
2.1 Biomassekonversion .....	31
Ferdinand Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim a. d. Ruhr	
 Herstellung von Biodiesel aus Rapsöl .....	33
2.2 Brennstoffzellen und Batterien.....	35
Ulrike Krewer, Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik, Technische Universität Braunschweig Uwe Schröder, Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie, Technische Universität Braunschweig	
 Redox-Flow-Batterie.....	39
2.3 Elektrochemische Wasserstofftechnologie.....	41
Hermann Pütter, Neustadt	
 Photovoltaische Gewinnung von Wasserstoff und seine Nutzung.....	45
2.4 Ressourcenstrategien für eine chemisch-energetische Transformation – Batterien und Brennstoffzellen - alles nur eine Frage der Chemie? – .....	47
Armin Reller, Institut für Physik, Lehrstuhl für Ressourcenstrategie, Universität Augsburg	
 Kupferrecycling aus Elektronikschrott .....	49
2.5 ‚Intelligente‘ Materialien.....	51
Petra Mischnick, Institut für Lebensmittelchemie, Technische Universität Braunschweig	
 Wärmespeicherung mit Phasenwechselmaterialien .....	53
<b>3 Stimmen aus Hochschuldidaktik, Schülerlabor und Schule</b>	
3.1 Photoprozesse als Kernthema .....	57
Michael W. Tausch, Chemie und ihre Didaktik, FG Chemie und Biologie, Bergische Universität Wuppertal	
 Farbstoffsolarzelle nach Grätzel.....	61

KAPITEL	SEITE
3.2 Chemie und Energie – Eine Reflexion aus fachdidaktischer Perspektive.....	63
Ilka Parchmann, IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Universität Kiel	
 Experimente mit Wind- und Solarenergie.....	67
3.3 Chemie und Energie – Die Sicht der Hochschuldidaktik.....	69
Marco Oetken, Institut für Biologie, Chemie, Geographie und Physik, Abteilung Chemie, Pädagogische Hochschule Freiburg	
 Bioethanol als alternativer Treibstoff.....	71
3.4 Chemie und Energie – Welchen Beitrag leisten, welches Potenzial haben die Schülerlabore?.....	73
Rolf Hempelmann, Lehrstuhl für Physikalische Chemie, Universität Saarbrücken; Vorsitzender Lernort Labor, Bundesverband der Schülerlabore e.V.	
 Betrieb einer Brennstoffzelle.....	79
3.5 Was bedeutet das Schülerlabor für die Schule? .....	81
Petra Schille, Realschule Maschstraße Braunschweig; Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor, TU Braunschweig	
 Das E-Bobbycar-Projekt.....	83
<b>4 Was gibt es noch?</b>	
4.1 Schulpartnerschaft .....	87
Sabine Bertram, Fonds der Chemischen Industrie	
4.2 Projekt energie.bildung .....	89
Verena Niesel, Didaktisches Zentrum Universität Oldenburg Michael Komorek, Physikdidaktik Universität Oldenburg, Arbeitsstelle Energiebildung	
4.3 Wanderausstellung: „T-Shirts, Tüten und Tenside“.....	91
Ulrike Peters, Deutsche Bundesstiftung Umwelt	
<b>5 Experimentelle Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren – Was ist zu tun?.....</b>	<b>95</b>
Ilka Deusing-Gottschalk, Petra Mischnick, Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor, Technische Universität Braunschweig	
<b>6 Dank.....</b>	<b>101</b>

**Anhang: CD**

- 1 Experimentelle Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren – Was gibt es?
- 2 Fragebogen
- 3 Zusammenstellung der Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren und Literaturübersicht



**EXPERIMENTELLE  
ANGEBOTE ZU  
,CHEMIE UND ENERGIE'  
IN SCHÜLERLABOREN  
– WAS GIBT ES?**





### Wie dieses Projekt entstand...

Die Energiewende ist in aller Munde und (fast) jeder ist dafür. Doch was steckt eigentlich dahinter? Was bedeutet sie für jeden Einzelnen? Wirkliches Verständnis für Umfang und Komplexität dafür ist sicherlich nicht bei jedem vorhanden. Ein jeder sieht zunächst den Teil, der ihn selbst betrifft, und setzt dementsprechend seine Prioritäten. Der Blick für das Ganze ist oft verstellt (Abb. 1).

Wer „macht“ eigentlich die Energiewende? Woher wissen die Techniker, was sie tun müssen? Welche Voraussetzungen müssen geschaffen werden? Die Rolle der Chemie in der angestrebten Energiewende wird oft nur am Rande erwähnt. Ist sie etwa nur eine „Hilfswissenschaft“? Woran liegt es, dass dieser Eindruck entsteht?

Energie ist klassischerweise ein Thema des Physikunterrichts. Dort lernen SchülerInnen die unterschiedlichen Energieformen und den Energieerhaltungssatz kennen und wie sich Energie von einer Form in eine andere umwandeln lässt. Chemie dagegen ist die Lehre, die sich mit den Eigenschaften und der Umwandlung von Stoffen befasst. So kann für manche SchülerInnen der Eindruck entstehen, dass Energie und Chemie nicht viel miteinander zu schaffen haben.

Doch viele noch bestehende Aufgaben beim Übergang zu den Erneuerbaren Energien sind chemischer Natur und müssen von Chemikerinnen und Chemikern gelöst werden. In der chemischen Forschung werden die Grundlagen für effiziente Energiespeichersysteme entwickelt. Dazu gehören Akkumulatoren genauso wie chemische Wärmespeicher und vieles andere. Aus nachwachsenden Rohstoffen werden in vielen Prozessschritten Kraftstoffe. Für die Umwandlung von Energieformen wie Licht- oder chemischer Energie in elektrische Energie werden leistungsfähige Systeme mit Solarzellen oder Brennstoffzellen benötigt. Die Chemie stellt die notwendigen Materialien dafür zur Verfügung. Chemie ist eine grundlegende Wissenschaft der interdisziplinären Materialforschung. Neue Entwicklungen ‚intelligenter‘ Materialien helfen, Energie effizienter zu nutzen. Wenn es um Fragen der Energie geht, mischt die Chemie also immer mit.

Als an Chemie interessierte und von den Möglichkeiten der Chemie faszinierte Men-

schen ist es unser Anliegen, diesen Gedanken als selbstverständlich in den Köpfen der SchülerInnen (und nicht nur in deren) zu verankern. Und wie bei vielen Sachen gilt:

... je früher, desto besser!

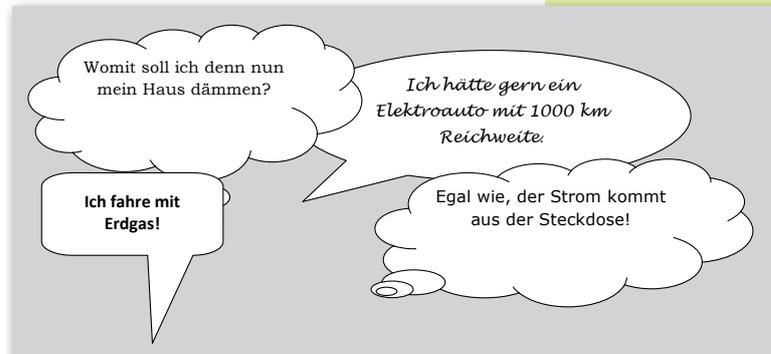


Abb. 1: Gedanken zur Energiewende

### ... sein Hintergrund ...

Die Themen Nachhaltigkeit und damit auch Ressourcenschonung und Energieversorgung sind schon länger Gegenstand der Diskussion um Bildungsstandards und Zielkompetenzen. Mit Blick auf die Energiewende hat ihre Bedeutung aber noch einmal deutlich zugenommen. Die Notwendigkeit eines nachhaltigen Umgangs mit unseren Ressourcen muss jedem bewusst sein. Dafür sollte bereits in der Schulzeit das Fundament geschaffen werden, indem hier möglichst ideologiefrei die naturwissenschaftlichen Grundlagen verknüpft mit aktuellen Entwicklungen vermittelt werden.

Im gesamten primären Ausbildungssektor sollte daher der entsprechenden Bildungsvermittlung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Zu Fragen der „Energiegewinnung“ und „-einsparung“<sup>1</sup> leistet die Chemie unverzichtbare Beiträge, auch wenn diese nicht immer offensichtlich sind. Materialien, ihre Herstellung, ihre Eigenschaften und ihre Entsorgung sind für alle diese Bereiche von essentieller Bedeutung und berühren damit Kernkompetenzen der Chemie. Die gestiegene Sensibilisierung für diese Themenfelder äußert sich auch in Aktivitäten der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh). So soll die GDCh-Fachgruppe „Nachhaltige Chemie“ dieses Schlüsselthema stärker in die Öffentlichkeit tragen. Der Arbeitskreis „Chemie und Energie“ legt seinen Schwerpunkt noch stärker auf die genannten Aspekte. Beim 2013 erschienenen Themenheft „Von Kohlehalden

<sup>1</sup> Zwar lässt sich Energie nur aus einer Energieform in eine andere umwandeln, dennoch verwenden wir hier aufgrund ihrer weiten Verbreitung auch die Begriffe „Energiegewinnung“ und „Energieeinsparung“.

## EXPERIMENTELLE ANGEBOTE ZU ‚CHEMIE UND ENERGIE‘ IN SCHÜLERLABOREN WAS GIBT ES?

und Wasserstoff“, das Energiebereitstellung und Speichertechnologien behandelt, hat die GDCh ebenfalls mitgewirkt. Der Fonds der Chemischen Industrie, der seit vielen Jahren neben dem Chemieunterricht an Schulen und Nachwuchswissenschaftlern auch Schülerlabore fördert, hat das Themenfeld ebenfalls im Blick. Auch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU), deren Zweck die Förderung innovativer beispielhafter Projekte zum Umweltschutz ist, hat sich in den vergangenen Jahren in diesem Bereich stark engagiert, z.B. in Projekten wie „Sonne ist Leben – Kompetenzen zum Thema Erneuerbare Energie in der Grundschule interdisziplinär fördern“, „Berufsausbildung im Kontext der Energiewende“, „Strategische Metalle im Schülerlabor und Flying Science Circus“, „Entdeckendes Lernen zum Thema Erneuerbare Energie im Elementar- und Primarbereich im ELISA und KIGA-Lab der Universität Bremen“ u.v.a.m.

Die außerschulischen Lernorte bieten Schulen insbesondere im experimentellen Bereich eine attraktive Ergänzung des naturwissenschaftlichen Unterrichts, die bei guter Kooperation auch unmittelbar auf das Unterrichtsgeschehen in den Schulen zurückwirkt. Allerdings gibt es bisher kein systematisches und abgestimmtes Vorgehen. Trotz zahlreicher Aktivitäten zur Verbreitung und Stärkung der Erfassung, Zusammenarbeit und Kommunikation (Bundesverband der Schülerlabore LernortLabor, Tagungen fördernder Stiftungen wie „Stadt der jungen Forscher“ u.a.) gab es bisher keine Übersicht zum experimentellen Angebot auf dem Themenfeld ‚Chemie und Energie‘.

### ... und seine Ziele

Dieses Projekt, das von der DBU gefördert und zusätzlich von der GDCh unterstützt wurde, soll diese Lücke schließen. Ziel ist es, einen repräsentativen Überblick über bereits vorhandene Angebote zu gewinnen, die das Thema Energie in seinem chemischen Kontext behandeln. Im Mittelpunkt stehen die experimentellen Angebote der außerschulischen Lernorte („Schülerlabore“) zur Vermittlung dieser Kenntnisse und Konzepte. Diese wurden auf Grundlage einer Literaturrecherche über eine Internetbasierte Befragung der bei Lernort-Labor registrierten Schülerlabore erfasst. Es wird dargelegt, welche experimentellen Angebote es an außerschulischen Lernorten zum Themenbereich ‚Chemie und Energie‘ zurzeit gibt. ExpertInnen aus einschlägigen Fachwissenschaften

kommentieren in diesem Heft mit Blick auf die zusammengefassten Ergebnisse die Bedeutung und die Entwicklung der verschiedenen Themenfelder aus ihrer Sicht. Unterstützt durch ExpertInnen aus der Hochschuldidaktik, von Schülerlaboren und von LehrerInnen aus der Schule erfolgt eine Einschätzung, um zu erkennen, ob die zukunftsweisenden, wichtigen Themen abgedeckt sind. Die Themenbereiche, die fehlen oder unterrepräsentiert sind, werden ermittelt, um in einer abschließenden Betrachtung den Entwicklungsbedarf aufzuzeigen. Dies geschieht auch mit Blick auf das Alter der Zielgruppen.

Die Erkenntnisse und Stellungnahmen sind in dieser Broschüre abschließend zusammengefasst. Um die Ergebnisse nutzbar zu machen, enthält sie auch eine Übersicht der im Projekt zusammengetragenen Daten in elektronischer Form.

Dieses Projekt erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit der Recherche. Der Fokus liegt auf den Angeboten der Schülerlabore. Die Inhalte der Experimente und die Art ihrer Vermittlung werden nicht bewertet. Ein Abgleich mit Lehrplänen erfolgt ebenso wenig wie eine Auseinandersetzung mit lerntheoretischen Methoden oder der Vermittlung des Energiekonzeptes in der Chemie versus Physik.

Aspekte der Kernkraft – eine existierende und trotz des bundesdeutschen Ausstiegs global wachsende Form der Energieversorgung – werden in diesem Projekt nicht behandelt, da sie nicht Gegenstand von Schülerexperimenten sind. Auch das Feld des Energietransports wird nicht einbezogen.

### Konzept

Das Projekt war in sechs Stufen angelegt:

1. *Literaturrecherche mit dem Ziel, einen grundsätzlichen Überblick über das Themengebiet ‚Chemie und Energie‘ zu erhalten*
2. *Identifizierung der Kernthemen als Grundlage für die Erstellung des Fragebogens*
3. *Umfrage in Schülerlaboren und die Auswertung der eingehenden Antworten*
4. *Einschätzung und Kommentierung der Umfrageergebnisse durch ExpertInnen aus Fachwissenschaft und Chemiedidaktik sowie aus Sicht der Schülerlabore und Schule*
5. *Dokumentation und Veröffentlichung aller Ergebnisse in einer Broschüre (inklusive Bereitstellung der Daten in elektronischer Form)*

6. Präsentation und Diskussion im Rahmen einer Tagung.

### Literaturrecherche in Fachzeitschriften der Chemiedidaktik

Am Beginn des Projekts stand eine Literaturrecherche in einigen ausgewählten Fachzeitschriften der Chemiedidaktik. Ihr Ziel war es, ohne Anspruch auf Vollständigkeit einen Überblick über die experimentellen Angebote auf dem Gebiet ‚Chemie und Energie‘ zu gewinnen und Themenfelder/ Kategorien für die Strukturierung des Fragebogens zu identifizieren.

So ergab die Recherche in den exemplarisch ausgewählten einschlägigen Zeitschriften für den Zeitraum 2009–2013 einen groben Überblick darüber, welche Themen und Schwerpunkte aktuell in den Chemiedidaktiken der Universitäten bearbeitet werden. Diese Literatursammlung wurde später noch um Beiträge der auf diesem Feld besonders aktiven Arbeitsgruppen Oetken und Tausch ergänzt und ist im elektronischen Material verfügbar.

Es gibt viele (Fach-)Zeitschriften, die sich mit Chemie und ihrer Didaktik befassen, deren Zielgruppen und Konzepte unterschiedlich sind. Daher wurde zunächst eine breite Auswahl solcher Fachzeitschriften gesichtet, sodass Schwerpunkte und Konzepte erkannt und die Eignung der jeweiligen Zeitschrift eingeschätzt werden konnten.

Insbesondere die angelsächsischen Fachzeitschriften (‚International Journal of Science Education‘, ‚Journal of Chemical Education‘, ‚Science Education‘) erwiesen sich für unser Anliegen als weniger geeignet, da sie wenig projektbezogene Inhalte und ein eher theorieorientiertes Konzept aufweisen. Außerdem ist das Wissensniveau oft oberhalb des primären Bildungssektors angesiedelt und eher der studentischen Ausbildung angemessen.

Die ‚Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften‘ berücksichtigt physikalische, chemische und biologische Themen. Sie bietet jedoch wenig experimentelle Anregungen. Die Zeitschrift ‚Chemie in unserer Zeit‘ bietet eine große Themenvielfalt und viele Hintergrundinformationen, enthält aber kaum Artikel mit didaktischem oder experimentellem Bezug.

Entscheidend für die Auswahl war die Anzahl der Artikel, die einen Bezug zum Projekt-

thema haben. So wurde der Kreis der Zeitschriften eingegrenzt, die die Grundlage der Recherche bilden sollten.

Vier Zeitschriften erwiesen sich als geeignete Quellen, um einen grundlegenden Überblick über aktuelle Themen zu ‚Chemie und Energie‘ zu erhalten:

1. *Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule (PdN-ChiS)*
2. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie (NiU-C)*
3. *Chemie konkret (CHEMKON)*
4. *Mathematischer und naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU)*

In diesen vier Zeitschriften wird der Chemie ein großer Stellenwert eingeräumt, umwelt- oder energierelevante Themen werden mit unterschiedlicher Häufigkeit behandelt; alle weisen eine große Nähe zum Schulunterricht auf. Abgesehen von der Zeitschrift MNU sind viele experimentelle Anregungen zu finden, besonders in der Zeitschrift CHEMKON, der Mitgliederzeitschrift der Fachgruppe Chemieunterricht in der GDCh. Die einzelnen Hefte der Zeitschriftenreihen PdN-ChiS und NiU-C besitzen jeweils einen Themenschwerpunkt. Hierunter sind mehrere projektrelevante Themenhefte zu finden (Tab. 1). Diese vier Fachzeitschriften wurden daher für die Literaturrecherche ausgewählt.

Die Recherche umfasste jeweils die letzten fünf Jahrgänge der Zeitschriften, also die Jahre 2009 bis 2013. Teilweise wurden auch ältere Veröffentlichungen berücksichtigt, wenn diese aufgrund von Verweisen im Verlauf der Recherche als relevant auffielen.

Diese Beiträge ließen sich grob den vier Themenfeldern **Katalyse, Energiewandlung, Energiespeicherung und ‚Intelligente‘ Materialien** zuordnen, wobei manche Artikel mehrere dieser Aspekte betrafen. In den einzelnen Kategorien ließen sich erwartungsgemäß jeweils mehrere Schwerpunktthemen ausmachen.

Die energetischen Aspekte sind bei der Katalyse grundsätzlich immer bedeutsam, da ein Katalysator die Aktivierungsenergie einer chemischen Reaktion senkt. Dass damit nicht nur ein Phänomen beschrieben wird, sondern Katalysatoren so auch helfen können, in der Produktion von Stoffen im großen Maßstab

## EXPERIMENTELLE ANGEBOTE ZU ‚CHEMIE UND ENERGIE‘ IN SCHÜLERLABOREN WAS GIBT ES?

Energie einzusparen, wird dabei nicht automatisch thematisiert. Die Katalysatorforschung zielt jedoch oft darauf, gehemmte chemische Prozesse überhaupt erst möglich zu machen. Aktuell besteht hier großes Interesse an der Umsetzung von  $\text{CO}_2$  zu Methan oder Methanol oder der Darstellung von Ameisensäure

Tab. 1: Übersicht über projektrelevante Schwerpunktthemen in den Zeitschriften PdN-ChiS und NiU-C in den vergangenen Jahren

Fachzeitschrift	Jahr (Volume)	Heft	Schwerpunktthema
PdN-ChiS	2010 (59)	2	Solarzellen
PdN-ChiS	2010 (59)	8	Farbstoffe
PdN-ChiS	2011 (60)	1	Katalyse und Nachhaltigkeit
PdN-ChiS	2011 (60)	4	Perspektiven nachhaltiger Entwicklung
PdN-ChiS	2011 (60)	5	Ressourcen und Nachhaltigkeit
PdN-ChiS	2012 (61)	2	Gleichgewichte
PdN-ChiS	2013 (62)	5	Batteriesysteme
NiU-C	2010 (21)	21	Basiskonzepte Energie
NiU-C	2011 (22)	116	Wärmespeicher

als Wasserstoffspeicher. Die Entwicklung von neuen Katalysatoren ist also ein sehr wichtiges Gebiet. Neben der Entwicklung von neuen, effizienteren Katalysatoren für etablierte Prozesse spielen vor allem katalytische Photoreaktionen (Abb. 2) eine bedeutende Rolle (s. Kap. 3.1, Tausch). So hat das Themenheft ‚Katalyse und Nachhaltigkeit‘ der Zeitschrift PdN-ChiS den Schwerpunkt Photokatalyse, das Themenheft ‚Gleichgewichte‘ legt seinen Schwerpunkt auf photostationäre Gleichgewichte. Auch in früheren Jahren waren schon Themenhefte erschienen, in denen photochemische Prozesse thematisiert worden sind, jedoch in geringerer Anzahl. Für Januar 2015 ist in der gleichen Rei-

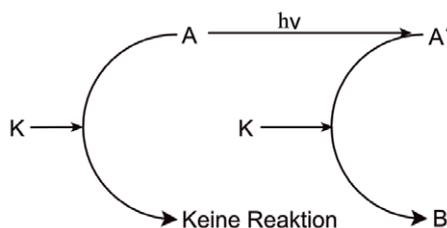


Abb. 2: Schema einer katalytischen Photoreaktion (A Substrat; A' angeregtes Substrat; K Katalysator; B Produkt)

he ein Themenheft mit dem Titel ‚All We Need Is Light‘ geplant (Information von Prof. Tausch, Herausgeber der PdN-ChiS).

Auch im Bereich der Energiewandlung spielen photochemische Prozesse schon länger eine große Rolle, wie das PdN-ChiS-Themenheft ‚Solarzellen‘ aus dem Jahr 2010 zeigt. Neben der Photovoltaik werden inzwischen auch Brennstoffzellen sehr häufig behandelt.

Mit der Bereitstellung von Technologien zur Speicherung von Energie steht und fällt die anstehende Energiewende. Nur wenn es gelingt, Energie aus regenerativen Quellen wie Sonne, Wind oder Wasser in ausreichendem Maße zu speichern, kann die Energiewende gelingen. Denn nur dann ist gewährleistet, dass Energie unabhängig von ihrer Erzeugung – und zwar zeitlich und räumlich – zuverlässig zur Verfügung steht. Energie in Form von Wärme zu speichern, ist schon lange gängige Praxis, das findet quasi in jedem Haushalt statt. Auch über die praktischen Handwärmer im Taschenformat (latente Wärmespeicher) hat sich im Winter schon mancher gefreut (Abb. 3). Aber auch im großen Maßstab wird diese Art der Energiespeicherung wichtiger. Im NiU-C-Themenheft über Wärmespeicher erhält man einen Eindruck davon, wie vielfältig die Methoden – sowohl physikalischer als auch chemischer Art zur Speicherung von Wärme sind.

In einem PdN-ChiS-Themenheft aus 2011 werden unter dem Titel ‚Perspektiven nachhaltiger Entwicklung‘ sowohl Methoden der chemischen als auch der elektrochemischen Energiespeicherung behandelt. Biotreibstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind als chemische Energiespeicher schon Stand der Technik, aber aus verschiedenen Gründen in der Chemiedidaktik weiterhin hochaktuell. Die elektrochemische Energiespeicherung in Batterien bzw. Akkumulatoren ist ebenfalls bekannt. Mit dem PdN-ChiS-Themenheft ‚Batteriesysteme‘ aus 2013 zeigt sich aber auch hier die Aktualität des Themas in der Chemiedidaktik.

In der Kategorie ‚Intelligente‘ Materialien stehen nicht wie bei den anderen Themen Prozesse im Vordergrund, sondern Materialien. Als ‚Intelligente‘ Materialien bezeichnen wir funktionelle Materialien, die unter energierelevanten Aspekten essentiell für neue Technologien sind bzw. den Energiebedarf senken, weil sie besondere und notwendige physikalisch-chemische

mische Eigenschaften haben. Hierher gehören z.B. ultraleichte Materialien, deren Verwendung den Energiebedarf im Bereich Transport und Mobilität reduziert, effiziente Wärmedämmstoffe oder Thermoelektrika, aber auch Membranen für Brennstoffzellen oder besonders starke Permanentmagnete für den getriebelosen Betrieb von Windkraftträdern. Hier liegt ein leicht zu übersehender Beitrag der Chemie, Energiefragen zu lösen. In den genannten Fachzeitschriften waren überwiegend Beiträge zu den Themen ‚Organische LED‘ und zu neuen Solarzelltypen wie Kunststoffsolarzellen oder farbstoffsensibilisierten Solarzellen zu verzeichnen. Die PdN-ChiS-Themenhefte ‚Solarzellen‘ und ‚Farbstoffe‘ nehmen sich ebenfalls dieser Materialien an.

### Aktuelle energierelevante Themen in der chemischen Fachwissenschaft

Um möglichst alle aus Sicht der Chemie aktuellen Fachgebiete, die sich mit Energiethematen beschäftigen, zu berücksichtigen, wurden die Themenhefte der ‚Aktuellen Wochenschau/HIGHCHEM hautnah‘ der GDCh gesichtet. In diesen Heften werden die Beiträge der ‚Aktuellen Wochenschau‘, in der ein bestimmtes Themengebiet von Experten dieses Gebietes umfassend erläutert und beleuchtet wird, im Folgejahr veröffentlicht. Für das Thema ‚Chemie und Energie‘ waren die Hefte ‚Elektrochemie und Energie‘ (2006/2007), ‚Nachhaltige Chemie‘ (2008/09) und ‚Chemie und Energie‘ (2010/11) relevant.

Die in den Zeitschriften zum Chemieunterricht identifizierten Themenfelder wurden um Aspekte aus diesen fachlich und gesellschaftlich orientierten Themenheften noch erweitert. So wurden elektrokatalytische Prozesse und Biokatalyse als relevante Spezifizierungen der Kategorie Katalyse mit aufgenommen. Auf dem Gebiet der Energiespeicherung waren vor allem Akkumulatoren mit verbesserten Eigenschaften, z.B. hinsichtlich ihrer Lebensdauer und ihrer Energiedichte, ein wichtiges Thema. Aber auch Supercaps, also besonders leistungsfähige Kondensatoren, oder das Prinzip der Hydrothermalen Carbonisierung wurden einbezogen. Die Speicherung des Wasserstoffs – und zwar nicht die physikalische, sondern die chemische – spielt eine wichtige Rolle beim Dauerbrenner Wasserstofftechnik.

Unter dem Stichwort ‚Intelligente‘ Materialien lässt sich eine Vielfalt von Themen sub-

sumieren, zu denen es in den Themenheften viele Anregungen gab. Metallorganische Gerüstverbindungen (MOF), wärmedämmende Materialien, thermoelektrische Materialien und ultraleichte Materialien wurden explizit als Unterkategorien in den Fragebogen aufgenommen. Das alles sind Stoffe, die in ‚intelligenter‘ Weise neue Anwendungen oder Technologien ermöglichen oder bestehende verbessern und damit einen entscheidenden Beitrag zur Einführung regenerativer Energien oder der Reduzierung des Energiebedarfs leisten.

Viele Anwendungen im Energiesektor erfordern den Einsatz spezieller Rohstoffe wie z.B. Edelmetalle oder Seltene Erdmetalle. Die langfristige Sicherstellung der Versorgung mit diesen Rohstoffen ist also für eine erfolgreiche Umsetzung einer bezahlbaren Energiewende unabdingbar und stellt damit auch einen wichtigen Aspekt des Themas ‚Chemie und Energie‘ mit gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Implikationen dar. Einige dieser Rohstoffe sind selten bzw. nur in wenigen Regionen vorkommend oder ihre Gewinnung ist aufwendig und damit teuer und geht teils mit enormen Belastungen von Menschen und Umwelt einher. Daher sind das Recycling von z.B. Elektronikschrott und die anschließende Wiederverwertung der Rohstoffe als sogenannte Sekundärrohstoffe ausgesprochen wichtig. Diese Aspekte werden unter der Kategorie ‚Recycling und Einsatz von Sekundärrohstoffen‘ zusammengefasst. Die wichtigen Verfahren der Wiedergewinnung von Metallen und des Kunststoffrecyclings wurden als Unterpunkte aufgenommen.

Der Abgleich der Ergebnisse beider Recherchen in den didaktischen und den genannten fachwissenschaftlichen Themenheften hatte bereits einen ersten Hinweis darauf geben, wo es möglicherweise ‚weiße Flecken‘ auf der Landkarte der experimentellen Angebote für SchülerInnen gibt. Der Fragenkatalog wurde entsprechend dieser Gesamtrecherche strukturiert, es wurde aber auch immer Raum für freie Angaben gegeben, um nicht nur zu erfassen, was ausdrücklich abgefragt war.



Abb. 3: Latentwärmespeicher in Taschenformat mit Natriumacetat-Trihydrat

Einige Themen lassen sich mehr als einer Kategorie zuordnen. So lassen sich Energiewandlung und Energiespeicherung nicht immer voneinander abgrenzen, weil bei der Speicherung oft auch gleichzeitig eine Energiewandlung stattfindet. Und bei der Photovoltaik findet eine Umwandlung von Energie statt, während die dafür eingesetzten Kunststoffszellzellen ein Beispiel für ‚Intelligente‘ Materialien sind. Hier wird einerseits eine interessante Umwandlung beschrieben, aber im Mittelpunkt steht das Material, das diese Umwandlung erst ermöglicht, so wie alle diese energierelevanten Materialien erst durch den Kontext zu solchen werden.

Bei der Einordnung eines Experiments wurde darum gebeten, das Experiment jeweils nach dem Aspekt einzuordnen, der im Mittelpunkt steht. Für das Beispiel Kunststoffszellzellen gilt also: Wenn der Materialaspekt im Experiment für den Chemieunterricht im Mittelpunkt steht, sollen sie in der Kategorie ‚Intelligente‘ Materialien genannt werden. Ist das Prinzip der Photovoltaik Thema, handelt es sich um ein Experiment zur Energiewandlung. Die Übergänge sind fließend und nicht immer eindeutig.

### Kategorisierung der relevanten Themengebiete

Zur Kategorie **Katalyse** gibt es folgende Schwerpunkte:

- *Metallkatalysatoren*
- *Elektrokatalyse*
- *Biokatalyse*
- *Photokatalyse*

Prozesse unter Verwendung eines Katalysators haben einen wichtigen Stellenwert in der Chemie, der Bereich Katalyse weist per se einen Bezug zum Thema Chemie und Energie auf. Dennoch sollten nicht sämtliche Experimente, in denen ein Katalysator eingesetzt wird, erfasst werden. Entscheidend für die Relevanz für unsere Erhebung ist der Aspekt der „Energieeinsparung“ im Gesamtprozess. Dieser sollte im Blickpunkt des Experiments stehen. Experimente mit lange bekannten und praxisbewährten Katalysatoren – oft Metallkatalysatoren – können ebenso dazu zählen wie neu entwickelte Katalysatoren, die neue Perspektiven eröffnen.

Eine wichtige Rolle im Bereich ‚Chemie und Energie‘ spielen elektrochemische Prozesse,

wie sie in Brennstoffzellen ablaufen. Auch hier zeigt sich wieder, dass ein Thema und damit ein Experiment Bezüge zu mehreren Kategorien besitzen kann. Stehen die elektrochemischen Prozesse an der Membran im Fokus des Experiments, sollte es eher der Elektrokatalyse zugeordnet werden. Ist dagegen die Brennstoffzelle als ganze entscheidend – je nach Altersstufe der angesprochenen SchülerInnen vielleicht sogar als „Black box“ –, ist das Experiment der Energiewandlung zuzuordnen. Aber auch Photokatalyse – dazu gehören Stichworte wie „Light to Hydrogen“ oder Grätzelzelle – und Biokatalyse sind wichtige Schlagworte in diesem Themenbereich. Klassiker – und beiden Begriffen zuzuordnen – ist die Photosynthese.

Zur Kategorie **„Energiegewinnung“ bzw. Energiewandlung** gibt es folgende Schwerpunkte:

- *Brennstoffzellen*
- *Photovoltaik*

Zentraler Aspekt der Energiewende ist der Ausbau alternativer Formen der „Energiegewinnung“ bzw. Energiewandlung. Ihr Ziel ist in Deutschland zum einen, Energie aus Kernkraft zu substituieren, zum anderen die Abhängigkeit von den endlichen fossilen Energieträgern zu senken und so den Ausstoß des Klimagases CO<sub>2</sub> zu reduzieren. Außer der Sonne dienen Windenergie, Wasserkraft (potentielle Energie) thermische Energie (Geothermie) und als alternativer chemischer Energieträger die Biomasse als regenerative bzw. „unerschöpfliche“ Energiequellen. Für die Energiewende spielt die Versorgung mit elektrischer Energie eine entscheidende Rolle. Hierzu können z.B. Windkraftträder, die Photovoltaik und Brennstoffzellen einen wichtigen Beitrag leisten, womit der Wasserstoff als Energieträger ins Spiel kommt.

Durch die Umsetzung von Biomasse zu anderen, für die Umwandlung in kinetische Energie in Motoren besser geeignete chemische Energiespeicher, die in Prozessen wie z.B. dem Biomass-to-liquid-Verfahren erfolgt, können Kraftstoffe statt aus fossilen aus regenerativen Quellen gewonnen werden. Nachwachsende Rohstoffe bzw. die daraus gewonnenen Biotreibstoffe selbst stellen somit stoffliche Energieträger dar und wurden deshalb unter die Kategorie Energiespeicherung eingeordnet.

Zur Kategorie **Energiespeicherung** gibt es folgende Schwerpunkte:

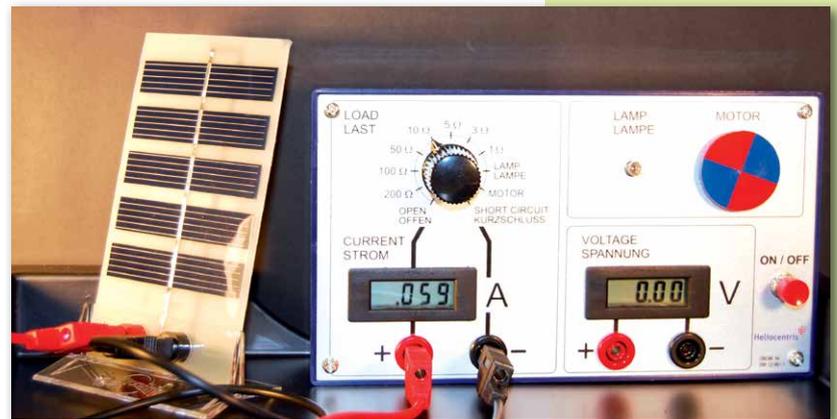
- *Alternative Treibstoffe (Chemische Energiespeicher)*
- *Chemische Wasserstoffspeicher*
- *Elektrochemische Energiespeicherung*
- *Speicherung von Wärmeenergie*

Die Sonnen- und Wind-abhängige Energiegewinnung erfordert Möglichkeiten der Energiespeicherung. Aber auch bei der Kraft-Wärme-Kopplung, im Baubereich und im Alltag spielt die Energiespeicherung und nicht nur die Isolierung für die Reduzierung von Wärmeenergieverlusten eine Rolle. Chemie-relevant ist folglich die Speicherung von Energie in Form von Wärme, in elektrochemischer oder chemischer Form. Beispiele sind Phasenwechselmaterialien, Akkumulatoren oder Treibstoffe. All diese Formen erfordern ein stoffliches Medium, das physikalische oder chemische Veränderungen erfährt, anders als bei der Speicherung in Form potentieller Energie, z.B. in einem Pumpspeicherwerk. Kernfragen für die Entscheidung für eine Speicherform sind, wie schnell die gespeicherte Energie zur Verfügung stehen und über welchen Zeitraum der Energiefluss aufrechterhalten werden muss. Während Speicher zur Stabilisierung des Stromnetzes im Sekunden- und Minutenbereich arbeiten und entsprechend schnell ansprechbar sein müssen, werden im Zuge des verstärkten Einsatzes von erneuerbaren Energien sogar „Saisonspeicher“ benötigt, bei denen Ladungs- und Entladungszyklen entsprechend langsam von statten gehen. Elektrochemischen Stromspeichern kommt bei der Energiewende eine besonders wichtige Rolle zu. Es werden derzeit viele neue langlebige Akkumulatoren mit einer großen Bandbreite an Leistung und Speicherkapazität entwickelt. Hohe Erwartungen werden in den Lithium-Ionen-Akkumulator gesetzt, der eine hohe Energiedichte aufweist, also viel gespeicherte Energie pro Masseinheit, und entsprechend weniger Gewicht mit sich bringt. Elektrochemische Kondensatoren – sogenannte „Supercaps“ – besitzen dagegen eine hohe Leistungsdichte, also schnell abrufbare Energie.

Wärmeenergie kann auf unterschiedliche Art gespeichert werden. Weit verbreitet ist die Temperaturerhöhung eines Speichermediums mit hoher Wärmekapazität wie Wasser, aber Wärmeenergie kann auch durch Phasenumwandlung oder thermochemisch gespeichert

werden. Hierbei läuft in einem geschlossenen System durch Energiezufuhr eine reversible endotherme Reaktion ab, bei der exothermen Rückreaktion wird die Energie dann wieder freigesetzt. Ein Beispiel ist das System  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaO}$ , das sich allerdings noch in der Entwicklung befindet.

Als chemische Energiespeicher dienen hauptsächlich alternative Treibstoffe. Hierzu gehören Biotreibstoffe wie Biogas und Bio-



Versuchsaufbau zur Photovoltaik

kraftstoffe der ersten und zweiten Generation. Für die Erzeugung von Kraftstoffen der ersten Generation wird nur der aus der Pflanze gewonnene Energiespeicherstoff (beispielsweise Öl, Zucker, Stärke) für die Kraftstoffproduktion genutzt. Bei Kraftstoffen der zweiten Generation wird fast die vollständige Pflanze verwendet wie bei der Ethanolgewinnung aus Cellulose oder dem Biomass-to-liquid-Verfahren, bei dem Biomasse erst „verflüssigt“, dann zu Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff („Synthesegas“) umgesetzt und aus diesen anschließend Flüssigtreibstoff hergestellt wird. Aber auch Wasserstoff ist ein wichtiger chemischer Energiespeicher. Um diesen als solchen zu speichern, muss entweder zur Kühlung oder zur Kompression Energie aufgewandt werden. Eine Alternative bietet die Speicherung in chemisch gebundener Form, z.B. als Metallhydrid.

Zur Kategorie **‚Intelligente‘ Materialien** zum Thema ‚Chemie und Energie‘ wurden folgende Schwerpunkte formuliert:

- *Ultraleichte Materialien*
- *Isolierstoffe*
- *Organische Leuchtdioden (OLED)*
- *Gasspeichermaterialien*
- *Thermoelektrische Materialien*

## EXPERIMENTELLE ANGEBOTE ZU ‚CHEMIE UND ENERGIE‘ IN SCHÜLERLABOREN WAS GIBT ES?

Organische LEDs, wärmedämmende oder ultraleichte Materialien senken den Energieverbrauch im Vergleich zum Einsatz von herkömmlichen Materialien. Leitfähige Polymere oder Kunststoffszellen eröffnen neue Anwendungsmöglichkeiten. Mit thermoelektrischen Materialien lässt sich elektrische Energie aus Abwärme gewinnen. Metallorganische Gerüstverbindungen (metal organic framework, MOF) lassen sich sehr spezifisch herstellen. Für sie gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten, sowohl in der Prozesschemie als auch in der Gasspeicherung oder Gastrennung, z.B. für Wasserstoff oder Methan. In einem Tank mit geeigneten MOF lässt sich mehr Wasserstoff speichern als im gleichen Volumen ohne MOF. Grund hierfür sind die Wechselwirkungen des Wasserstoffs mit den Porenwänden.

Zur Kategorie **Recycling und Einsatz von Sekundärrohstoffen** gibt es folgende Schwerpunkte:

- *Art der Sekundärrohstoffe*
- *Recyclingverfahren*

Einen wichtigen Beitrag zum Thema ‚Chemie und Energie‘ leistet das Recycling von Sekundärrohstoffen. Bei vielen neuen Technologien, die im Rahmen der Energiewende zum Einsatz kommen sollen, werden Rohstoffe verwendet, die nur in beschränkten Mengen zur Verfügung stehen bzw. sehr wertvoll sind. Für eine erfolgreiche und kostengünstige Anwendung ist es daher unerlässlich, die Versorgung mit diesen Rohstoffen langfristig sicherzustellen. Dieser häufig übersehene Aspekt der stofflichen Basis jeder Technologie ist demzufolge mit zu berücksichtigen. Hierzu gehören z.B. die Seltenerdmetalle, die in vielen modernen elektrischen und elektronischen Bauteilen benötigt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Neodym für getriebefreie Windräder. Aber auch bei anderen Metallen wie z.B. Aluminium, das mittels Schmelzflusselektrolyse unter hohem Energieaufwand gewonnen wird, leistet das Recycling einen großen Beitrag zur Energieeinsparung.

Die stoffliche Wiederverwertung von Kunststoff stellt ebenfalls einen Beitrag zur Ressourceneinsparung dar und hat indirekt Relevanz für die Energiefrage, da die fossilen Primärrohstoffe v.a. energetisch genutzt werden und sich hier eine Konkurrenzsituation ergibt. Allerdings gehen nur ca. 10% des Erdöls

in die stoffliche Produktion, der weitaus größere in die energetische Nutzung.

### Umfrage in Schülerlaboren

Auf der Grundlage der herausgearbeiteten Kategorien wurde ein Fragebogen entwickelt, mit dem das Angebot der außerschulischen Lernorte erfasst werden sollte. Dies erfolgte durch eine strukturierte Befragung der bei LernortLabor registrierten Schülerlabore.

Chemisch arbeitende Schülerlabore spielen inzwischen in Deutschland eine wichtige Rolle bei der Vermittlung von naturwissenschaftlichen Lerninhalten (siehe dazu Kap. 3.4: Hempelmann). Sie können den naturwissenschaftlichen Unterricht insbesondere im experimentellen Bereich unterstützen und es ermöglichen, die in der Schule vermittelten Kenntnisse zu erweitern und zu vertiefen. Schülerlabore sind häufig Universitäten angegliedert, aber dort nur zum Teil in der Chemiedidaktik angesiedelt. Ein Teil der Schülerlabore wird auch von FachwissenschaftlerInnen betrieben. Diese publizieren nicht oder eher selten über ihre Aktivitäten in den gesichteten fachdidaktischen Zeitschriften. Es wurde daher erwartet, dass eher in diesen Laboren Themen angeboten werden, die nur im Rahmen des zweiten Rechercheteils identifiziert worden waren.

Es wurde abgefragt, ob bzw. welche Experimente zu den einzelnen Unterthemen angeboten wurden. Ausdrücklich wurde auch nach sonstigen Angeboten gefragt, die mit den identifizierten Kernthemen noch nicht abgedeckt sind, um möglichst alle Angebote erfassen zu können. Zusätzlich sollten diese alters- bzw. klassenstufenbezogen eingeordnet werden. Die Zuordnung erfolgte in drei Stufen:

- *bis Klasse 6*
- *Klassen 7–10*
- *Klassen 11–13*

Vervollständigt wurde der Fragebogen durch einen Abschnitt mit allgemeinen Fragen zum Schülerlabor. Von Interesse war der Umfang der Angaben auf der Homepage des jeweiligen Labors, um einschätzen zu können, inwieweit eine Nutzung der angebotenen Experimente für interessierte Dritte, die das Schülerlabor nicht besuchen (können oder wollen), ermöglicht wird. Außerdem sollte angegeben werden, von welchen Motiven die Laborbetreiber sich bei der Auswahl ihrer Angebote

leiten lassen. Abschließend wurde um die Zustimmung des Schülerlabors zur Verwendung der im Fragebogen gemachten Angaben im Rahmen dieses Projekts gebeten bzw. wurden eventuelle Einschränkungen hierzu abgefragt, damit die Daten dann auch in der geplanten Datensammlung (siehe CD im Anhang) verwendet werden können. Der vollständige Fragebogen ist ebenfalls auf der beigefügten CD zu finden.

Vor der eigentlichen Umfrage wurde der Fragebogen einer kleinen Zahl der für die Umfrage in Frage kommenden Schülerlabore probeweise vorgelegt. So sollten potentielle Fehlerquellen im Fragebogen wie z.B. Verständnisprobleme oder nicht berücksichtigte Antwortmöglichkeiten, die die spätere Auswertung erschweren oder verfälschen könnten, identifiziert werden. Aufgrund der so gewonnenen Erkenntnisse wurden Fragebogen und Begleitmaterialien mit Informationen über das Projekt nochmals überarbeitet.

Außerschulische Lernorte im deutschsprachigen Raum können sich bei „LernortLabor“ oder kurz „LeLa“, dem Bundesverband der Schülerlabore e.V., registrieren lassen und auch Mitglied werden. Zum Zeitpunkt der Umfrage waren dort 320 Schülerlabore erfasst. Neben der Fachrichtung Chemie findet man Physik, Biologie, Geowissenschaften, Informatik, Mathematik, Medizin und Technik sowie auch ‚multidisziplinäre‘ Angebote. In der Fachrichtung Chemie waren 135 Einträge vorhanden (Stand: 31.03.2014). Mit Unterstützung von LernortLabor wurde die Umfrage elektronisch an alle registrierten Schülerlabore versandt, wobei jedoch klar die chemisch arbeitenden angesprochen waren. Sieben weitere nicht bei LeLa registrierte Schülerlabore mit chemischer Ausrichtung aus dem zdi-Netzwerk (Zukunft durch Innovation.NRW, eine Gemeinschaftsoffensive zur Förderung des naturwissenschaftlich-technischen Nachwuchses in Nordrhein-Westfalen) wurden direkt angeschrieben.

### Ergebnisse und ein paar Angaben zur Statistik

Insgesamt haben 44 Schülerlabore den Fragebogen beantwortet. Dazu gehörte auch jeweils ein Schülerlabor in der Schweiz und in Österreich. Von diesen Schülerlaboren haben 31 Labore insgesamt 122 Experimente zum Thema ‚Chemie und Energie‘ angegeben, 13 haben keine Experimente zu diesem Thema

im Programm. Damit bieten 70 % der Schülerlabore, die geantwortet haben, Experimente zum Thema ‚Chemie und Energie‘ an. Bei der Auswertung des Rücklaufs ist zu berücksichtigen, dass die Umfrage an alle registrierten Labore ging, also auch an solche, die keinerlei chemische Ausrichtung haben und mit dieser Umfrage auch nicht angesprochen wurden. Es ist jedoch zu vermuten, dass sich insbesondere Labore, die Experimente zu diesem Thema anbieten, von der Umfrage angesprochen gefühlt und sich daher beteiligt haben. Der Rücklauf darf daher nicht als statistisch zufällig bewertet werden. Dennoch erscheint das Thema gemessen an seiner Bedeutung für unsere Zukunft stark unterrepräsentiert.

**Energiegewinnung/-wandlung** und **Energiespeicherung** sind die Themenfelder mit der größten Zahl an Experimenten. Fast die Hälfte (45 %) der gemeldeten Angebote beschäftigt sich mit Energiegewinnung/-wandlung, ein knappes Viertel (22 %) mit Energiespeicherung. Hierzu gab es 55 bzw. 27 Nennungen<sup>2</sup>. Jeweils ca. die Hälfte davon richtet sich an die Klassen 11 – 13, etwa 43 % an die Klassen 7 – 10. Für SchülerInnen bis Klasse 6 gibt es kaum Angebote (7 bzw. 2 Nennungen).

Etwa ein Drittel aller Nennungen betrifft die anderen drei Themenfelder Katalyse, ‚Intelligente‘ Materialien und Recycling von Sekundärrohstoffen. Experimente zu den Themen **Katalyse** und **‚Intelligente‘ Materialien** werden jeweils 14 mal genannt. Davon gilt nur ein einziges Angebot für SchülerInnen bis Klasse 6. Experimente zur Katalyse haben ihren Schwerpunkt in den Klassen 11 – 13, da das Thema Katalyse schwerpunktmäßig erst in höheren Klassenstufen behandelt wird. Bei den neuen Materialien ist die Zahl der Angebote in den Klassen 7 – 10 dagegen fast groß wie in 11 – 13. Einzig beim Thema **Recycling von Sekundärrohstoffen** sind die 12 Angebote für die verschiedenen Altersstufen relativ gleichmäßig auf diese Zielgruppen verteilt (Abb. 4).

Für die unteren Klassenstufen sind also vergleichsweise wenige Angebote zum Thema ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren zu finden. Nur 14 der insgesamt 122 Angebote richten sich an die Altersstufe bis Klasse 6. Ergiebiger sind die Angebote für die Klassen 7 – 10 mit 78 und für die Klassen 11 – 13 mit 94 Nennungen. Ein Grund für diese Situation ist, dass manche Schülerlabore sich ausschließlich

<sup>2</sup> Ein Schülerlabor kann zu einem Thema mehrere Angebote haben, ein Angebot kann sich an mehrere Klassenstufen richten.

an höhere Klassenstufen richten. Die Zahl der Schülerlabore, die sich an Oberstufenschüler wenden, ist zwei- bis dreimal so hoch wie die Nennungen für den Grundschulbereich (<http://www.lernort-labor.de/data.php?tl=12,24.10.2014>).

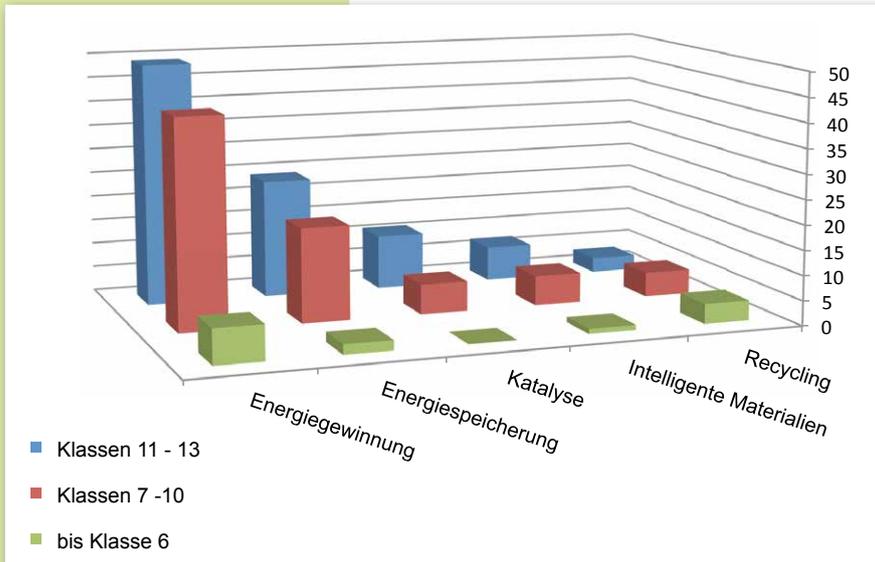


Abb. 4: Gesamtzahl der von 44 Schülerlaboren angegebenen Experimente je Klassenstufe

Nicht überraschend lagen die thematischen Schwerpunkte zur Energiegewinnung bei Photovoltaik (22 Angebote) und Brennstoffzellen (18 Angebote). Bei der Energiespeicherung waren alternative Treibstoffe und elektrochemische Speicher mit je 8 Angeboten die wichtigsten Vertreter (Abb. 5). Diese Zahlenangaben stellen lediglich die Zahl der Nennungen dar. Diese beinhaltet sowohl inhaltlich verschiedene Experimente als auch gleiche Experimente von verschiedenen Laboren.

Tab. 2: Experimente zur Katalyse, zu ‚Intelligenten‘ Materialien und zum Recycling (35 Angebote)

Thema	Zahl der Nennungen
Leuchtdioden	6
andere ‚Intelligente‘ Materialien	6
Elektrokatalyse	5
andere Katalyseexperimente	9
Kunststoffrecycling	6
andere Sekundärrohstoffe	6

Bei jedem der Themenfelder Recycling von Sekundärrohstoffen, ‚Intelligenten‘ Materialien und Katalyse gab es ein Hauptthema; andere Themen kamen nur vereinzelt vor (Tab. 2). Die zahlenmäßig stärksten Angebote waren Kunststoffrecycling (6 Nennungen), Leuchtdioden (6 Nennungen) und die elektrochemische Katalyse (5 Nennungen). Eine weitere Differenzierung erfolgt aufgrund der geringen Anzahl der Angebote in diesen Bereichen nicht.

### Wie kommt dieses Angebot zustande?

Warum sieht das Angebot gerade so aus? Warum gibt es so wenig Angebote für jüngere Schüler? Schließlich ist durchaus bekannt, dass gerade jüngere Kinder für Themen zu begeistern sind, die ihnen in ihrem Alltag begegnen. Sie sehen Solaranlagen auf den Hausdächern und Windräder oder Biogasanlagen in der Landschaft. Und so manches Spielzeug funktioniert heute nicht mehr ohne Batterie oder Akku. Und wehe, wenn der Akku der Spielkonsole oder des MP3-Players während einer langen Autofahrt leer wird. Wie kann man den dann wieder laden? Interessante Fragestellungen gibt es also auch für Jüngere.

Daher wurde in der Umfrage auch danach gefragt, von welchen Motiven sich die BetreiberInnen der Schülerlabore bei der Zusammenstellung ihres Angebots leiten lassen, nach welchen Kriterien sie die einzelnen Experimente auswählen. Es zeigte sich, dass dabei durchaus verschiedene Gesichtspunkte zum Tragen kommen. So orientiert sich die überwiegende Mehrheit (72 %) der an der Umfrage teilnehmenden Labore an Unterrichtsinhalten bzw. Lehrplänen. Themen zu ‚Chemie und Energie‘ sind in den Lehrplänen für die unteren Klassenstufen offensichtlich nicht vertreten. In den höheren Klassen sind Themen wie Photovoltaik oder Brennstoffzellen aufgrund der Tatsache, dass sie bereits technisch angewendet werden, in den Curricula zu finden; neue Materialien, die sich erst in der Entwicklung befinden, dagegen nicht.

Die eigene Expertise, sei es die Forschungsrichtung der betreibenden Institution oder das firmeneigene Wissen, kommen bei der Auswahl ebenfalls zum Tragen (49 %). Bei etlichen der in dieser Umfrage erfassten Angebote ist ein Zusammenhang zwischen den Themen der angebotenen Experimente und der wissenschaftlichen Arbeit der jeweiligen Forschungseinrichtung zu erkennen.

Andererseits geben viele Schülerlabore an, dass sie auch aktuelle oder regionale Themen aufgreifen. Hier zeigt sich also auch der gesellschaftspolitische Bezug, der Ansatzpunkt für die Erweiterung des Angebots sein könnte. Etliche Labore gehen auch auf individuelle Wünsche von Lehrkräften ein.

## Zugang zu den Versuchsvorschriften

Zusätzlich zu den Angeboten zum Thema Chemie und Energie wurden die Schülerlabore danach gefragt, inwieweit sie ihre Angebote öffentlich zugänglich machen. Bei etwa einem Viertel werden die angebotenen Experimente nur im eigenen Labor durchgeführt und sind für andere nicht zugänglich. Die Mehrheit gibt die Experimente bzw. die Vorschriften dazu nach Absprache an interessierte Dritte wie z.B. Lehrkräfte weiter. Lediglich 12 % stellen ihre Experimente zur freien Verfügung. Knapp ein Viertel aller Labore hat unterschiedliche Regelungen je nach Experiment (Tab. 3).

Der Anteil von 11 % der Schülerlabore, die die von ihnen angebotenen Experimente mit vollständiger Versuchsanleitung auf ihrer Homepage einstellen, deckt sich mit der Angabe, dass 12 % ihre Experimente frei zur Verfügung stellen. In der Praxis bedeutet das, dass z.B. eine Lehrkraft auf der Suche nach Experimenten auf der Homepage dieses Schülerlabors alle Angaben findet, die zur Durchführung des Experiments erforderlich sind.

Bei einem Viertel aller Schülerlabore sind die angebotenen Experimente auf der Homepage als Kurzbeschreibung zu finden. Damit können sich NutzerInnen ein Bild von dem Experiment machen, z.B. potentielle Besucher des Schülerlabors können abschätzen, was sie erwartet. Die eigenständige Durchführung der Experimente ist in der Regel mit diesen Informationen nicht ohne weiteres möglich.

Bei einigen wenigen Laboren werden lediglich die Titel der angebotenen Experimente auf ihrer Homepage aufgeführt. Bei 23 % der Labore sind keine Angaben zu den einzelnen Experimenten zugänglich (Tab. 4). Auch dieses Ergebnis stimmt gut mit dem Anteil der Labore überein, deren Experimente nur für das eigene Labor bestimmt sind.

Was ist der Grund für den zurückhaltenden Umgang? Sicher fehlen einigen Laboren die personellen Ressourcen, um ihre Angebote für eine Darstellung im Internet aufzubereiten, werden doch viele Schülerlabore mit sehr bescheidenen Ressourcen betrieben. Möglicherweise gibt es in manchen forschenden Schülerlaboren keine „Standardexperimente“, sondern die Angebote werden jeweils an die Bedürfnisse der einzelnen Gruppen angepasst.

Ein nicht unwichtiges Argument ist sicher, dass man auf die weiteren Wege von im Internet veröffentlichten Inhalten keinen Einfluss mehr hat und urheberrechtliche Interessen nur schwerlich gewahrt werden können. Andererseits gibt es im Internet diverse Angebote, in denen sich Labore, Lehrkräfte oder auch Laien über chemische Experimente und deren Hintergründe informieren können. (z.B. ‚Prof. Blumes Bildungsserver für Chemie‘ (<http://www.chemieunterricht.de/dc2/>) oder Unterrichtsmaterialien des Fonds der chemischen Industrie (<https://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/Unterrichtsmaterialien/Seiten/Startseite.aspx>)).

Dieses Ergebnis sollte für alle Beteiligten dazu anregen, darüber nachzudenken, wie man diese Situation verbessern kann. Aufgrund der begrenzten personellen Kapazitäten in manchen Schülerlaboren ist nicht zu erwarten, dass jedes Labor neue Angebote ausschließlich selbst entwickeln kann. Es wäre wünschenswert, den Austausch über Experimente und Erfahrungen zwischen den Schülerlaboren, den es bereits punktuell gibt (z.B. Jahrestagungen von Lernort Labor) noch zu verstärken.

## Querschnitt der angebotenen Experimente

Im Folgenden sollen die experimentellen Angebote detaillierter beleuchtet werden. Dabei zeigt sich, dass die Situation bei den speziellen Themen sehr unterschiedlich ist.

### Photovoltaik

Bei Experimenten im Bereich der Photovoltaik werden überwiegend Siliziumsolarzellen eingesetzt. (Abb. 6). Aber auch Grätzelzellen spielen eine große Rolle, weil diese im Gegensatz zu

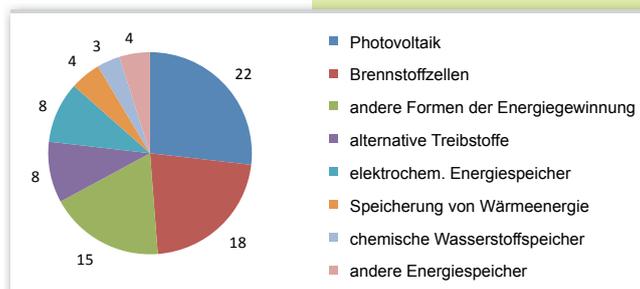


Abb. 5: Angebote zur Energiegewinnung/-wandlung und Energiespeicherung (82 Nennungen)

Tab. 3: Zugang zu den Angeboten der an der Umfrage beteiligten Schülerlabore

Sind die von Ihnen angebotenen Experimente nur intern oder auch für andere Interessierte zugänglich?	
frei zugänglich	12 %
nur für das eigene Labor bestimmt	26 %
nach Absprache	39 %
unterschiedlich je nach Experiment	23 %

Tab. 4: Freigaberegulungen für Versuchsanleitungen in den beteiligten Schülerlaboren

Sind die von Ihnen angebotenen Experimente auf der Homepage zu finden?		
	absolut	anteilig
nur die Versuchstitel	2	5%
als Kurzbeschreibung	11	25%
mit vollständiger Versuchsanleitung	5	11%
keine Angaben zum einzelnen Experiment	10	23%
unterschiedlich je nach Experiment	16	36%

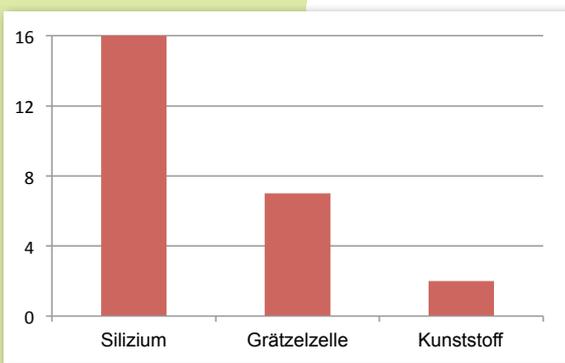


Abb. 6: Typen eingesetzter Solarzellen in den 22 experimentellen Angeboten zur Photovoltaik

Siliziumzellen von den SchülerInnen selbst hergestellt werden können. In einigen Fällen werden unterschiedliche Typen von Solarzellen im Vergleich eingesetzt. Dabei werden Herstellung und Funktionsweise der Solarzelltypen thematisiert.

In den angebotenen Experimenten untersuchen die SchülerInnen die Stromproduktion der Solarzellen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Faktoren. Die Leistung von Solarzellen hängt u.a. von Bestrahlungsstärke, der Auswirkung von Verschattungen, vom Einstrahlungswinkel wie auch dem Spektrum des eingestrahlten Lichts ab. Durch die Messung von Stromstärken und Spannungen an den Solarzellen können diese Wirkungen beobachtet werden, ebenso der Unterschied zwischen Reihen- und Parallelschaltungen. Auch der Wirkungsgrad von Solarzellen wird experimentell ermittelt.

Die Energie des Sonnenlichts steht zwar in einem unerschöpflichen Maß zur Verfügung. Entscheidend ist dennoch eine effiziente Energieumwandlung. Besonders anschaulich als „natürliche Solarzellen“ sind Pflanzen, die Licht auf dem Weg der Photosynthese effektiv in chemische Energie umwandeln. Es gibt mittlerweile Solarzellen, die in Form einer „künstlichen Photosynthese“ die natürlichen Vorgänge nachahmen. Es handelt sich um Farbstoff-solarzellen, die nach ihrem Erfinder auch Grätzelzellen genannt werden. Sie sind für Schülerexperimente besonders geeignet, zum einen, weil sie aus gängigen Materialien relativ einfach herstellbar ist. Zum anderen sind die Prozesse Lichtabsorption in der Farbstoffschicht und Ladungstrennung im Halbleiter (Titandioxid) voneinander entkoppelt, was das Verständnis für diese Prozesse leichter macht.



Abb. 7: Materialien für den Bau einer Grätzelzelle

Diese Experimente sprechen SchülerInnen stark an, weil ihnen die für den Bau einer solchen Farbstoffsolarzelle benötigten Materialien aus ihrem Alltag bekannt sind. Die Ausgangsmaterialien sind eigentlich alle im Haushalt zu finden: Titandioxid versteckt sich z.B. in der Zahnpasta, Graphit im Bleistift und Iod im Medizinschrank (Abb. 7). Der zentrale Bestandteil ist jedoch ein Pflanzenfarbstoff. Dabei muss es nicht unbedingt das Chlorophyll sein, auch Betaine aus roter Bete funktionieren. Auch wenn der Wirkungsgrad von Siliziumsolarzellen noch lange nicht erreicht ist, lässt sich ein messbarer Strom erzeugen.

### Brennstoffzellen

In den meisten Experimenten zur Brennstoffzelle kommen mit Wasserstoff betriebene, deutlich seltener mit Methanol betriebene Brennstoffzellen zur Anwendung. Andere Brennstoffe spielen kaum eine Rolle (Abb. 8). Tatsächlich ist die Wasserstoffbrennstoffzelle die Variante, die sich auch in der Technik durchgesetzt hat. Hinter dem Versuchstitel ‚Wasserstoffbrennstoffzelle‘ können sich jedoch ganz unterschiedliche Experimente verbergen. Es beginnt schon mit dem Wasserstoff: Wo kommt er her? Steht er für das Experiment z.B. in einer Gasdruckflasche zur Verfügung, wird er in klassischer Laborpraxis im Hofmann’schen Wasserzersetzungsgenerator oder unter Verwendung eines Solarmoduls gewonnen? Kommerzielle Experimentiersets bieten die Möglichkeit, mittels eines Solarmoduls Wasserstoff zu erzeugen. Dies ist auch im Hinblick auf die Energiewende der sinnvollste Weg. Also empfiehlt sich die experimentelle Kombination von photovoltaisch durchgeführter Elektrolyse und Brennstoffzelle.

Zu den Themen Brennstoffzellen und Photovoltaik gibt es ausgereifte Experimentiersets kommerzieller Anbieter (z.B. Dr FuelCell®-Reihe von Heliocentris, Legosolarpanel), bei denen teilweise sogar didaktisch abgestimmtes Lehrmaterial mit zum Lieferumfang gehört. Offensichtlich werden solche Angebote von Schülerlaboren gern aufgegriffen. Dies deckt sich mit der Erfahrung, dass Mittel für Investitionen einfacher einzuwerben sind als für Personal, man also leichter etwas anschaffen als entwickeln kann. Dazu kommt die Attraktivität solcher Experimentiersets.

Die Experimentiermodule umfassen auch einen Elektrolyseur für die Gewinnung des

benötigten Wasserstoffs. Die dazu erforderliche elektrische Energie kann einerseits mittels eines Solarmoduls, andererseits mechanisch mit einem Handgenerator „gewonnen“ werden (Abb. 9). Hierbei erfahren die SchülerInnen direkt, dass Energie nicht „erzeugt“ sondern nur von einer Form in die andere umgewandelt werden kann. Die Menge des erzeugten Wasserstoffs hängt erkennbar davon ab, wie sehr sie sich selbst beim Kurbeln anstrengen. Selbst jüngere SchülerInnen, die noch nie etwas vom Energieerhaltungssatz gehört haben, bekommen ein Gespür für den Zusammenhang der Größen. Auch bei der Wasserstofferzeugung mittels photovoltaisch erzeugten Stroms lässt sich der Zusammenhang von Energieeinsatz und erzeugter Wasserstoffmenge erkennen, z.B. bei Teilverschattung des Solarpanels.

Der erzeugte Wasserstoff wird für den Betrieb der Brennstoffzelle verwendet, an die ein Verbraucher angeschlossen ist. Als kleine Spielerei, die besonders jüngere Kinder anspricht, kann ein Auto damit betrieben werden. Durch die aktive Herangehensweise wird das Verständnis für die Abfolge Energieumwandlung (Lichtenergie bzw. mechanische → elektrische → chemische) – Speicherung der Energie in Form von Wasserstoff – Verbrauch des Wasserstoffs unter Wandlung der gespeicherten Energie in kinetische – geweckt. Die mechanische Energie, die für den Betrieb des Handgenerators eingesetzt wird, stammt erneut aus einem chemischen Energiespeicher, nämlich unserer Nahrung. Deren Kohlenhydratanteile sind wiederum mithilfe der Photosynthese, also durch Lichtenergie, aufgebaut worden. Auch das Leben ist eine Abfolge von Energieumwandlungen.

Die Funktionsweise der Brennstoffzelle muss mit jüngeren SchülerInnen einer derartigen Lerneinheit nicht im Detail thematisiert werden. Die Brennstoffzelle selbst bleibt eine „Black box“, aber ihre Wirkung wird erkannt. Ergänzende Aspekte wie die Abgasfreiheit könnten an dieser Stelle noch einbezogen werden.

Für ältere SchülerInnen gehört in Schülerlaboren die Funktionsweise einer Brennstoffzelle ebenso dazu wie ihr grundsätzlicher Aufbau. Darüberhinaus wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Aspekten zur Untersuchung angeboten: Die SchülerInnen können Wirkungsgrad und Kennlinien ermitteln, unterschiedliche Brennstoffzelltypen wie z.B. die Methanol-Brennstoffzelle können mit der

Wasserstoffbrennstoffzelle verglichen werden. Um die Funktionsweise einer Brennstoffzelle wirklich begreifen zu können, wäre ein Experiment mit einer möglichst einfach konstruierten Brennstoffzelle zum Selbstbau hilfreich, ggf. auch als Modell.

### Akkumulatoren und Batterien

Anders als z.B. bei der Brennstoffzelle gibt es hier nicht das eine Experiment, das in mehreren Schülerlaboren in gleicher oder ähnlicher Form angeboten wird. Zum Thema elektrochemische Energiespeicher werden zwar offensichtlich von deutlich weniger Schülerlaboren Experimente angeboten, aber die erfassten Experimente erscheinen dafür vielfältiger. Sie reichen von der einfachen Dosenbatterie über die etablierten Blei-Akkus und NiMH-Akkus (Nickel-Metallhydrid) und die hochaktuellen Lithium-Ionen-Akkumulatoren bis zur Redox-Flow-Batterie, die schon einiges an eigener Expertise im Schülerlabor erfordert.

In diesen Bereich gehören auch die Experimente zur Spannungsreihe der Metalle, Konzentrationselemente (eine galvanische Zelle aus zwei gleichartig aufgebauten Halbzellen, die sich nur in der Elektrolytenkonzentration unterscheiden) und das Daniell-Element ebenso wie die Zitronenbatterie (Abb. 10), die sicherlich auch von einigen Schülerlaboren angeboten werden, aber in dieser Umfrage nicht angegeben wurden. Allerdings sind dies Experimente, die aufgrund des relativ geringen Aufwands auch noch direkt in der Schule durchgeführt werden können. Versuche, die einen einfachen Batterietyp mit kommerziellen Batterien vergleichen, sind damit gut zu realisieren.

### Alternative Treibstoffe

Der Ersatz der aus fossilen Rohstoffen gewonnenen Kraft-

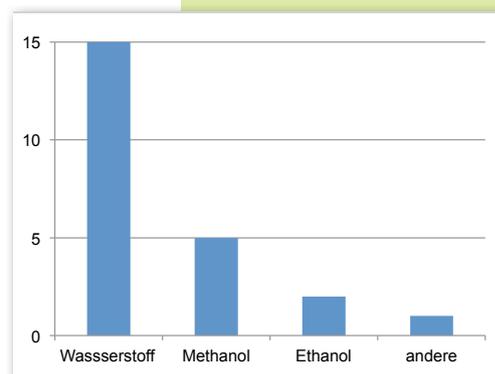
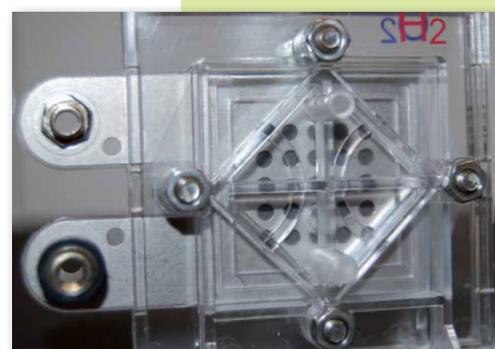


Abb. 8: Eingesetzte Brennstoffe in den 18 experimentellen Angeboten zur Brennstoffzelle



Abb. 9: Wasserelektrolyse mit einem Handgenerator



Brennstoffzelle aus einem kommerziellen Experimentierset

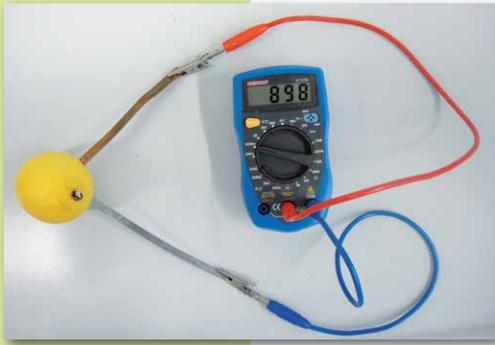


Abb. 10: Zitronenbatterie

stoffe durch Produkte, die auf nachwachsenden Rohstoffen basieren, ist eine wichtige Aufgabe der Chemie. Experimente, die sich damit beschäftigen, sind im Angebot der Schülerlabore zu finden. Offensichtlich beschränken sie sich aber auf Biokraftstoffe der ersten Generation. Dies sind Verfahren, bei denen nur ausgewählte Teile der verwendeten Pflanzen zur Kraftstoffgewinnung genutzt werden, wie die Herstellung von Biodiesel aus Rapsöl oder die Umsetzung von Stärke bzw. Zucker zu Ethanol (Abb. 11).

Zu den chemischen Energiespeichern zählen sowohl flüssige Treibstoffe als auch Gase. Bei den flüssigen Treibstoffen stehen Biodiesel und Bioethanol an oberster Stelle. Bei den gasförmigen Energiespeichern wird Wasserstoff am häufigsten eingesetzt (s.o.), dafür werden in den angebotenen Experimenten unterschiedliche Quellen wie Wasserelektrolyse, Metallhydride oder auch Druckgasflaschen genutzt. Biogas spielt kaum eine Rolle (Abb. 12).

Viele Experimente mit flüssigen Treibstoffen thematisieren sowohl Herstellung und Aufkon-

zentrierung bzw. Reinigung als auch die fertigen Produkte. So wird Ethanol durch Vergärung aus Zucker hergestellt und der gebildete Alkohol durch Destillation abgetrennt (Abb. 13). Die Herstellung von Biodiesel umfasst die Gewinnung des Pflanzenöls und seine anschließende Umesterung. Anschließend werden Eigenschaften wie Viskosität oder Brennwert der Produkte untersucht. Es gibt sowohl Angebote, bei denen die SchülerInnen Edukt und Produkt vergleichen, also Rapsöl mit Biodiesel, als auch Biodiesel mit herkömmlichem Dieselmotorkraftstoff. Die Nutzung von selbst hergestelltem Bioethanol in einer Ethanol-Brennstoffzelle ist ein Beispiel für ein Experiment, das den langen Weg vom nachwachsenden Rohstoff bis zur Stromerzeugung vollzieht.

Experimente mit Wasserstoff als chemischem Energiespeicher werden in vielen Schülerlaboren angeboten. Dazu gehören hauptsächlich Experimente mit Wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen, zumal es hier leistungsfähige kommerzielle Angebote für Experimentierkits gibt. Wasserstoff steht aber auch in Konkurrenz zu anderen alternativen Treibstoffen wie Biodiesel bzw. Bioethanol und Methan. Inhalt vieler Experimente ist der Vergleich dieser Energieträger untereinander, z.B. hinsichtlich ihrer physikochemischen Eigenschaften wie der Brennwerte mittels Kalorimetrie oder der Viskositäten. Dies sind wichtige Aspekte für eine Verwendung als Ersatz entsprechender erdölbasierter Produkte. Ein Gesichtspunkt dabei ist der Vergleich von gasförmigen Produkten mit Flüssigtreibstoffen, hier spielen dann auch die Probleme bei der praktischen Anwendung hinein.

### Wärmespeicherung

Wärme kann auf unterschiedliche Weise gespeichert werden. Bei konventionellen Wärmespeichern erhöht sich deren Temperatur durch die Speicherung, bei Abgabe der Wärme sinkt die Temperatur wieder. Größte derartige natürliche Wärmespeicher sind die Weltmeere, aus diesem Grund ist das Klima in maritimen Gebieten deutlich ausgeglichener als das Klima in küstenfernen Gegenden. Warmwasserspeicher in Haushalten sind die gängigsten konventionellen Wärmespeicher.

Latentwärmespeicher nutzen eine Phasenumwandlung zur Speicherung der Wärme, meist den Phasenübergang von fest zu flüssig. Ihre Temperatur erhöht sich dabei nicht, weil

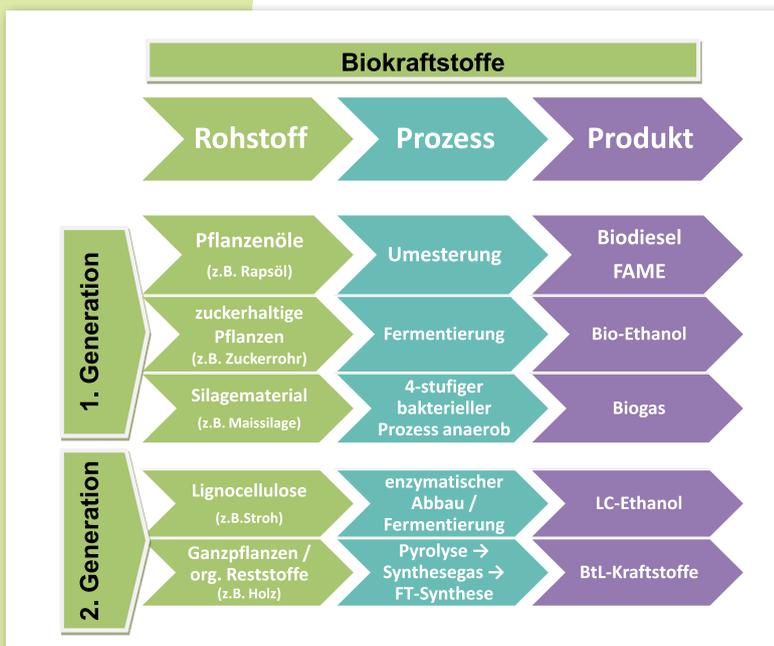


Abb. 11: Verfahren zur Herstellung von Biokraftstoffen im Überblick

die Energie als Schmelzwärme (-enthalpie) gespeichert ist. Sie weisen allerdings nur einen kleinen Arbeitsbereich rund um die Temperatur auf, bei der die Phasenumwandlung stattfindet. Ein bekanntes Beispiel für einen Latentwärmespeicher sind die praktischen Taschenwärmer, die Salzhydrate in unterkühlten Schmelzen enthalten, die Kristallisation startet durch einen mechanischen Auslöser (das Knickplättchen) und die Kristallisationswärme wird freigesetzt.

### Katalyse

Das Angebot zum Thema Katalyse mit dem Aspekt der Energieeinsparung im Mittelpunkt ist relativ klein. Auf dem Gebiet der Elektrokatalyse spielen Membranprozesse, wie sie z.B. in einer Brennstoffzelle ablaufen, eine wichtige Rolle. Photokatalytische Prozesse führen neben der Photovoltaik ein Schattendasein.

Bei der Biokatalyse wurden klassische Experimente wie die Photosynthese oder die enzymatische Stärkespaltung erfasst. Bei den Metallkatalysatoren ist der Klassiker Autokatalysator ebenso zu finden wie die moderne ‚Click-Chemie‘. Natürlich gehört auch die Bioethanolproduktion zu den biokatalysierten Prozessen, hier steht allerdings das Produkt als chemischer Energiespeicher im Mittelpunkt.

### ‚Intelligente‘ Materialien

Trotz der großen Bandbreite von Materialien, die man unter diesem Begriff subsumieren kann, bilden Experimente mit Leuchtdioden eindeutig den Schwerpunkt dieser Kategorie. Diese beinhalten sowohl Leuchtdioden allgemein als auch organische Leuchtdioden (OLED). Experimente mit anderen ‚Intelligenten‘ Materialien werden nur vereinzelt angeboten. Grund hierfür kann sein, dass dieser Aspekt von Materialien beim konzeptionell mehr physikalisch ausgerichteten Energiebegriff oder aufgrund der häufig mehr indirekten Bedeutung für die Energieversorgung kaum in den Blick genommen wird. Hinzu kommt, dass viele Materialien sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden und bisher keinen Einzug in den Alltag gefunden haben. Dazu zählen sicherlich die metallorganischen Gerüstverbindungen (MOF) und die thermoelektrischen Materialien. Phasenwechselmaterialien (PCM), die im Bereich der Wärmedämmung und -speicherung im Gebäudebereich eingesetzt werden, sind hingegen leicht zugänglich. Ein typischer Vertreter hierfür ist Paraffin

(Abb.14), ein noch gängigeres das oben erwähnte Wasser.

### Recycling von Sekundärrohstoffen

Rohstoffquellen sind nicht unerschöpflich. Daher sollten Möglichkeiten zur Wieder- oder Weiterverwendung von Stoffen nach ihrem primären Gebrauch schon bei der Entwicklung bedacht werden. Dabei kann sowohl Energieeinsparung als auch die Sicherung der Rohstoffversorgung die treibende Kraft sein.

Die meisten Experimente, die für diesen Bereich gelistet wurden, beschäftigen sich mit dem Recycling von Kunststoffen. Hierbei geht es in erster Linie um Umformung, z.B. von Styropor® (Abb. 15), also rohstoffliches Recycling, aber auch um biologisch abbaubare Kunststoffe im Kontext mit Stoffkreisläufen. Experimente, die die Ressourcensicherung insbesondere bei seltenen oder teuren Rohstoffen thematisieren, sind selten. Von den erfassten Experimenten lassen sich nur das Recycling von elektronischen Bauteilen und das Kupferrecycling, eine Versuchsreihe aus dem Bereich der Hydrometallurgie, dazu rechnen.

### Stellungnahmen von ExpertInnen

Die Ergebnisse der Umfrage sowie die Zusammenstellung der von den Schülerlaboren genannten Experimente wurden nach ihrer Aufbereitung mehreren WissenschaftlerInnen mit einschlägiger Expertise und der Chemiedidaktik vorgelegt mit der Bitte, diese aus ihrer Expertensicht heraus zu kommentieren.

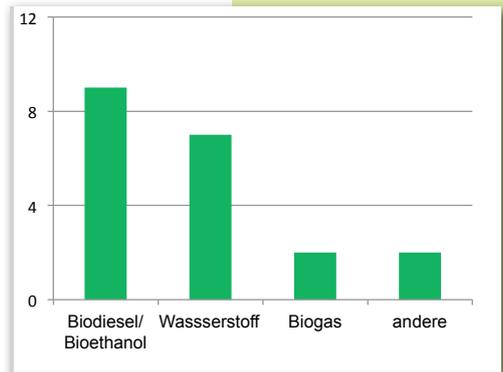


Abb. 12: Energieträger in den 16 experimentellen Angeboten zu Chemischen Energiespeichern



Abb. 13: Bioethanol, hergestellt aus nachwachsenden Rohstoffen



Aufgeschnittener Katalysator für ein Auto  
(Bild: Stahlkocher, CC-BY-SA 2.0)



Abb. 14: Paraffinpellets, in Alginat mikroverkapseltes Paraffin und Thermobecher

Lehrpläne hängen der aktuellen Entwicklung zwangsläufig hinterher, Schülerlabore mit ihrer größeren Freiheit, experimentellen Möglichkeiten und oft auch Forschungsnähe können flexibler darauf reagieren. Aber das vertiefte Verständnis der FachwissenschaftlerInnen kann auch den Blick auf Aspekte des Verständnisses lenken, die in die Konzeption von Schülerlaborexperimenten einfließen können. Im Bereich der Chemiedidaktik werden interessante Experimente zum Thema ‚Energie und Chemie‘ entwickelt, die vielleicht mit den Schülerlaboren als Mittler oder auch Multiplikatoren die Schülerinnen und Schüler schneller erreichen können bzw. von denen die oft mit geringen Ressourcen und ohne Planstellen betriebenen Schülerlabore auch noch stärker profitieren könnten.

Die ExpertInnen sollten auch einschätzen, in wie weit die bereits existierenden experimentellen Angebote das Feld gut abdecken, ob sie vielleicht von der fachlichen Entwicklung schon wieder überholt sind oder ob sie falsche Schwerpunkte setzen. Besonders wichtig ist dabei auch die Frage, ob und ggf. welche Themen fehlen.



Abb. 15: Polystyrolverpackungschips und daraus hergestellte Folie

Diese Einschätzungen sowie der Blick aus Schülerlaborsperspektive und Schule sind in den Kapiteln 2 und 3 zu finden. Sie geben die Meinung des jeweiligen Autors wieder und sollen zur Diskussion anregen.

Das Thema ‚Chemie und Energie‘ ist jedoch nicht nur in Schülerlaboren zu finden. Verschiedene andere Institutionen sind auf diesem Feld ebenfalls aktiv. Das gemeinsame Ziel aller ist, dieses gesellschaftlich so wichtige und aktuelle Thema SchülerInnen für den naturwissenschaftlichen Unterricht anschaulich und nutzbar zu präsentieren. Dazu existieren ganz unterschiedliche Ansätze, von denen drei exemplarisch in Kapitel 4 vorgestellt werden. Es handelt sich um die Schulpartnerschaft des Fonds der chemischen

Industrie, der unter anderem eine Informationsserie unter dem Titel „Schlüssel zur Energie von morgen“ (<https://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/Unterrichtsmaterialien/Seiten/Chemie-Schlüssel-zur-Energie-von-morgen.aspx>) herausgegeben hat, das Projekt „energie.bildung“ der Universität Oldenburg und die Wanderausstellung der DBU zur nachhaltigen Chemie mit dem Titel „T-Shirts, Tüten und Tenside“.

### Dokumentation der Ergebnisse

Ein Ziel des Projekts war es, einen möglichst umfassenden Überblick über experimentelle Angebote aus dem Bereich Chemie und Energie in Schülerlaboren zu schaffen. Die Ergebnisse der Umfrage sind in elektronischer Form zugänglich. Damit besteht grundsätzlich die Option, die Daten zu ergänzen und zu aktualisieren. Damit wird die Möglichkeit eröffnet, sich zu informieren, welche Experimente zum Themenbereich ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren angeboten werden, welche Schülerlabore etwas anbieten und an welche Altersstufen sich diese Angebote richten. Um Interessenten das Auffinden von Experimenten zu einem bestimmten Thema zu erleichtern, stehen Suchfilter zur Verfügung. So können die Experimente nach Themen, nach Klassenstufen oder auch nach dem Ort des Schülerlabors ausgewählt werden.

Dazu wurden alle Experimente mit den jeweiligen Zusatzinformationen, die von den Schülerlaboren im Rahmen der Umfrage angegeben worden waren, tabellarisch zusammengestellt. Die Zuordnung der einzelnen Experimente zu den Themenfeldern erfolgte durch das jeweilige Schülerlabor. Im Einzelnen wurden folgende Informationen erfasst:

- *Bezeichnung des Experiments*
- *Themenfeld*
- *Klassenstufe(n), an die sich das Experiment richtet*
- *Link zum Versuch oder zusätzliche Informationen nach Angabe des jeweiligen Schülerlabors*
- *Name, Sitz und Adresse der Homepage des jeweiligen Schülerlabors*
- *Verweis auf ein- oder weiterführende Literatur zur Thematik (diese Angaben stammen überwiegend aus der Eingangsrecherche in chemiedidaktischen Fachzeitschriften und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit).*

Die Zusammenstellung (siehe beigelegte CD) wird künftig auch auf der Homepage des Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labors zu finden sein (<https://www.tu-braunschweig.de/agnes-pockels-labor>).

Diese Erhebung beruht auf den Angaben der Schülerlabore, die sich an der Umfrage beteiligt haben. Sie kann daher nicht vollständig das Angebot aller Schülerlabore abbilden. Wer sich durch diesen Projektbericht angesprochen fühlt und Literatur oder Experimente aus Schülerlaboren beizutragen hat: Den Inhalt ergänzende Angaben können aufgenommen werden.

**Kontakt:** [agnespockelslabor@tu-braunschweig.de](mailto:agnespockelslabor@tu-braunschweig.de)

### Quellenverzeichnis

*Praxis der Naturwissenschaften – Chemie in der Schule (PdN-ChiS)*, Aulis Verlag in der STARK Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, Hallbergmoos

*Naturwissenschaften im Unterricht Chemie (NiU-C)*, Friedrich Verlag GmbH, Seelze

*Chemie konkret (CHEMKON)*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

*Mathematischer und naturwissenschaftlicher Unterricht (MNU)*, Verlag Klaus Seeberger, Neuss

*Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften (ZfDN)*, ZfDN-Redaktion Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik, Kiel

*Chemie in unserer Zeit (ChiuZ)*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

*International Journal of Science Education (Int. J. Sci. Ed.)*, Taylor & Francis Group, London

*Journal of Chemical Education (J. Chem. Ed.)*, ACS Publications, Washington

*Science Education (Sci. Ed.)*, Wiley Periodicals, Inc.

*HIGHCHEM hautnah – Aktuelles über Elektrochemie und Energie*, Beiträge der Wochenschau 2006, GDCh

*HIGHCHEM hautnah – Aktuelles über Nachhaltige Chemie*, Beiträge der Wochenschau 2008; GDCh

*HIGHCHEM hautnah – Aktuelles über Chemie und Energie*, Beiträge der Wochenschau 2010, GDCh

<http://www.aschemann.at/Downloads/Fragebogen.pdf>

L. Gräf, A. Werner, B. Batinic, W. Bandilla (Hg.), *Online Research – Methoden, Anwendungen und Ergebnisse*, Hogrefe-Verlag, Göttingen 1999

<http://www.fragebogen.de>

<http://www.grafstat.de>



### Dr. Ilka Deusing-Gottschalk

Technische Universität Braunschweig  
Agnes-Pockels-SchülerInnenlabor  
Schleinitzstr. 20, 38106 Braunschweig  
[i.deusing-gottschalk@tu-bs.de](mailto:i.deusing-gottschalk@tu-bs.de)



### Prof. Dr. Petra Mischnick

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Lebensmittelchemie /  
Agnes-Pockels-SchülerInnenlabor  
Schleinitzstr. 20, 38106 Braunschweig  
[p.mischnick@tu-bs.de](mailto:p.mischnick@tu-bs.de)



**STIMMEN AUS DER  
FACHWISSENSCHAFT**





## Biomassekonversion

### Die Technologie

Durch Photosynthese wird Lichtenergie in gespeicherte chemische Energie - in Form von Pflanzen - umgewandelt. Der einfachste Weg, um daraus Nutzenergie bereit zu stellen, ist die direkte Verbrennung, etwa von Holz oder Stroh. Bessere Nutzungspfade eröffnen sich allerdings häufig durch eine chemische Umwandlung in andere Stoffe. Dazu kann man die Früchte der Pflanzen nutzen, z.B. von Getreide bei der Herstellung von Biogas oder Bioethanol, oder von Ölfrüchten zur Herstellung von Biodiesel durch Transesterifizierung. Besser allerdings ist die Nutzung der gesamten Biomasse, also auch der Strukturbestandteile der Pflanzen, die im Wesentlichen aus Lignocellulose bestehen. Hierzu gibt es grundsätzlich den thermischen Weg, bei dem die Lignocellulose entweder durch Vergasung in Synthesegas umgewandelt wird, oder durch Pyrolyse zu Bioöl als Primärprodukt verschwelt wird. Sowohl Synthesegas als auch Bioöl können dann durch geeignete Verfahren in flüssige Energieträger umgewandelt werden. Alternativ zu den thermischen Verfahren kann die Lignocellulose entweder mikrobiell oder chemisch in ihre Grundbausteine, Cellulose, Hemicellulose und Lignin, zerlegt werden, die ebenfalls zu Energieträgern oder Chemikalien weiterverarbeitet werden können. Es handelt sich hier also um ein ganzes Bündel unterschiedlicher Technologien, von Hochtemperaturprozessen bis zu biotechnologischen Verfahren, die alle ihre jeweiligen Vor- und Nachteile haben können.

### Prognose hinsichtlich der zukünftigen Bedeutung

Die Nutzung von Biomasse für energetische Zwecke hat eine lange Geschichte, denn Holz wird bereits seit der Nutzung des Feuers durch den Menschen gezielt zur Energiebereitstellung verbrannt. Heute geht es darum, insbesondere flüssige Energieträger aus Biomasse herzustellen, um die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren. Außerdem weisen Biomasse-basierte flüssige Energieträger das Potenzial auf, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern, da beim Pflanzenwachstum zunächst CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gebunden wird, das bei der späteren Nutzung wieder in die Atmosphäre abgegeben wird. Abgesehen von den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei Anbau und Verarbeitung von Biomasse und möglichen Folgen der Landnutzungsänderung haben Biomasse-

basierte Verfahren damit das Potenzial, CO<sub>2</sub>-neutral zu sein.

Heute wird intensiv daran geforscht, die Verfahren der ersten Generation zur Nutzung von Biomasse, bei der man vornehmlich Früchte zur Herstellung von Kraftstoffen nutzt, durch Verfahren der zweiten Generation zu ersetzen, bei denen die gesamte Pflanze eingesetzt wird. Allerdings ist dies aufgrund der hohen Widerstandsfähigkeit von Lignocellulose nicht einfach, da diese nur schwierig zu depolymerisieren ist, so dass man sich häufig thermischer Prozesse bedienen muss. Zur Vergasung von Biomasse gibt es bereits Pilotanlagen, das entstehende Synthesegas kann durch katalytische Verfahren entweder zu Methanol oder zu Kohlenwasserstoffen weiterverarbeitet werden.

Alternativ kann man die Lignocellulose zunächst in ihre Bestandteile auftrennen. Der Lignin-Anteil bereitet dann bei der Weiterverarbeitung die größten Schwierigkeiten; heute wird er noch immer weitgehend einfach verbrannt. Hier gibt es aber neue Ansätze, bei denen das Lignin durch katalytische Hydrierverfahren, entweder mit Wasserstoff oder über sogenannte Transferhydrierungen in einfache aromatische Moleküle hydrogenolytisch umgewandelt wird, wodurch Flüssigfraktionen erhalten werden. Diese Prozesse befinden sich allerdings noch im Laborstadium und werden noch nicht technisch eingesetzt. Pilotanlage sind dagegen schon für den mikrobiellen Aufschluss von Biomasse in Betrieb. Hier wird es vornehmlich darum gehen, die Kosten der Prozesse weiter zu senken und die Geschwindigkeit des Lignocellulose-Aufschlusses zu steigern. An chemischen Verfahren zur Depolymerisation von Lignocellulose wird intensiv geforscht, hier gibt es z.B. mit der Mechanokatalyse neue Ansätze. Eine der großen Herausforderungen für chemische Aufschlussverfahren ist die häufig niedrige Selektivität zu den Zielprodukten. Es geht in der Zukunft also darum, durch maßgeschneiderte Katalysatoren die Ausbeuten zu steigern.

Die Kosten sind vielfach ein limitierender Faktor bei der Bereitstellung von Flüssigkraftstoffen und Chemikalien aus Biomasse: diese sind unter rein ökonomischen Gesichtspunkten oft nicht konkurrenzfähig gegenüber fossil

hergestellten Alternativen. Der Schiefergas-Boom der letzten Jahre favorisiert derzeit zusätzlich eher die fossilen Kraftstoffe, da die Kosten für Rohöl und Gas wieder gesunken sind. Langfristig ist allerdings Biomasse eine der wenigen Optionen, flüssige Kraftstoffe, die insbesondere im Luftverkehr noch lange unersetzlich bleiben werden, aus regenerativen Rohstoffen herzustellen. Zu beachten ist jedoch die Konkurrenz zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln. Wenn nicht die Früchte genutzt werden, ist diese Konkurrenz zwar nicht mehr direkt („Tank oder Teller“), über die Fläche gibt es aber noch immer teils einen indirekten Wettbewerb um die Anbauflächen. Schließlich sollte man berücksichtigen, dass es aus Gründen der Energieeffizienz und des Klimaschutzes bezogen auf das Gesamtsystem vorteilhaft sein kann, nicht Kraftstoffe aus Biomasse herzustellen, sondern geeignete Chemierohstoffe, bei denen man durch Biomasse als Ausgangsmaterial fossile Rohstoffe wie Öl, Erdgas, oder Kohle ersetzen könnte.

### Die Ergebnisse der Schülerlaborumfrage

Die Nutzung von Biomasse zur Herstellung von Kraftstoffen wird in einigen der Labors thematisiert. Die Experimente scheinen sich aber auf die Herstellung von Biodiesel und Bioethanol zu beschränken, beides eher Verfahren der ersten Generation, mit teils zweifelhafter CO<sub>2</sub>-Bilanz. Dies sollte man bei der Behandlung der Verfahren sicherlich erwähnen. Biokraftstoffe der zweiten Generation werden angesprochen, allerdings wird nicht klar, wie tiefgehend das Thema behandelt wird. Hier scheint eine Aufwertung durch geeignete Experimente an einigen Stellen möglich. Zumindest die Pyrolyse kann man auch in einem Schülerlabor durchführen, wohingegen die nachfolgenden Prozessschritte schwieriger sind. Den enzymatischen Abbau von Cellulose mit geeigneten Enzymcocktails und die anschließende Vergärung zu Ethanol könnte man – wenn genügend Zeit ist, ebenfalls im Rahmen von Schülerversuchen durchführen.

Wesentliche physikalisch-chemische Grundlagen, die vermittelt werden sollten, sind der Energieerhaltungssatz (Licht in Biomasse in Kraftstoffe, wo liegen die Verluste?), bei der Biodieselherstellung kann man auch das chemische Gleichgewicht gut diskutieren. Außerdem sollte man das Problem der CO<sub>2</sub>-Bilanz bei einer ganzheitlichen Betrachtung thematisieren.

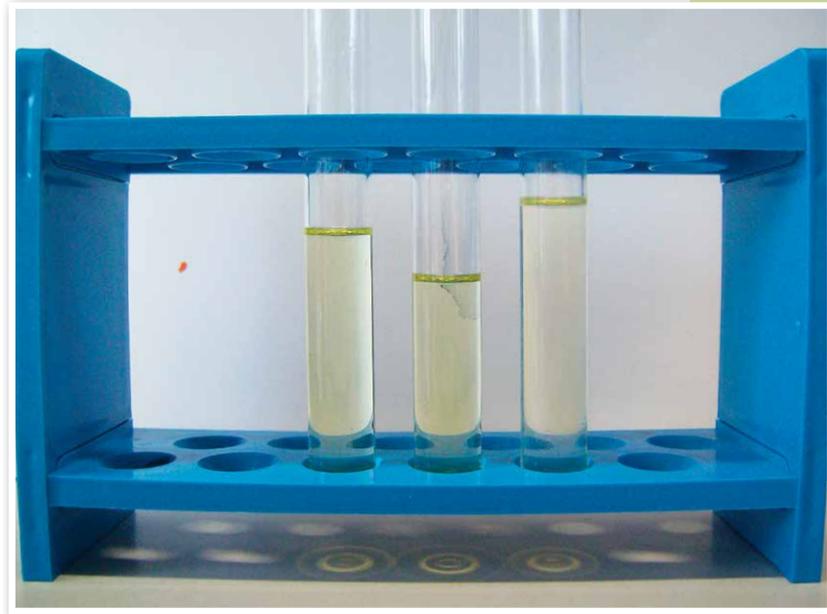


**Prof. Dr. Ferdi Schüth**

Max-Planck-Institut für Kohlenforschung  
Kaiser-Wilhelm-Platz 1, 45470 Mülheim  
schueth@kofo.mpg.de



# HERSTELLUNG VON BIODIESEL AUS RAPSÖL



**Schülerlabor FreiEx**  
UFT – Zentrum für Umweltforschung  
und nachhaltige Technologien ;  
Universität Bremen  
<http://www.freisex.uni-bremen.de/>



### **Herstellung von Biodiesel aus Rapsöl**

Erdöl ist eine der wichtigsten fossilen Rohstoffe. Kunststoffe, synthetische Farben sowie Benzin und Dieselmotoren werden aus diesem Rohstoff gewonnen. Die Nutzung von Erdöl als Rohstoff ist allerdings an etliche Nachteile gebunden, sodass die Suche nach geeigneten Alternativen immer drängender wird. Biodiesel auf der Basis von Raps stellt eine derartige Alternative dar, die sowohl Vor- als auch Nachteile bietet. In der Versuchsreihe lernen die SchülerInnen Biodiesel kennen und bewerten dessen Eignung als Kraftstoffalternative im Vergleich mit konventionellen Dieselmotoren.

Durch eine katalytische Umesterung wird Fettsäuremethylester aus Rapsöl und Me-

thanol gewonnen. Rapsölmethylester (RME) weist Eigenschaften auf, die denen konventioneller Dieselmotoren vergleichbar sind.

Während des Experiments setzen die SchülerInnen Rapsöl mit Ethanol und katalytischen Mengen Natriumhydroxid um. Als Nebenprodukt wird während dieser Reaktion Glycerin gebildet, das in einem einfachen Trennschritt entfernt werden kann. Anschließend werden die Eigenschaften des hergestellten Produktes experimentell mit denen von konventionellen Dieselmotoren verglichen. Die Vor- und Nachteile dieser Kraftstoffalternative können so von den Schülerinnen und Schülern selbstständig ergründet werden.

## Brennstoffzellen und Batterien

### Die Technologie

Batterien und Brennstoffzellen sind die einzigen Technologien, die chemische Energie direkt in elektrische Energie wandeln können, und dies zu einem extrem hohen Wirkungsgrad, von dem thermische, d.h. verbrennungsbasierte Kraftwerke nur träumen können. Dies macht sie extrem attraktiv, gerade im Hinblick auf das Ziel der signifikanten Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Kern der Technologie ist die freiwillig, jedoch getrennt ablaufende Oxidation und Reduktion von chemischen Spezies. Diese sind jeweils mit Elektronenabgabe und -aufnahme verbunden, sodass man von elektrochemischen Reaktionen spricht. Technisch nutzbar ist dann der elektrische Strom, der entsteht, wenn man beide Reaktionsorte über einen elektrischen Leiter, z.B. ein Kupfer-Kabel, verbindet, der den Austausch der Elektronen erlaubt. Während die chemischen Spezies in Batterien direkt am Reaktionsort, der Elektrode, gespeichert sind, müssen die Reaktanden in Brennstoffzellen erst von extern an die Elektroden der Zelle transportiert werden. Brennstoff und Oxidationsmittel, meist Luftsauerstoff, müssen also gut transportierbar sein. Anhand des Konzeptes wird aber auch klar, dass es *die* Batterie und *die* Brennstoffzelle nicht gibt: Es sind unzählige chemische Spezies und Kombinationen von Spezies einsetzbar. Limitierend auf die Auswahl wirkt die Thermodynamik, d.h. wieviel Energie und Spannung ist mit einer Reaktandenkombination theoretisch maximal erreichbar, aber insbesondere auch die Kinetik, d.h. wie schnell sind die Reaktionen und der Stofftransport, und gibt es Nebenreaktionen. Hieraus ergeben sich vielfältige Fragestellungen, gerade im Hinblick auf das Material- und Zeldesign: Welches Elektrodenmaterial ist stabil, preiswert und katalysiert gut die Reaktion? Welcher Elektrolyt erlaubt den Austausch der Ionen zwischen den Elektroden, wie chemisch, thermisch und mechanisch stabil ist er und wie leitfähig? Wie müssen Elektrode und Elektrolyt konstruiert werden, um möglichst wenig Transportwiderstände, d.h. Energieverluste zu erhalten? Brennstoffzellen werden insbesondere hinsichtlich der Elektrolytmaterialien kategorisiert (Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle, Festoxidbrennstoffzelle, alkalische Brennstoffzelle), die den Temperaturbereich bestimmen. Die Anzahl der einsetzbaren Brennstoffe ist begrenzt, da sich

aufgrund Kinetiklimitationen bisher nur wenige Brennstoffe (Methanol, Wasserstoff) stabil direkt oxidieren lassen.

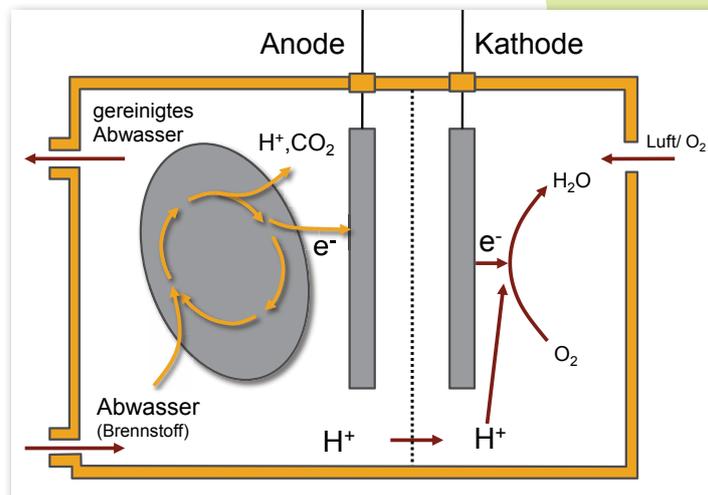


Abb. 1: Aufstrebende Technologie mikrobielle Brennstoffzelle

Batterien werden hinsichtlich der aktiven Elektrodenmaterialien kategorisiert (Nickel-Metallhydrid-Batterie, Bleisäurebatterie, Lithium-Ionen-Batterie); während bei den meisten Zellen wässrige Säuren und Laugen einsetzbar sind, werden bei Batterien mit Lithium (Li) organische Elektrolyte eingesetzt, die zersetzungstabiler sind als Wasser. Zusammenfassend gilt, dass die Chemie einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung elektrochemischer Energiezellen hatte und haben wird.

### Prognose hinsichtlich der zukünftigen Bedeutung

Elektrochemische Energiewandler und -speicher werden als essentielle Säule in der Energiewende gesehen. Batterien erlauben die direkte und insbesondere dynamische Speicherung elektrischer Energie aus Wind- und Photovoltaik-Kraftwerken und die bedarfsgerechte Abgabe dieser Energie für die Endverbraucher, ob nun im Automobil, im Laptop oder zuhause. Da Batterien eine begrenzte Kapazität haben, ist für langfristige, auch dynamische Speicherung insbesondere größerer Elektrizitätsmengen die Kombination aus Elektrolyse (Speicherung der Energie durch Wasserstoffgeneration) und Brennstoffzelle (Elektrizität aus Wasserstoff) attraktiv. Sowohl Batterien als auch Brennstoffzellen er-

lauben in diesem Szenario eine CO<sub>2</sub>-freie und hocheffiziente Energieversorgung.

Unter den Brennstoffzellentypen haben sich insbesondere die Wasserstoff-betriebene Polymerelektrolytmembranbrennstoffzelle und die meist Reformat (Wasserstoff+CO+CO<sub>2</sub>)-betriebene Festoxidbrennstoffzelle durchgesetzt; die Zellen sind einfach in der Handhabung, stabil und haben gute Leistungsdichten. Ihre Marktdurchdringung wird dadurch behindert, dass die eingesetzten Materialien sehr teuer sind, z.B. unter Verwendung von Platin (Pt) oder seltenen Erden als Katalysator, und die Zellen sehr empfindlich auf Verunreinigungen sind. Neben dem Bestreben, die Katalysatorbeladung zu reduzieren, werden zunehmend auch radikal andere alternative Zelltypen erforscht, die einen Technologiesprung hinsichtlich Kosten, Robustheit und Einsatz alternativer Brennstoffe versprechen. Hierzu gehören hinsichtlich der Kostenreduktion alkalische Polymerelektrolytmembranbrennstoffzellen, die potentiell Pt-frei arbeiten können und damit eine signifikante Kostenreduktion versprechen.

Im Bereich der Grundlagen- und zunehmend angewandten Forschung sind mikrobielle Brennstoffzellen (Abbildung 1) als interessante Entwicklung zu nennen. Der Einsatz von Bakterien als Katalysatoren ermöglicht nicht nur eine Erweiterung des Spektrums der einzusetzenden Brennstoffe hinsichtlich komplexer Brennstoffe, sondern erlaubt auch eine effiziente Aufspaltung von C-C-Bindungen. Die Strom- und Leistungsdichten mikrobieller Brennstoffzellen liegen deutlich unter denen chemischer Brennstoffzellen. Allerdings erlaubt die Robustheit des Biokatalysators und seine Adaptation an verdünnte Substrat- (Brennstoff-) konzentrationen eine Energieerzeugung aus verdünnten Systemen wie Abwasser. Die Energieerzeugung aus Abwasser geht dabei einher mit einer Abwasserreinigung, was mikrobielle Brennstoffzellen nicht nur zu einer Energie- sondern auch zu einer Umwelttechnologie macht. Trotz des starken biologischen Bezugs hat die Chemie der mikrobiellen Brennstoffzellen eine große Bedeutung

Der Batteriebereich wurde in den letzten Jahren von Li-Ionen-Batterien dominiert, die an Leistungs- und Energiedichte herkömmliche Batterietypen wie Nickel-Metallhydrid

und Bleisäurebatterien übertreffen. Li-Ionen-Zellen sind dabei kontinuierlich stabiler und leistungsfähiger geworden. Intensiv geforscht wird derzeit an alternativen Aktivmaterialien, die eine höhere Energiedichte aufweisen sowie an Elektrolyten, die den hohen Anforderungen, insbesondere hinsichtlich elektrochemischer Stabilität sowie Sicherheit, genügen. Auch hier gibt es alternative Technologien, die einen Technologievorsprung hin zu höherer Energiedichte und Sicherheit versprechen. Hierzu gehören Li-Schwefel-Batterien hinsichtlich Energiedichte sowie Zink-Luft-Sekundär-Batterien hinsichtlich Energiedichte, Sicherheit und Umweltfreundlichkeit. Herausforderungen liegen dabei im Material- und Zell-Design, das zyklenstabile und leistungsfähige Zellen ermöglicht. Derzeitige Zellen sind noch weit entfernt von der Kommerzialisierung. Zwischen Batterien und Brennstoffzellen liegt die Redox-Flow-Zelle, in der eine Vanadiumlösung durch die Zelle gefördert wird, die an der Elektrode oxidiert bzw. reduziert. Auch hier finden derzeit umfangreiche Studien statt, die die Leistungs- und Energiedichte der Zellen steigern sollen.

### Die Ergebnisse der Schülerlaborumfrage

Das in der Studie identifizierte Angebot zu Brennstoffzellenversuchen umfasst etliche Labore mit Wasserstoff- und Methanol-betriebenen Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen. Auch alternative Brennstoffe wie Ethanol oder sogar Glucose und Hydrazin werden verwendet. Von Hydrazin ist aufgrund der Cancerogenität abzuraten. Ansonsten umfassen die Versuche jedoch alle - bis auf biologische. Niedertemperaturbrennstoffzellen und sind sowohl zahlreich als auch ausgewogen. Festelektrolytbrennstoffzellen eignen sich auf der langen Aufheizzeit und der notwendigen Einhausung weniger für Schülerversuche. Erweiterbar wäre das Angebot dahingehend, dass neben der Brennstoffzelle eine Elektrolysezelle betrieben wird, sodass die Reversibilität des Prozesses, jedoch unter Nutzung anderer Katalysatoren deutlich wird.

Im Batteriebereich wird in den Laboren jeweils ein Batterietyp untersucht. Die Versuche sind sehr unterschiedlich aufgestellt, mit experimentellen Zellen einerseits und etablierten Zellen, wie Nickel-Metallhydrid, andererseits. Um den Schülern die Diversivität darzustellen, wäre sicherlich ein Vergleich

von zwei Zellen sinnvoll. Hier könnte z.B. eine kommerzielle mit einer experimentellen Zelle verglichen werden. Redox-Flow-Zellen sind überraschend weit verbreitet; dies liegt u.a. auch daran, dass der Reaktionsfortschritt in der Farbe des Elektrolyten sichtbar ist. Im Allgemeinen gibt es weniger Batterie- als Brennstoffzellenlabore, sodass hier ein weiterer Aufbau empfohlen wird. Denkbar ist der Vergleich Brennstoffzelle, Elektrolysezelle und Batterie.



**Prof. Dr.-Ing. Ulrike Krewer,**

*Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik,  
Franz-Liszt-Str. 35, 38106 Braunschweig*



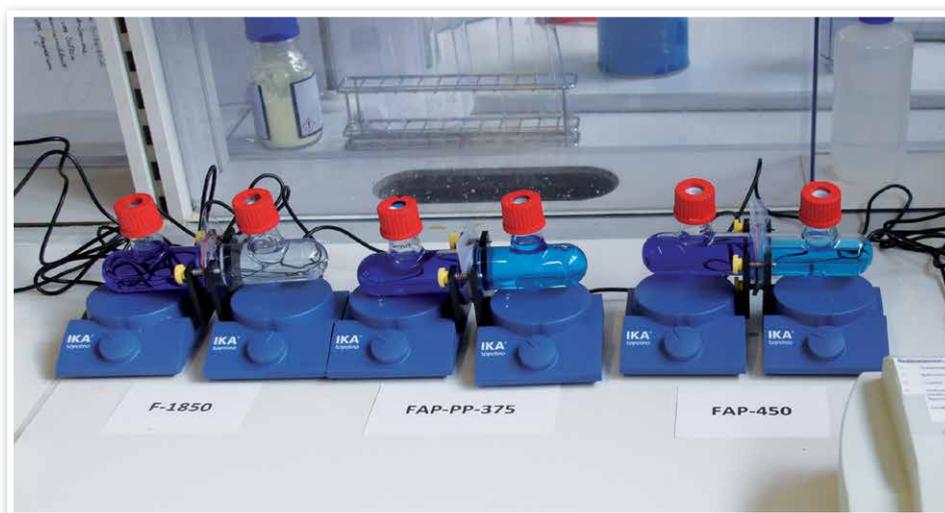
**Prof. Dr. rer. nat. habil. Uwe Schröder,**

*Institut für Ökologische und Nachhaltige Chemie,  
Hagenring 30, 38106 Braunschweig*





# REDOX-FLOW-BATTERIE





### Redox-Flow-Batterie

Bei der Vanadium-Redox-Flow-Batterie handelt es sich um eine vorteilhafte Speichertechnologie für Strom aus regenerativen Energiequellen. Dieser elektrochemische Energiespeicher zeichnet sich durch hohe Zyklenzahl, hohen Wirkungsgrad, schnelle Reaktionszeit und unabhängige Skalierung von Leistung und Energie aus. Das Prinzip der Vanadium-Redox-Flow-Batterie wird im Experiment veranschaulicht. Die Energie wird in Form flüssiger löslicher Redox-Paare gespeichert, die unterschiedliches elektrochemisches Potential aufweisen. Die chemisch aktive Flüssigkeit wird in der Realität jeweils durch die Halbzellen der Batterie gepumpt, die über eine Membran voneinander getrennt sind.

Im Demonstrationsexperiment zeigen wir eine solche Durchlaufzelle (siehe Abbildung: Vanadium-Redox-Flow-Zelle; der gelbe Elektrolyt im „Tank“ ist eine  $(VO_2)^+$ -Lösung ( $V^{5+}$ ), der violette Elektrolyt im anderen „Tank“ ist eine  $V^{2+}$ -Lösung; die Batterie befindet sich also im aufgeladenen Zustand. Rechts im Bild erkennt

man die peristaltische Pumpe). Aufgrund der Gefahren, die Vanadium-Ionen mit sich bringen, ist von einem direktem Umgang durch SchülerInnen abzusehen.

Für das Demonstrationsexperiment verwenden wir einen einfachen Aufbau aus zwei durch die Membran getrennten Halbzellen aus Glas. Als sehr aufschlussreich haben sich Permeationsmessungen erwiesen, also die Untersuchung der Fragestellung: wie rasch permeieren Vanadium-Ionen durch die ionenleitende Membran, die die beiden Halbzellen voneinander trennt. Dazu wird in jeder der drei Standzellen die linke Halbzelle mit blauer 1 mol  $(VO)_2SO_4$  Lösung und die rechte Halbzelle mit farbloser 1 mol  $MgSO_4$ -Lösung gefüllt (siehe Abbildung: Drei Vanadium-Redox-STAND-Zellen, hier eingesetzt für Permeationsmessungen). Und man sieht schon mit bloßem Auge, dass die Vanadium-Kationen in dieser Zelle nicht von links nach rechts permeieren können.

## Elektrochemische Wasserstofftechnologie

### 1. Power-to-Gas

#### 1.1 Das Konzept

Ein wichtiger Baustein unseres zukünftigen Energiesystems soll auf der Bereitstellung von Wasserstoff basieren. Man nennt das Konzept Power-to-Gas – im Fachjargon kurz: P2G. Zunächst wird Strom aus erneuerbaren Quellen für Wasserelektrolysen verwendet.

Die Reaktionsgleichung:  $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$

Die stoffliche Ausbeute ist nahezu quantitativ, der energetische Wirkungsgrad ist ca. 60%. Sauerstoff ist meist nur Abfallprodukt. Der Wasserstoff soll dann – in Umkehrung der Reaktionsgleichung - wieder in Brennstoffzellen oder in Gaskraftwerken (Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk, GuD), oder Blockheizkraftwerken, BHKW, mit elektrischen Wirkungsgraden von etwa 50% zur Stromerzeugung genutzt werden. (BHKW haben niedrigere elektrische Wirkungsgrade, deren Abwärme wird aber größtenteils genutzt). Von dem ursprünglich erzeugten Strom werden so etwa 30% wieder als Strom beim Verbraucher ankommen, wenn man die Transportverluste nicht berücksichtigt.

#### 1.2 Der Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad fragt in unserem Fall, wieviel Strom (kWh) ich investieren müsse, um den Energieinhalt des erzeugten Wasserstoffs zu gewinnen. Oft wird dazu das Verhältnis der gemessenen Zellspannung zu der theoretischen Zellspannung (1,23 V) herangezogen. Bei einer Zellspannung von 1,7 V und vollständigem Umsatz ergibt sich ein Wirkungsgrad von 72%. Dies ist aber nur ein Teilaspekt. Der Stromaufwand, der für die gesamte Elektrolyseanlage, für den Zellenraum, für die Versorgung der Elektrolysezellen und für die verschiedenen Hilfseinrichtungen aufgewendet werden muss, gehört ebenso mit in die Rechnung wie Umsatzeinbußen oder stoffliche Verluste. So kommen die oben genannten 60% zustande, und so wird auch der Wirkungsgrad bei Brennstoffzellen oder bei Gaskraftwerken ermittelt.

#### 1.3 Die Wirkungskette

Um eine Technologie richtig einordnen zu können, ist es wichtig, die Wirkungsgrade der konkurrierenden Verfahren mit zu betrachten. Abb. 1 gibt dazu eine knappe Übersicht. Power-to-Gas konkurriert mit anderen, deut-

lich effizienteren Stromspeichertechnologien, Pumpspeicherkraftwerken, Batterien oder Druckluftspeichern (AA-CAES: Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage).

### Strom gespeichert: Die Wirkungskette

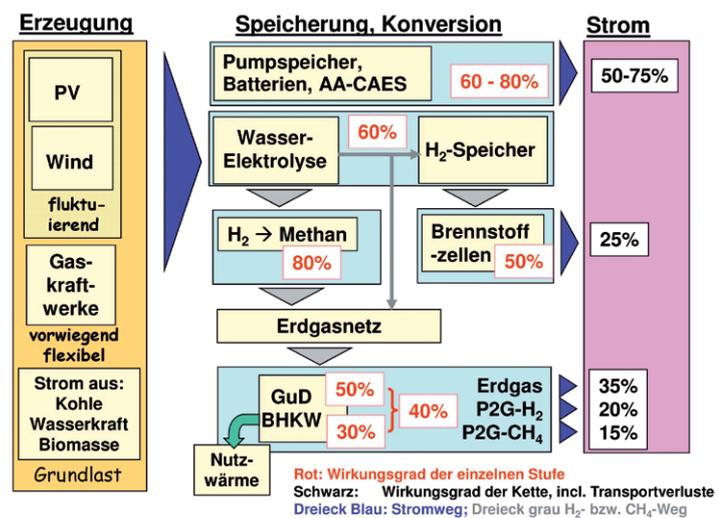


Abb.1: Verschiedene Stromspeicherwege im Vergleich (H. Pütter, in: Energie, Technologien und Energiewirtschaft, DPG-Frühjahrstagung 2013, S.78, H. Bruhns, Hrsg., ISBN978-3-9811161-4-4)

Für die Frage, wieviel Strom am Ende beim Kunden ankommt, müssen auch noch die energetischen (und stofflichen) Transportverluste mit berücksichtigt werden. Dies ist zuweilen wichtig, um zu entscheiden, ob viele kleine dezentrale Anlagen mit kurzen Transportwegen oder nur einige zentrale, deutlich effizientere Großanlagen mit langen Transportwegen gebaut werden sollen.

## 2. Zukünftige Bedeutung

Andere Speichertechnologien, wie Pumpspeicherkraftwerke oder Batterien, haben einen mehr als doppelt so hohen Gesamtwirkungsgrad. Warum wird dann an einer so unergiebigem Technologie trotzdem intensiv geforscht?

Das Argument dafür lautet: In Flautezeiten, in denen über eine Woche oder noch länger die beiden Hauptsäulen unseres zukünftigen Stromsystems, Wind und Photo-voltaik, weitgehend ausfallen, wird ein chemischer Energiespeicher benötigt, dessen Lagerung unkritisch ist. In windarmen, nebligen Novem-

berwochen beispielsweise steht dann ausreichend Brennstoff für die Stromerzeugung bereit.

Wasserstoff hat mit einem Heizwert von 120 MJ/kg (33,3 kWh/kg) eine dreimal so hohe Energiedichte wie Heizöl, und die Technologien zur Lagerung und zum Transport sind technisch ausgereift.

Voraussichtlich wird der Bau eines Wasserstoffnetzes mit den entsprechenden Speichern eine sehr teure Sache. Besser wäre es, das existierende, gut ausgebaute Erdgasnetz mit seinen riesigen Speichern zu nutzen.

Da die Zumischung von Wasserstoff zu Erdgas auf etliche technische und regulatorische Schwierigkeiten stößt, schlägt man vor, den Wasserstoff mit CO<sub>2</sub> zu Methan umzusetzen und dieses dann dem Erdgas, dessen Hauptbestandteil ja Methan ist, zuzumischen. Auch dieser Weg wird intensiv in Labors und in Pilotanlagen untersucht. Trotz eines weiteren deutlichen Verlustes hätte dieser Weg einen Vorteil: Wasserstoff hat zwar einen hohen gravimetrischen Energieinhalt, sein volumetrischer Energieinhalt ist mit 10,7 MJ/m<sup>3</sup> Heizwert aber etwa viermal geringer als der von Erdgas oder von Methan (35,9 MJ/m<sup>3</sup>). Da Erdgas gasförmig gespeichert und transportiert wird, würde man wertvolle Speichervolumina verlieren, wenn man dem System Wasserstoff zumischen würde.

Bei der Bewertung der einzelnen Optionen sind in erster Linie die Stromspeicherkosten entscheidend. Wenn zum Beispiel aus einer zu 10 Cent „geernteten“ Kilowattstunde am Ende der Wirkungsgradkette nur 0,2 Kilowattstunden ankommen, beträgt allein der Stromkostenanteil bereits 50 Cent. Hinzu kommen die Investitions- und Betriebskosten der Speicherkette. Die Gesamtkosten sind die Achillesferse von Power-to-Gas. Am Ende ergeben sich Strompreise von deutlich über einem Euro pro Kilowattstunde; dabei sind Steuern und Gebühren, die unsere Stromrechnung bestimmen, noch nicht berücksichtigt.

Auch Batterien haben derzeit noch mit hohen Kosten zu kämpfen. Die dramatische Entwicklung z.B. auf dem Gebiet der Lithiumionenbatterien für die Elektromobilität lässt aber hier deutliche Reduktionen erwarten.

Kostenbetrachtungen sind meist schwierig wegen der undurchsichtigen Datenlage; weder Forschungsinstitute noch Firmen lassen sich gern in die Karten schauen.

Das Fazit aus diesen technischen und wirtschaftlichen Überlegungen: Ob sich Power-to-Gas durchsetzt, ist ungewiss. Mit fossilem Erdgas befeuerte Kraftwerke könnten eine zukünftige „Stromwelt“ in den genannten Flautezeiten versorgen, ohne die Klimaziele Deutschlands zu gefährden. Anhand der Daten aus Abb.1 lässt sich dies im Unterricht beim Thema Klimaschutz und Stromverbrauch diskutieren.

### 3. Ein Gedankenexperiment

Anhand einiger von Schülern leicht zusammenzutragender Daten, können Möglichkeiten und Grenzen zweier Stromspeichertechniken diskutiert werden. Damit werden einige Herausforderungen unserer zukünftigen Stromversorgung beleuchtet.

#### 3.1 Datenermittlung

Der Strombedarf einer Schule wird ermittelt:

- *an einigen typischen Tagen (Stundenmittel), Schultagen, Wochenenden, etc.*
- *als Monatsmittel aller zwölf Monate*
- *im Mittel der vergangenen Jahre*

Vielleicht verfügen die Schule oder einige Elternhäuser über Photovoltaikanlagen, dort werden die Daten der Stromerzeugung nach dem gleichen Schema ermittelt.

#### 3.2 Auswertung der Daten

Die Daten werden synchronisiert. Daraus ergibt sich ein Satz von Differenzen zwischen Stromerzeugung und –bedarf (stündlich, monatlich, jährlich). Aus den Jahreswerten wird errechnet, wie groß eine Photovoltaikanlage sein müsste, wenn der erzeugte Strom mit 100% Wirkungsgrad gespeichert und wieder verfügbar gemacht werden könnte.

#### 3.3 Szenario 1: Batteriespeicher

a) Die Schule besitzt eine Batterie mit einem Wirkungsgrad von 80% (Speicherung + Abgabe), sie kann die maximale Differenz einer Stunde (in kW) aufnehmen und abgeben und hat eine Kapazität (kWh) zur Stromaufnahme von zwei Tagen. Wie viel Strom muss die Schule aus dem Netz beziehen und wie viel Strom muss sie ins Netz exportieren?

b) Wie sehen die Werte für die Schule bei kleineren Batterien aus (z.B. jeweils 50% der ersten Auslegung)?

### 3.4 Szenario 2: Power-to-Gas

a) Die Schule hat eine Wasserelektrolyse mit angeschlossenem Wasserstoffgasometer (60% Wirkungsgrad) und eine Brennstoffzelle (50% Wirkungsgrad). Die Wirkungsgradkette ist also 30%. Diese Power-to-Gas-Anlage kann ebenfalls die maximale Differenz (kW) aufnehmen, ihr Gasometer kann aber die erzeugte Wasserstoffmenge aller drei Sommermonate aufnehmen. Dieser Wasserstoff wird im Winter wieder verstromt. Wie viel Strom muss die Schule aus dem Netz beziehen, und wird sie auch Strom ins Netz exportieren?

b) Macht es einen Unterschied, wenn der Gasometer nur die Wasserstoffmenge eines Monats oder nur einer Woche aufnehmen kann?

### 3.5 Vergleich der Systeme

Welches System ist für die Unterrichtszeit geeigneter, welches für die Ferienzeit? Wäre eine Kombination der Systeme günstig?

### 3.6 Erweiterung der Betrachtung

Die Abhängigkeit von einer Photovoltaikanlage als einziger regenerativer Stromquelle ist lehrreich und als Einstieg in die Thematik nicht zu komplex, aber dies ist ein Extremfall. Mit dem lokalen Stromversorger oder z.B. mit dem Fraunhofer Institut IWES in Kassel könnten Stromerzeugungsszenarien erarbeitet werden, die der Realität näherkommen – z.B. indem das lokale Windaufkommen mit berücksichtigt wird.



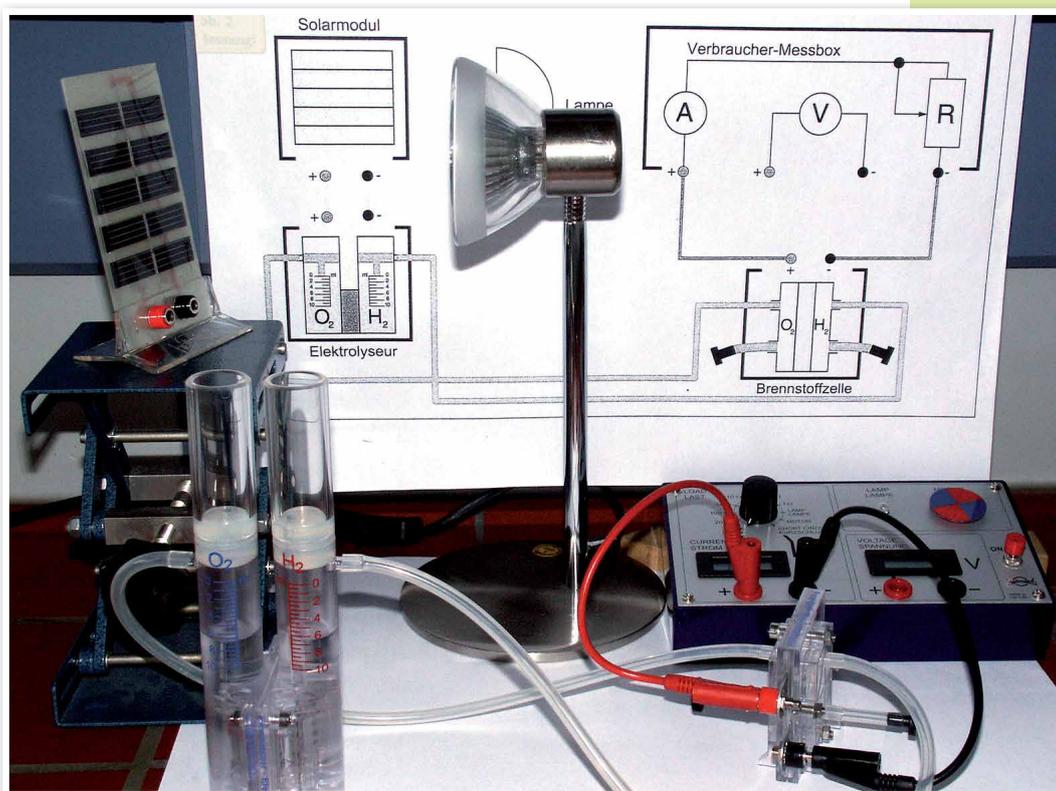
**Dr. Hermann Pütter**

Haardter Str. 1a  
67433 Neustadt  
puetter-neustadt@t-online.de





# PHOTOVOLTAISCHE GEWINNUNG VON WASSERSTOFF UND SEINE NUTZUNG





### **Photovoltaische Gewinnung von Wasserstoff und seine Nutzung**

Nach Versuchen zur herkömmlichen Elektrolyse von Wasser wird eine moderne Elektrolysezelle mit Pd-beschichteter Polymermembran eingesetzt. Die Schüler sollen erkennen, dass durch den Einsatz moderner Materialien die Elektrolyse mit reinem Wasser direkt möglich ist und keine Zugabe von Substanzen zur Erhöhung der Leitfähigkeit des Wassers mehr notwendig ist.

Die Energiequelle zur Wasserspaltung ist eine kleine Solarzelle. Für die Elektrolyse des Wassers ist eine Mindestspannung erforderlich (Kennlinie der Elektrolysezelle). Sind genug Wasser- und Sauerstoffgas im Gasometerteil der Elektrolysezelle gespeichert, können Gasproben unter Wasser in Reagenzgläsern aufgefangen werden. Die Gasproben werden auf Brennbarkeit untersucht. Durch Abmischung der Gase wird ein „Knallgas“ erzeugt, dessen Zündung den Schülern den Energiegehalt des

Wasserstoffgases verdeutlicht. Anschließend wird an den gefüllten Gasspeicher der Elektrolysezelle eine Brennstoffzelle angeschlossen. Die Leitungen zur Solarzelle werden entfernt und an die Brennstoffzelle ist nun ein elektrischer Verbraucher (kleiner Motor) angeschlossen. Somit wird für die Schüler sichtbar, wie durch den Verbrauch von Wasserstoff in der Brennstoffzelle Elektroenergie erzeugt werden kann. Gleichzeitig wird deutlich, dass Solarenergie durch Wasserelektrolyse im Wasserstoff zwischengespeichert werden kann.

Die Versuche zur Elektrolyse und Brennstoffzelle sind für kleinere Gruppen geeignet. Dabei können unterschiedliche Solarzellen verwendet werden. Der Versuchsaufbau nach vorgegebener Schaltskizze erfolgt als Gruppenarbeit. Bei jüngeren Schülern ist oft eine Hilfestellung durch Labormitarbeiter notwendig.

## Ressourcenstrategien für eine chemisch-energetische Transformation – Batterien und Brennstoffzellen – alles nur eine Frage der Chemie?

### Batterien und Brennstoffzellen – State of the art

Batterien- und Brennstoffzellen sind elektrochemische Speichersysteme mit unterschiedlicher Ladedauer, Energie- und Leistungsdichte, Speicherkapazität und –dauer wie auch Lebenszyklusdauer, unterschiedlichem Wirkungsgrad in unterschiedlichen Anwendungen (stationär, mobil, portabel) für private oder industrielle Nutzungsbereiche.

State of the art bilden in der Batterietechnologie die

- Blei-Säure-Batterie
- Lithium-Ionen-Batterie
- Nickel-Metall-Hydrid-Batterie
- (Vanadium-) Redox-Flow-Batterie (auch V-V-Batterie genannt)
- Hochtemperatur-Batterie

in der Brennstoffzellentechnologie

- Stationäre Festoxid-Brennstoffzellen (SOFC) zur Kraft-Wärme-Kopplung
- Portable PEM-Brennstoffzellen

Da es sich sowohl bei den Batterien als auch den Brennstoffzellen um chemische Energiespeichersysteme handelt, ist der Beitrag der Chemie von zentraler Bedeutung und systemrelevant. Er stellt die unabdingbare technologische Voraussetzung für die Transformation von Energieversorgungssystemen im Kontext der Energiewende dar.

Beide Speichersysteme weisen allerdings mittlerweile einen hohen Bedarf an potentiell als kritisch zu bewertenden Materialien auf. Bei den Batteriesystemen handelt es sich vornehmlich um Lithium, Vanadium, Nickel, Natrium, Schwefel, Cadmium, Titan, Kobalt, Zirkonium, etc.; bei den Brennstoffzellen um Nickel, Kalium, Yttrium und Lanthan sowie die Platingruppenmetalle (Platin, Palladium, Rhodium, etc.) Für zukünftige und im Sinne von Nachhaltigkeit zukunftsfähige Energiespeichersysteme ist es daher unerlässlich, diese kritischen Materialien zu identifizieren, die Bedarfe kumulativ hochzurechnen um den zukünftigen Rohstoffbedarf unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips zu ermitteln. Das Ergebnis stellt eine Bewertungsgrundlage dar,

die über chemischtechnische Bewertungskriterien hinausgeht. Die zukünftige Bedeutung des zweifelsfrei immensen Beitrags der Chemie auf natur- und materialwissenschaftlicher Ebene ist um das Konzept der Stoffgeschichten zu erweitern, soll sie mit zur Problemlösung im Kontext des Spannungsfeldes machbarer Technologien vs. endlicher Ressourcen beitragen.

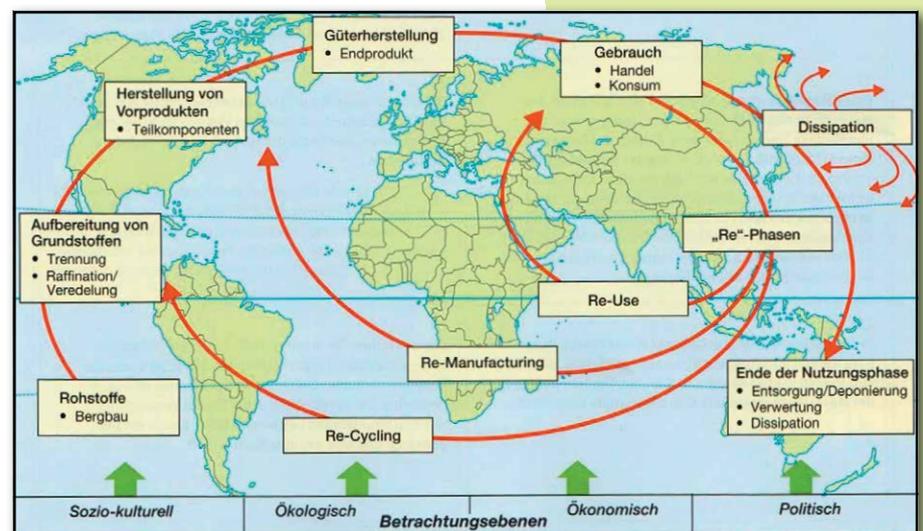


Abb.1: Konzept der Stoffgeschichten | © westermann

### Chemie und das Konzept der Stoffgeschichten – Prognose hinsichtlich der zukünftigen Bedeutung

Vor dem Hintergrund einer stetig zunehmenden Materialvielfalt in unseren Alltagsprodukten hat die Komplexität von global verknüpften Wertschöpfungsketten mit all ihren sozioökonomischen, politischen, ökologischen und sicherheitsrelevanten Aspekten und Wechselwirkungen eine Intensität erreicht, die neue Denk- und Herangehensweisen erfordert. Hier setzt das Konzept der Stoffgeschichten an, mit dem Ziel, realisierbare Nutzungsstrategien für einen zukunftsfähigen Umgang mit Stoffen, Materialien und Energie sowohl für Konsumenten als auch Produzenten zu entwickeln. Stoffgeschichten beschreiben die Biographie von Stoffen, die, alltäglich und in Korrelation mit innovativen Technologien und multioptio-

nalen Lebensstilen in Form unterschiedlichster Produkte selbstverständlich und oftmals unreflektiert genutzt werden.

Die grundlegende Idee der Stoffgeschichten resultiert aus der Erkenntnis, dass im Umgang mit alltäglichen Stoffen ein fehlendes Bewusstsein vorliegt. Das Ziel des Stoffgeschichten-Konzeptes ist es daher, den Werdegang bzw. die Transformationen eines Stoffes in Raum und Zeit zu veranschaulichen, nachvollziehbar, transparent und bewusst zu machen und für einen umsichtigen, wirtschaftlich effizienten und risikoarmen Ge- und Verbrauch von Ressourcen zu motivieren. Die Auseinandersetzung mit einem Stoff beleuchtet deshalb nicht nur die chemischen, physikalischen und materialwissenschaftlichen Eigenschaften, die ihn für bestimmte Funktionen und Einsatzbereiche, wie z.B. im Energiespeicherbereich, determinieren. Ebenso ist seine vielschichtige gesellschaftliche Bedeutung in vergangenen und gegenwärtigen Kulturen Gegenstand der Analyse. Bei der Betrachtung des Lebenszyklus' eines Stoffes – von der natürlichen Lagerstätte über die Phasen der Stoffgewinnung, Produktherstellung, Konsumption, Wiederverwertung (oder Entsorgung) – sollen daher all die vielfältigen Einflussfaktoren berücksichtigt werden, um seine Nutzung an die gesellschaftlichen Erfordernisse anzupassen. Zu einer vollständigen Stoffbiographie gehört entsprechend die Thematisierung seines Ge- und Verbrauchs genauso wie Überlegungen zu seiner Nachnutzung oder seinem Verbleib in der Umwelt. Auch Batterien und Brennstoffzellen verschwinden ja nicht einfach nach ihrer limitierten Lebensdauer, sondern durchlaufen weitere Prozesse, in denen sie wiederverwertet, gebunden oder in feinsten Form in der Umwelt verteilt werden. Die Einbeziehung von Lebensstil- und Life-Cycle-Betrachtungen in technische Machbarkeitsstudien sowie die Umsetzung der Ergebnisse aussagekräftiger Kritikalitätsanalysen in intelligente und zukunftsfähige Energiespeichersysteme stellt die Chemie zwar vor eine Herausforderung, erweitert jedoch ihren Bedeutungshorizont. Die konkrete Herausforderung für die Chemie besteht vor allem in der Überwindung ihrer Disziplingrenze und Erweiterung der chemischen Perspektive um weitere Disziplinen, die jeweils ihre eigene Sprache, Denk- und Arbeitsweise besitzen. Ohne eine gezielte und effiziente Ressourcenstrategie, die alle Akteure und deren Rolle entlang der

Wertschöpfungskette eines Produktes mit einbezieht, läuft die Chemie – gerade auf Grund ihrer hohen Relevanz hinsichtlich der Energie-wende - Gefahr, zukunftsfähige Lösungen auf Grund einer eindimensionalen technischen Herangehensweise, nicht zu erfassen.



**Prof. Dr. Armin Reller**

*Institut für Physik  
Lehrstuhl für Ressourcenstrategie  
Universität Augsburg  
Universitätsstraße 1a  
86159 Augsburg  
armin.reller@wzu.uni-augsburg.de*



# KUPFERRECYCLING AUS ELEKTRONIKSCHROTT

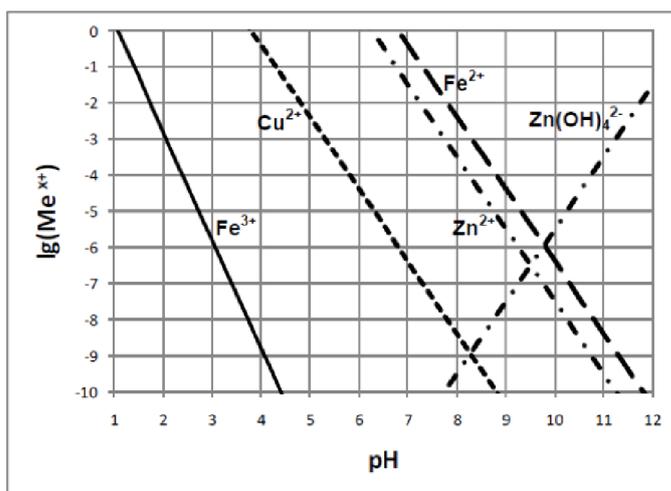


Abb.: Löslichkeit von Metallionen in Abhängigkeit vom pH-Wert.



## Kupferrecycling aus Elektronikschrott

### Nasschemische Verfahrensschritte des Elektronikschrottrecyclings am Beispiel des Kupfers

In der Zukunft werden speziell Edel- und Sondermetalle die Entwicklung von Technologien in der Energieversorgung, der Medizintechnik und der Informationstechnik und Telekommunikation bestimmen. Bis auf wenige Ausnahmen kommen diese Stoffe in der Natur nur als chemische Verbindungen vor und müssen in energieaufwendigen Prozessen als Reinstoffe erzeugt werden. Durch die Wiederverwertung von Metallen z. B. aus Elektro- und Elektronikschrott lassen sich oft deutliche Energieeinsparungen realisieren. Zur Gewinnung der reinen Metalle sind im letzten Schritt der Verfahrenskette nasschemische Verfahren unumgänglich. Dazu zählen die Fällung, die Laugung und der Ionenaustausch. Der Workshop des Flying Science Circus der Technischen Universität Clausthal „Was steckt in deinem Handy?“ verdeutlicht diese Methoden an Modellsubstanzen. Fällung und Laugung werden exemplarisch anhand der Fällung von  $\text{Cu}^{2+}$ -Ionen aus leicht saurer  $\text{CuSO}_4$ -Lösung durch Erhöhung des pH-Wertes und anschließender Auflösung des Niederschlages durch Komplexbildung mit  $\text{NH}_3$  dargestellt. Der sich bildende, tiefblaue Kupfertetramin-Komplex ist wasserlöslich und zeigt durch die Änderung der Absorptionswellenlänge im Vergleich zur Ausgangslösung (hellblau) eindrucksvoll den Austausch der Liganden des Kupfers. Feste Ionenaustauscher

und Solventextraktion werden ebenfalls exemplarisch an Kupfer- und Kobaltverbindungen gezeigt und die Verbindung zu Themen des Chemieunterrichts (Säuren, Basen, pH-Wert, Gleichgewichte, Komplexbildung) hergestellt. Der Verfahrensschritt der Solventextraktion spielt heute insbesondere in der Trennung der Schweren von den Leichten Seltenen Erden, sowohl im Primärbergbau als auch im Recycling Seltener Erden aus Nickel-Metallhydrid-Batterien eine wichtige Rolle. Aufgrund der überragenden Bedeutung der Seltenen Erden in vielen High Tech Produkten, angefangen von den Legierungen im Stahlguss, über die Nickel-Metallhydrid-Batterien, Brennstoffzellen, Windkraftanlagen, Elektro- und Hybridmotoren, in Katalysatoren oder als Leuchtstoffe in Displays suchten wir nach Modellexperimenten, mit denen sich, vergleichsweise schnell und optisch ansprechend der prinzipielle Ablauf einer Solventextraktion darstellen ließ. Das Kupfer wird zunächst mit  $\text{HCl}$  zum Kupfertetrachloro-Komplex (grün) umgesetzt und anschließend mit Hilfe eines in Kerosin gelösten Anionenaustauschers in die organische Phase überführt. Die wässrige Phase wird abgetrennt. Da der Komplex im pH-neutralen Umfeld nicht stabil ist, lässt sich das Kupfer als  $\text{Cu}^{2+}$  (hellblau) mit Wasser anschließend wieder extrahieren. Zur Trennung von Stoffgemischen lassen sich so die Unterschiede in der Komplexbildung mit verschiedenen Partnern nutzen.

Foto: Christian Ernst, TU Clausthal.

## „Intelligente“ Materialien

### Große Vielfalt und spannende Entwicklungen bei Materialien

Die Materialforschung ist ein weites Feld und bewegt sich an der Schnittstelle zwischen Chemie, Physik und Ingenieurwissenschaften. ChemikerInnen machen Stoffe und diese Stoffe sind die Grundlage jeden Materials. Beispiele für das weite Spektrum der im Kontext Energie relevanten Stoffe sind anorganische Legierungen, Koordinationsverbindungen wie die ‚metal organic frameworks‘ (MOFs), organische Leuchtdioden (OLEDs), Perowskite für Solarzellen, Katalysatoren, Thermoelektrika, oder auch poröse Materialien und Komposite sehr unterschiedlicher stofflicher Natur, darunter viele Hybridmaterialien. Es soll hier nur ein Beispiel herausgegriffen werden: Aerogele, hochporöse Festkörper mit sehr geringen Dichten bei gleichzeitig hoher mechanischer Festigkeit, die herkömmlich auf Silicatbasis in einem Sol-Gel-Prozess hergestellt werden. Hier gibt es Forschungsanstrengungen, solche Aerogele auf Basis von pflanzlichen Polysacchariden, insbesondere Cellulose mit ähnlich guten Eigenschaften herzustellen. Es ist in den letzten Jahren gelungen, die unlösliche faserartige Cellulose, das ubiquitäre Zellwandmaterial der Pflanzen, in Nanopartikel oder Nanofibrillen zu überführen. Dies kann chemisch und/oder mechanisch geschehen, wobei auch recht hohe Energieeinträge erforderlich sind. Das nanostrukturierte Material bildet mit Wasser transparente Hydrogele, die ähnlich wie die silicatbasierten Gele durch Austausch des Wassers gegen Alkohol erst in Alcolgele und anschließend durch Trocknung unter überkritischen Bedingungen (überkritisches  $\text{CO}_2$ ) unter Volumenerhalt in ultraleichte Aerogele überführt werden. Die Wärmeleitfähigkeit dieser Celluloseaerogele (Abb. 1) reicht noch nicht an die von Silicat-Aerogelen heran. Der Isolator ist wie auch in anderen Wärme-Dämmstoffen wie geschäumtem Polystyrol oder einem Federbett die Luft. Die poröse Struktur (Abb. 2) kann es jedoch ermöglichen, die Wärmeleitfähigkeit auf ca. 0,015-0,02 W/m·K und damit unter die von Luft (0,026 W/m·K) zu senken. Dieses scheinbare Paradox hängt mit der Porengrößen und deren Verteilung zusammen. Wie auch ein Federbett dann besonders leicht ist und gut isoliert, wenn es sehr feine Daunen enthält, so sollte auch das Aerogel nanoskalige Poren aufweisen. Um diese zu optimieren, wird auch an Hybridmaterialien aus

Polysacchariden und Silicat gearbeitet. Neben Cellulose lässt sich das ebenfalls am Zellwandaufbau beteiligte Pektin erfolgreich einsetzen. Der Vorteil des organischen Polymers Cellulose, ist die Polyfunktionalität der Zuckerbausteine, an die weitere Moleküle mit interessierenden Eigenschaften gekoppelt werden können. So verleiht die Veresterung mit langkettigen Fettsäuren dem Material einen hydrophoben Charakter, der es wasserabweisend macht. Hingegen neigen silicatbasierte Aerogele zur Feuchtigkeitsaufnahme und trocknen unter Rissbildung. Pektine zeigen wie viele Biopolymere eine natürliche strukturelle Variationsbreite, z.B. hinsichtlich des Veresterungsgrades, der wiederum das Verhältnis von hydrophilen und hydrophoben Bereichen bestimmt. Ein Problem sind derzeit noch die Kosten und das Upscaling.

Poröse Materialien können also mechanisch dennoch ausgesprochen stabil sein. Aufgrund ihrer geringen Dichte führen sie im Mobilitätsbereich zu Einsparungen, da weniger Masse transportiert werden muss. Ein Beispiel dafür, dass nicht nur die chemische Zusammensetzung und molekulare Struktur, sondern auch die supramolekulare und makroskopische Struktur betrachtet werden muss. Die Natur macht es uns vor: nicht nur beim Gefieder der Vögel, das in unseren Federbetten landet, auch beim Holz, einem beeindruckenden Kompositmaterial, das hinsichtlich seiner Wärmeisolation quer zu seiner Faserrichtung mit Porenbeton vergleichbar ist.

Porosität und große Oberflächen sind ein weit verbreitetes Konzept. Die poröse Struktur ist auch ein wichtiges Merkmal der MOFs. So hängt die optimale Kapazität für zu speichernde Gase auch mit der Porengröße im nanometer-Bereich und der aus kleinen Poren resultierenden großen inneren Oberfläche zusammen, die wiederum für die Physisorption des Wasserstoffs in einer quasi-flüssigen Form erforderlich ist. Da das Bauprinzip der MOFs

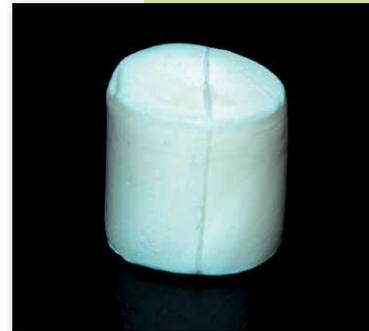


Abb. 1: Celluloseaerogel (N. Pircher, Department für Chemie, Abteilung für Chemie nachwachsender Rohstoffe, Universität für Bodenkultur Wien)

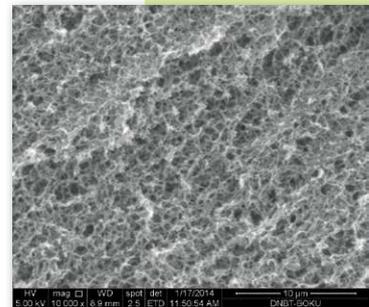


Abb. 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines Celluloseaerogels (N. Pircher, Department für Chemie, Abteilung für Chemie nachwachsender Rohstoffe, Universität für Bodenkultur Wien)

– Metallkationen, die mit kleinen starren polyfunktionellen Molekülen wie z.B. aromatischen Tricarbonsäuren über Koordinationsbindungen dreidimensionale Netzwerke ausbilden – weite Variationsmöglichkeiten zulässt, gibt es nahezu unerschöpfliche Optimierungsmöglichkeiten für den gewünschten Anwendungszweck. Auch für die Katalyse sind diese oberflächenreichen Materialien von Interesse.

### „Intelligente“ Materialien in Schülerlaboren

Die Umfrage unter den Schülerlaboren hinsichtlich ihren Angebote zum Themenfeld „Chemie und Energie“ ergab trotz expliziter Abfrage diverser, oben genannter Beispiele, wenig Rückmeldungen. Der Aspekt „Energie“ ist hier meist nicht so unmittelbar gegeben oder erkennbar wie bei Brennstoffzellen oder der Photovoltaik. Aber auch dort wird weniger die stoffliche Natur und der Aufbau des Elektrodenmaterials, von Membranen oder von Solarzellen thematisiert als die Funktionsweise bei der Energiewandlung. – Auf der sehr spannenden und chemienahen Materialseite gibt es also noch Nachholbedarf.

Dass die Chemie mit solchen Stoffen dazu beitragen kann, den Energiebedarf zu senken, hat i.d.R. mit den physikalischen Eigenschaften der Stoffe bzw. des aus Stoffen hergestellten Materials zu tun. So eignen sich für Thermo-elektrika Stoffe, die neben einer geringen Wärmeleitfähigkeit eine hohe elektrische Leitfähigkeit besitzen. Im Bereich der Wärmedämmung sind geringe Wärmeleitfähigkeit oder Stoffe mit hoher Wärmekapazität und geeignetem Phasenübergang mit möglichst hoher Schmelz-/Kondensationsenthalpie gefragt, bei leitfähigen Polymeren stark konjugierte Systeme etc. Diese Eigenschaften sind auf der atomaren bzw. molekularen Ebene begründet, jedoch in weiten Bereichen durch Strukturbildung auf höheren Hierarchieebenen, Kompositbildung oder Dotierung modifizierbar.

Das Prinzip der Porosität zieht sich dabei durch verschiedene Bereiche und kann als ein grundlegendes Bau- bzw. Strukturprinzip erkannt werden, das in der Natur weit verbreitet ist. Es ist auch mit einfachen Mitteln im Schülerlabor umsetzbar und hat diverse Alltagsbezüge. So verwendet man Treibmittel, um beim Kuchenbacken eine poröse Struktur zu erzeugen, die sich während des Backprozesses durch die Denaturierung von Proteinen verfestigen muss.

Man kann auch mechanisch Luft einrühren (Sahne schlagen). Solche alltagsbekannten Techniken kann man auf Werkstoffe übertragen, die Dichte der Produkte bestimmen, kalorimetrische Messungen durchführen, durch Belastung mit Gewichten auch einen Eindruck von der mechanischen Stabilität gewinnen. Solche Arbeiten bieten Schülerinnen und Schülern auch viel freien Experimentierraum, um Eigenschaften zu verändern. Bei dem Versuch, Aerogele auf Polysaccharidbasis oder auch aus Wasserglas (Kieselsäure) zu präparieren, kann viel über Kapillarkräfte und Wechselwirkungen zwischen Polymermolekülen gelernt werden. Statt der Trocknung mit überkritischem CO<sub>2</sub> ist in den Schülerlabore betreibenden Institutionen sicher eine Gefriertrocknung als Alternative zugänglich. Vergleiche mit aufgeschäumtem Polystyrol oder Polyurethan bieten sich ebenfalls an.

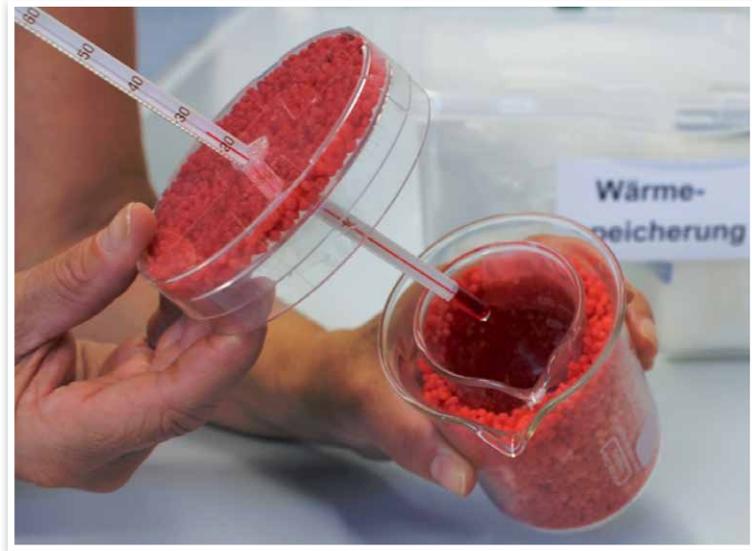


**Prof. Dr. Petra Mischnick**

Technische Universität Braunschweig  
Institut für Lebensmittelchemie /  
Agnes-Pockels-SchülerInnenlabor  
Schleinitzstr. 20  
38106 Braunschweig  
p.mischnick@tu-bs.de



# WÄRMESPEICHERUNG MIT PHASENWECHSELMATERIALIEN



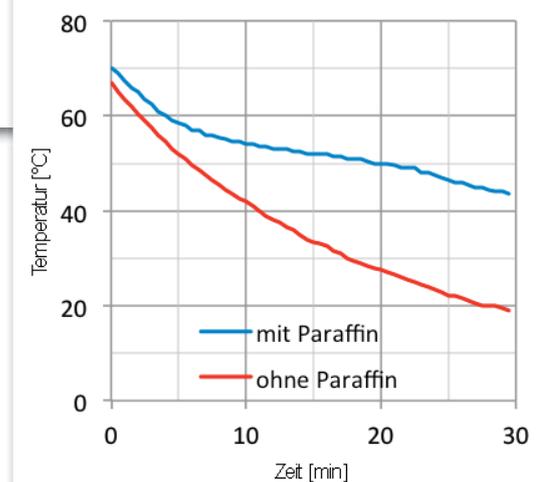
**Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor**  
Institut für Lebensmittelchemie,  
Technische Universität Braunschweig  
[https://www.tu-braunschweig.de/  
agnes-pockels-labor/](https://www.tu-braunschweig.de/agnes-pockels-labor/)



## Wärmespeicherung mit Phasenwechselmaterialien

Phasenwechselmaterialien (phase change materials, PCM) isolieren nicht einfach nur, sondern speichern Wärmeenergie und dienen daher als Latentwärmespeicher. In der Versuchsreihe lernen die SchülerInnen zwei PCMs - Wasser und Paraffin - kennen, die unterschiedliche Schmelztemperaturen und damit unterschiedliche Arbeitsbereiche besitzen. Wenn der Temperaturverlauf beim Schmelzen von Eis aufgezeichnet wird, lässt sich gut beobachten, dass die Temperatur während des Phasenübergangs konstant bleibt. Schon GrundschülerInnen kennen den Wasserkreislauf und können mithilfe dieses Versuchs die besondere Bedeutung des Wassers für Wetter und Klima erfassen.

Beim Abkühlen von Wasser vergleichen die SchülerInnen den Temperaturverlauf mit und ohne Isolierung durch Paraffin, das bei den gewählten Kettenlängen einen Schmelzbereich von 54 – 55 °C besitzt. Die beim Schmelzen zugeführte Wärmeenergie wird gespeichert und wird beim Erstarren wieder abgegeben. Als Beispiel für eine praktische Anwendung stellen die SchülerInnen einen mit mikrokapseltem Paraffin gedämmten Thermobecher her.



**STIMMEN AUS  
HOCHSCHULDIDAKTIK,  
SCHÜLERLABOR  
UND SCHULE**





## Photoprozesse als Kernthema

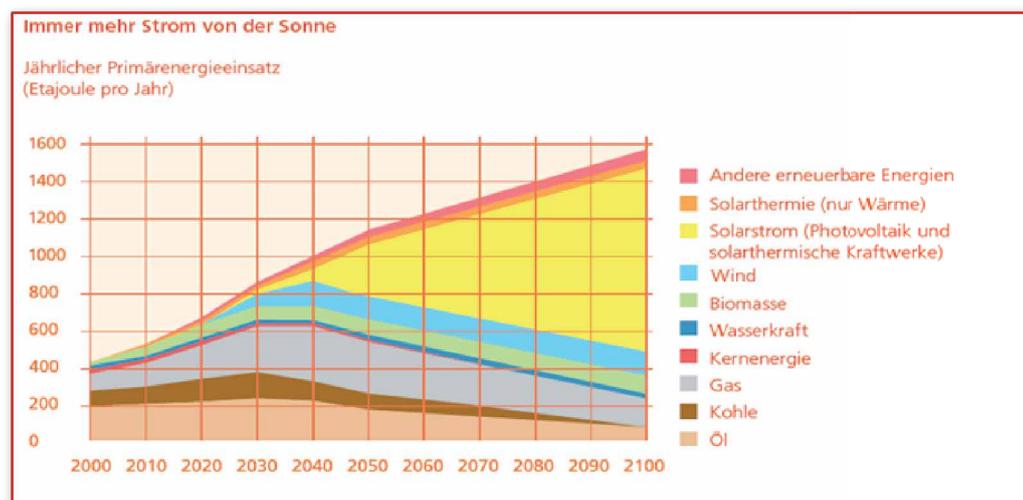


Abb.: Quelle: <http://www.agenda21-treffpunkt.de/archiv/04/daten/WBGUenergiemix.htm> Zugriff: 04.01.2014

Es ist begrüßenswert, dass das Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor der TU Braunschweig mit dieser Umfrage eine Bestandsaufnahme des Themenangebots in den Schülerlaboren ansteuert. Den von den Autorinnen des Projektes dargestellten Zielen stimme ich in vollem Umfang zu. Ergänzend zu den diesbezüglich genannten Förderaktivitäten möchte ich das DFG-Projekt PhotoLeNa (Photoprozesse in der Lehre der Naturwissenschaften) nennen, das ich ab Oktober 2013 zunächst für 3 Jahre durchführe. Es ist das erste Mal, dass die DFG ein von der Fachdidaktik initiiertes und durchgeführtes Projekt im Wissenschaftsbereich Naturwissenschaften mit Personal- und Sachmitteln fördert. Das zeigt einmal mehr, dass auch die DFG dem Themenkomplex Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Energieeffizienz in der Bildung des wissenschaftlichen Nachwuchses eine herausragende Bedeutung zumisst. Ich denke dieses Projekt unterstützt somit auch die Relevanz der vom Braunschweiger Schülerlabor durchgeführten Studie. Photoprozesse, d. h. Prozesse mit Lichtbeteiligung, nehmen bei natürlichen Prozessen zur Energiekonversion und -speicherung (z. B. Photosynthese) sowie bei innovativen Technologien zur nachhaltigen Energiebereitstellung (z. B. Photovoltaik) und effizienten Energienutzung (z. B. Leuchtdioden) Schlüsselfunktionen ein. Photoprozesse bilden gleichzeitig einen Querschnittsbereich für alle MINT-Fächer, die in der Schule unterrichtet werden und haben nicht nur ein außergewöhnliches Motivationspotential für

Schülerinnen und Schüler, sondern auch einen hohen Bildungswert.

Die Photoprozesse finden sich bezeichnerweise bei der „Identifizierung der Kernthemen“ unter den Stichwörtern „Photovoltaik“, „Alternative Treibstoffe“, „Chemischer Wasserstoffspeicher“, „Photokatalyse“, „Leuchtdioden“ und „Intelligente Materialien“ wieder.

Photovoltaik ist tatsächlich ein wichtiges Kernthema, aber eben nur eines unter mehreren, bei denen Photoprozesse eine Schlüsselfunktion einnehmen. Will man die Photovoltaik gründlich in die naturwissenschaftliche Bildung einbeziehen, so ist es (besonders aus Sicht der Chemie) notwendig, die Elementarprozesse bei der Umwandlung von Licht in elektrische Energie experimentell zu erschließen. Dafür sind herkömmliche Solarzellen der ersten Generation auf der Basis von Silicium nicht geeignet. In Bericht heißt es: „Bei Experimenten im Bereich der Photovoltaik werden überwiegend Siliziumsolarzellen eingesetzt. Aber auch Grätzelzellen spielen eine Rolle, weil diese im Gegensatz zu Siliziumzellen von den Schülern selbst hergestellt werden können...“ - Genau so ist es. Allerdings liegt der didaktische Mehrwert von photogalvanischen und photoelektrochemischen Zellen, zu denen auch die „Grätzelzellen“ gehören, nicht nur darin, dass sie von Schülern hergestellt werden können, sondern in erster Linie darin, dass die Elementarprozesse, auf die es bei der Konversion von Licht in elektrische Energie ankommt

(konkret: wie es zum Aufbau einer elektrischen Spannung und zum elektrischen Stromfluss kommt und welche Parameter die Leistung der Zelle wie beeinflussen) in einer Reihe von Experimenten erschlossen werden können. Dabei kann im Schülerlabor der Weg von dem im Unterricht behandelten Daniell-Element bis zur kompakten Solarzelle mit Titandioxid (nach Grätzel) Schritt für Schritt experimentell und konzeptionell erschlossen werden. Dies geschieht beispielsweise im Schülerlabor „Chemie-Labothek“ in Wuppertal und ist in unseren Publikationen dokumentiert (siehe Literaturdatei auf CD). Die Experimente, Inhalte und Materialien dieser und anderer Experimentreihen mit Photoprozessen sowie die Daten der kontinuierlich durchgeführten Evaluation sind auf der Web-Seite [www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de](http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de) unter „Chemie-Labothek“ zu finden.

Den gleichen Anspruch wie bei der Photovoltaik, d. h. die jeweils experimentelle und konzeptionelle Erschließung der Elementarprozesse auf der Teilchenebene, sollte man im Schülerlabor auch bei den Themen Leuchtdioden, Photokatalyse und intelligente Materialien ansetzen. Entsprechend sind die Module der „Chemie-Labothek“ ausgewählt und aufgebaut. Details sind unter der oben angegebenen Internet-Adresse zu finden.

Der Wert der Braunschweiger Umfrage liegt darin, dass zu den vorgegebenen Themen eine Bestandsaufnahme über die Häufigkeit der Angebote zu diesen Themen erstellt wurde, die auch eine erste Schlussfolgerung zulässt: Bei einigen Kernthemen sind die Angebote zu mager – hier muss mehr angeboten werden. Wie bereits erwähnt ist es ein Manko, dass 44 der 135 Schülerlabore mit Chemieangebot erfasst werden konnten. Das liegt in erster Reihe daran, dass es für viele Betreiber von Schülerlaboren lästig ist, Fragebogen auszufüllen. Zu oft wird man aufgefordert, dergleichen zu tun.

Inwiefern die AutorInnen der Studie auch auf die inhaltlichen Angebote eingegangen sind, kann ich im Bericht nicht erkennen. Das aber ist für ein Schülerlabor an der Uni oder an einem Forschungsinstitut entscheidend, wenn es nicht nur ein Event zum Entertainment, sondern ein außerschulischer Lernort mit Anbindung an den Schulstoff und an die aktuelle Forschung und Technik sein soll.

Die als Grundlage für die Fragebogenentwicklung durchgeführte Literaturrecherche, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, zeigt aber, dass es ausreichend fachdidaktische Literatur gibt, die als Grundlage für Angebote in den Kernthemen gibt, die in Schülerlaboren noch unterrepräsentiert sind.

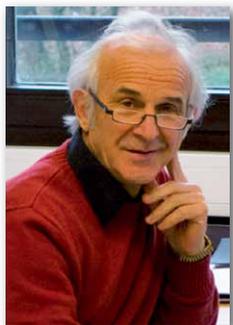
Die Sonneneinstrahlung beträgt in jedem Jahr das 100fache der gesamten als abbaufähig erachteten Weltreserven an Kohle, Erdöl, Erdgas und Uran. Derzeit wird über den so genannten sustainocene diskutiert, eine neue Ära, in der das Prinzip der Nachhaltigkeit in allen Bereichen menschlicher Tätigkeiten, Vorrang erhalten wird. Das bedeutet, dass auch die Technosphäre ebenso wie die aus der natürlichen Evolution hervorgegangene Biosphäre vorwiegend die Energieform nutzt, die dem Planeten in kosmischen Größenordnungen und über astronomische Zeiträume zur Verfügung steht und darüber hinaus, aus der Sicht der höheren Lebewesen als „sauber“ zu bezeichnen ist. Das Licht der Sonne erfüllt alle diese Bedingungen. Ganz in diesem Sinne prognostiziert der Wissenschaftliche Beirat Globale Umweltveränderungen WBGU der Bundesregierung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts eine starke Zunahme des Anteils der Solarenergie beim globalen Energiemix.

Auch wenn so langfristige Prognosen mit hohen Unsicherheitsfaktoren behaftet sind, wird die eingeleitete Energiewende, von großen Teilen der Gesellschaft und Wirtschaft befürwortet. Dadurch ergeben sich für den Industrie- und Wissenschaftsstandort Deutschland gute Chancen für langfristige Prosperität und Nachhaltigkeit.

Bei der die Erforschung und Entwicklung innovativer Materialien und Technologien, die auf der Solarenergienutzung basieren, leistet die Chemie einen essentiellen Beitrag. Um die Exzellenz auf diesem Gebiet zu erhalten und zu steigern muss die junge Generation bereits im Schulunterricht und erst recht im Anfangsstadium experimentell und konzeptionell an Phänomene mit Lichtbeteiligung, herangeführt werden. Photoprozesse sollten in der Schule – nicht nur in Schülerlaboren dort aber verstärkt! – thematisiert werden.

Die UNESCO hat das Jahr 2015 zum International Year of Light erklärt. Damit soll in allen Bereichen, ganz besonders auch in den

Bereichen culture und education alles, was mit Licht zu tun hat, einen kräftigen Impuls bekommen, denn schließlich ist das Licht der Sonne die wichtigste Energiequelle und Antrieb des Lebens auf unserem Planeten. Es ist zu hoffen, dass auch das Angebot von Inhalten mit Photoprozessen in den Schülerlaboren im Jahr 2015 und danach quantitativ und qualitativ zunimmt.



**Prof. Dr. Michael W. Tausch**

*Bergische Universität Wuppertal  
FB C - Chemie und ihre Didaktik  
42119 Wuppertal, Gaußstraße 20  
mtausch@uni-wuppertal.de  
www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de*





# FARBSTOFFSOLARZELLE NACH GRÄTZEL





### Farbstoffsolarzelle nach Grätzel

Die Farbstoffsolarzelle basiert nicht auf Silizium. Im Gegensatz zu herkömmlichen Solarzellen ist die lichtempfindliche Schicht hier aus Titandioxid und einem organischen Farbstoff aufgebaut.

Diese Farbstoffsolarzellen lassen sich von den Schülern leicht und gefahrlos aus den Komponenten zusammenbauen. Der Nachweis eines Stromflusses bei Belichtung dieser Solarzellen gelingt eigentlich immer und ist für die Schüler stets ein besonderes Erfolgserlebnis.

Im einfachsten Fall kommen als vorgefertigte Komponenten zum Einsatz:

- *Elektrisch leitendes ITO-Glas,*
- *Titandioxid-Suspension,*
- *Elektrolyt-Lösung*

Die Farbstofflösung wird aus getrockneten oder frischen Früchten selbst erzeugt.

Die Schüler sollten einzeln oder zu zweit ihre eigene Solarzelle bauen.

Eine Experimentieranleitung ist bei <http://www.seilnacht.com/versuche/expsol01.html> angegeben. Dort sind auch Hinweise zum Bezug der notwendigen Materialien.

Die Farbstoffzelle nach GRAETZEL bietet zahlreiche Betätigungsfelder für junge Forscher, da die einzelnen Komponenten variiert werden können.

Die Komponenten der Farbstoffsolarzellen sind preiswert erhältlich und wiederholt verwendbar. Mit der Thematik kann viel Wissen vermittelt und die Feinmotorik der Schüler gefördert werden.

## Chemie und Energie – Eine Reflexion aus fachdidaktischer Perspektive



Abb. 1: Interviewauszüge zum Thema Brennstoffzelle  
(Auszüge aus der Examensarbeit von N. Bergen, 2008)

Energie – ein Thema, über das jeder redet, das aber kaum jemand versteht? (Abb. 1) Wohl kaum ein Thema ist mit größerer Ambivalenz hinsichtlich der Bedeutung des Begriffs und der Diskrepanz bezüglich der globalen Bedeutung und des individuellen Verständnisses verbunden (vgl. Schmidkunz & Parchmann, 2011). Die Beziehungen zwischen der Chemie und dem Energiethema sind vielfältig, sie reichen von grundlegenden Forschungsfragen (z.B. zur Energieeffizienz verschiedener Reaktionsmechanismen) über die Weiterentwicklung technischer Prozesse bis hin zur Entwicklung gesellschaftlich relevanter Energieprozesse und Speichermöglichkeiten.

Energie ist ein Fachkonzept (- ein Fachkonzept?) in den Naturwissenschaften (Abb. 2), aber auch in den Gesellschaftswissenschaften. Der Begriff steht ebenso für den globalen Kontext der Energieversorgung; und er wird nicht zuletzt für zahlreiche Aussagen im Alltag mit wieder anderen Bedeutungen benutzt: Ich hab heute keine Energie, das Medikament XY verleiht neue Energie, Sekten versprechen spirituelle Energie u.v.a.m..

Damit aber noch nicht genug der Herausforderungen für die Behandlung von Themen rund um Energie im Bildungsbereich – auch die unterschiedlichen Bedeutungen von Aussagen in Alltags- und Fachsprache führen zu Stolpersteinen. So lehrt der Physikunterricht, dass Energie nicht verloren gehen kann,

gleichzeitig zahlen wir aber für unseren Energieverbrauch und sprechen von Energieverlusten im Alltag. Wie passt das zusammen im Kopf von Lernenden?

Es bleibt somit trotz der langen Tradition der Behandlung von Themen zur Energie eine bedeutsame Aufgabe, lernförderliche und motivierende fachdidaktische Konzepte zu entwickeln, hinsichtlich ihrer Wirkungen zu untersuchen und nachhaltig zu implementieren. Das in diesem Heft dargestellte Projekt liefert einen wertvollen Beitrag dafür, indem es den Stand der experimentellen und auf das schulische sowie außerschulische Lernen bezogenen fachdidaktischen Arbeit zusammenführt und aufzeigt. Allein in der Vielfalt der vorhandenen Publikationen (-> siehe Literaturzusammenstellung auf der CD im Anhang) wird deutlich, dass die zentrale Herausforderung nicht in fehlenden Ansätzen für die experimentelle Behandlung von Energieprozessen liegt. Es darf vielmehr die Frage gestellt werden, inwiefern diese tatsächlich die erwünschten Lernziele erreichen und – sofern sie dies tun – weshalb sie nicht nachhaltig in den Unterricht und andere Lernumgebungen implementiert werden (Gräsel & Parchmann, 2004). Dies gelingt vermutlich nur, wenn die verschiedenen Bildungsinstitutionen enger zusammenarbeiten, wenn insbesondere die schulischen Curricula, die außerschulischen Lernangebote und die Lehreraus- und -fortbildung besser aufeinander abgestimmt sind.

### Energie im Unterricht – ein Konzept?

Nicht erst seit Einführung der ländergemeinsamen Bildungsstandards (KMK, 2004) sind Themen zur Energie fest etabliert und gefordert im Fachunterricht. In der Chemie ist das Energiekonzept eng mit der Erschließung der chemischen Reaktion verbunden und wird i.d.R. analog zu diesem Konzept zunächst phänomenologisch beobachtet (Energieformen, Energieabgabe / -aufnahme) und zunehmend differenziert mit Hilfe von Teilchenmodellen (Wechselwirkungen, chemische Bindung, Teilchenbewegung) interpretiert.

Die einleitend gestellte Frage ist dennoch unter anderem auf Basis einer Lehrplananalyse und Befragung von Lehrkräften (<http://www.ebs.ipn.uni-kiel.de/>) klar mit „nein“ zu beantworten. Bemängelt werden in dieser Studie vor allem fehlende fachübergreifende Bezüge, und in Frage gestellt werden darf sicher auch, weshalb die Lehrpläne der Bundesländer derart verschiedene inhaltliche Schwerpunkte setzen. Gibt es eine andere „Energie“ in Bayern als in Schleswig-Holstein?

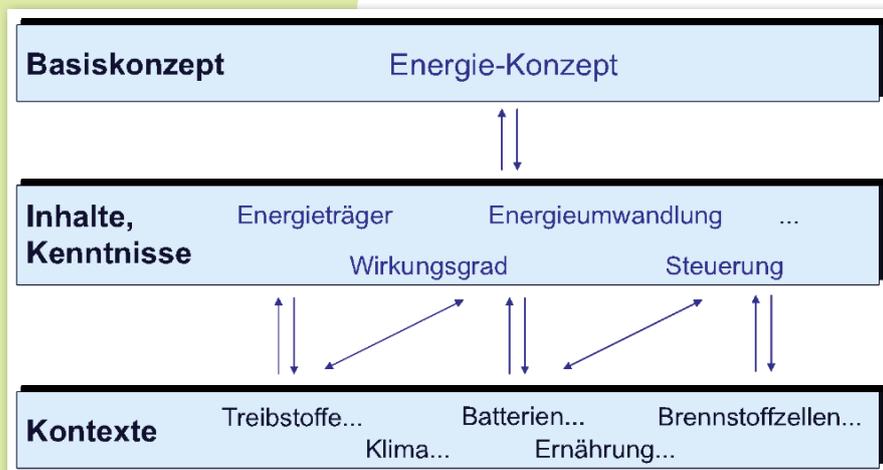


Abb. 2: Energie als Konzept und Kontext

Die fehlende konzeptuelle Klarheit mag ein Grund dafür sein, dass auch auf Seiten der Schülerinnen und Schüler zahlreiche Verständnisschwierigkeiten nachgewiesen wurden (z.B. Duit & Häußler, 1994). Erste empirische Ansätze für die systematische Entwicklung eines Konzeptverständnisses Energie (Neumann, Boone, Viering & Fischer, 2013) bilden jedoch eine Ausgangsbasis für eine gemeinsame Abstimmung von Lehrplänen – die Umsetzung ist aber Aufgabe der Länder und dort bisher

überwiegend durch eine fehlende Abstimmung zwischen den Fächern und Schulstufen geprägt. Vielleicht liegt eine Ursache darin, dass Lehrpläne i.d.R. von Lehrkräften geschrieben werden, und diese ihrerseits mit bestimmten Fachtraditionen und zu wenig mit dem Blick auf übergreifende Themengebiete ausgebildet werden?

### Energie in der Lehrerbildung – (k)ein Thema?

Themen zur Energie werden sicher an allen lehrerbildenden Hochschulen vermittelt und behandelt, eine einheitliche Abstimmung zwischen Fächern und Standorten gibt es jedoch auch hier nicht. Wie kann es gelingen, Schülerinnen und Schülern ein gemeinsames Energieverständnis bezogen auf die wissenschaftliche Erklärungsgrundlage und deren Anwendung in verschiedenen alltäglichen und gesellschaftlichen Kontexten zu ermöglichen? Diese Frage ist auch international nicht geklärt (Chen et al., 2014).

Ein vielversprechender Ansatz ist die Einbindung von Lehramtsstudierenden und Lehrkräften in Schülerlabore (siehe z.B. das Projekt „Schülerlabore als Lehr-Lern-Labore der Deutschen Telekomstiftung“). Hier erfahren (zukünftige) Lehrkräfte den Prozess der didaktischen Rekonstruktion entlang z.B. folgender Fragestellungen:

Wie kommunizieren welche Experten über das Thema Energie, welche (gemeinsamen?) Schwerpunkte setzen sie in welchen Kontexten? (Vgl. Bromme, Kienhues & Porsch, 2010) Welche Lernangebote existieren aus fachdidaktischen Arbeiten (-> siehe Literaturzusammenstellung auf der CD im Anhang), wie können deren Lernwirkungen z.B. durch die Arbeit mit Schülergruppen im Schülerlabor überprüft werden?

Wie lassen sich schulische und außerschulische Angebote zum Thema Energie fächerverbindend verknüpfen und curricular verorten?

### Energie an Schülerlaboren – Schwerpunkte und Chancen

Schülerlabore bieten somit nicht nur einen außerschulischen Lernort für Kinder und Jugendliche, in der Regel verbunden mit mehr Zeit und besseren apparativen Möglichkeiten zum eigenen Forschen, sondern können auch einen Kondensationskeim für die Vernetzung

von Bildungskonzepten darstellen. Sie können für Schüler ebenso eine Vertiefung von im Unterricht behandelten Konzepten ermöglichen wie einen Ausgangspunkt für weiterführende eigene Forschungsarbeiten. Lehrkräften bieten sie analog Gelegenheit für eine differenzierte Förderung unterschiedlicher Schülergruppen und damit verbunden eine Gelegenheit für die eigene fachliche (durch die Anbindung an laufende Energieforschung) und fachdidaktische (durch die Beobachtung und Arbeit mit Schülern in anderen Lernformaten) Fortbildung.

Die vorliegende Broschüre bietet eine ausgezeichnete Grundlage für solche Weiterentwicklungen von Schülerlaborkonzepten und Curricula. Sicherlich können auf der gemeinsamen Abschlusstagung erste Vernetzungen zwischen Standorten initiiert und ausgebaut werden, um das Thema Energie tatsächlich zu einem Konzept werden zu lassen.

### Literatur

Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor Braunschweig (Hrsg.) (2015): *Literaturübersicht zum Thema Chemie und Energie in Schülerlaboren*. In: ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren - Was gibt es? Was ist zu tun? Frankfurt, Zarbock Verlag

Bergen, N. (2009). *Erhebung von Alltags- und Experten-vorstellungen zum Thema Brennstoffzelle. Staatsexamensarbeit, C.v.O. Universität Oldenburg.*

Bromme, R., Kienhues, D. & Porsch, T. (2010). *Who knows what and who can we believe? Epistemological beliefs are beliefs about knowledge (mostly) attained from others*. In L. D. Bendixen & F. C. Feucht (Eds.), *Personal epistemology in the classroom: Theory, research, and implications for practice* (pp. 163-193). Cambridge: Cambridge University Press.

Chen, B., Eisenkraft, A., Fortus, D., Krajcik, J., Neumann, K., Nordine, J. & Scheff, A. (Hrsg.) (2014). *Teaching and Learning of Energy in K – 12 Education*. New York: Springer.

Duit, R. & Häußler, P. (1994). *Learning and teaching energy*. In P. Fensham, R. Gunstone & R. White (Eds.), *The content of science* (pp. 185-200). London: The Falmer Press.

Gräsel, C. & Parchmann, I. (2004). *Implementationsforschung – oder der steinige Weg, Unterricht zu verän-*

*dern. Unterrichtswissenschaft, 32(3), 196-214.*

KMK. (2004). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss. Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. Beschluss vom 16.12.2004. München: Luchterhand.*

Neumann, K., Boone, W., Viering, T. & Fischer, H.E. (2013). *Towards a learning progression of energy*. *Journal of Research in Science Teaching, 50(2), 162-188.*

Schmidkunz, H. & Parchmann, I. (2011). *Basiskonzept Energie. Naturwissenschaften im Unterricht - Chemie, 22(12), 2-7.*



### **Prof. Dr. Ilka Parchmann,**

*IPN Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
IPN, Olshausenstr. 62, 241 18 Kiel  
parchmann@ipn.uni-kiel.de*





# EXPERIMENTE MIT WIND- UND SOLARENERGIE



**zdi-Schülerlabor**  
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg  
[http://gleichstellung.h-brs.de/  
Schuelerlabor.html](http://gleichstellung.h-brs.de/Schuelerlabor.html)



### **Experimente mit Wind- und Solarenergie**

Alle erneuerbaren Energien entstehen durch die Sonne. Sie liefert die Energie, welche zum Beispiel die Wetterlagen und den Wasserkreislauf bestimmt. Der Begriff „Erneuerbare Energie“ bezieht sich auf die Nutzung natürlich auftretender Energien, die sich permanent selbst erneuern und in unbegrenzter Menge verfügbar sind.

In der „Energiewerkstatt“ des zdi-Schülerlabors der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg werden chemische sowie physikalische Grundlagen der Energieerzeugung sowie Anwendungen der erneuerbaren Energieformen Solar- und Windenergie schüler- und handlungsorientiert erar-

beitet. Neben der photovoltaischen Reaktion stehen ebenfalls die Wärmespeicherung, der Aufbau einer Solaranlage und die Herstellung einer Solarzelle im Fokus. Schwerpunkt des Kurses ist die Planung und Konstruktion eigener Energieanlagen sowie solarbetriebener Maschinen, die mit entsprechenden Bausätzen verwirklicht werden können. Danach kann anhand der Modelle die Energieeffizienz und Realisierbarkeit geprüft werden.

Das Erzeugen von Energie mithilfe von Muskelkraft durch einen selbstgebaute Handgenerator veranschaulicht die abstrakten Begriffe „Energie“, „Effizienz“ und „Wirkungsgrad“.

## Chemie und Energie – Die Sicht der Hochschuldidaktik

Es ist eine der zentralen Fragestellungen der Menschen des 21. Jahrhunderts, wie wir den durch eine stark anwachsende Weltbevölkerung verursachten, immer weiter steigenden Energiebedarf in nachhaltiger und damit unserer Umwelt sowie unseren nachfolgenden Generationen verantwortbarer Art und Weise decken können.

Konventionelle Energiegewinnungsmethoden wie das Verbrennen fossiler Energieträger wie Kohle und Erdöl sorgen durch Emissionen von Treibhausgasen wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid für eine globale Klimaerwärmung und damit für mögliche, z.T. unvorhersehbare Veränderungen unserer Natur und unseres menschlichen Lebensraumes. Nicht nur die unabschätzbaren Folgen einer globalen Klimaerwärmung und eine unbeherrschbare Kernenergie-technologie, sondern auch die Endlichkeit fossiler Energieträger zwingen uns zur Suche nach alternativen Energiekonzepten, die nicht nur regenerativ, sondern auch wirtschaftlich und effizient sind.

Die regenerative Energiegewinnung hat jedoch einen entscheidenden Nachteil: Das zeitliche Missverhältnis zwischen Bereitstellung der Energie und ihrem Bedarf bzw. ihrer Nachfrage. Denn nur wenn der Wind weht oder die Sonne scheint, kann durch Wind- bzw. Photovoltaikanlagen erneuerbare Energie erzeugt werden. Folglich kann der Ausbau regenerativer Energien nur dann sinnvoll vorangetrieben bzw. realisiert werden, wenn es Möglichkeiten der Energiespeicherung gibt – und das im stationären Maßstab.

Auch wenn das Thema Energie in den Lehrplänen der einzelnen Bundesländer grundsätzlich Einzug gefunden hat, können Schülerlabore hier ebenfalls einen wichtigen Beitrag liefern, da hier aktuelle Entwicklungen aus der Wissenschaft experimentell und konzeptionell schnell aufgegriffen werden können. Von daher ist das von der DBU geförderte und durch die GDCh unterstützte Projekt „Experimentelle pädagogische Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in chemisch arbeitenden SchülerInnenlaboren“ außerordentlich begrüßenswert. Die Untersuchung zeigt, dass in einigen deutschen Schülerlaboren grundsätzlich ein experimentelles Angebot zum Thema moderne Speichersysteme und der Energiekonversion

vorliegt und somit eine attraktive Ergänzung des naturwissenschaftlichen Unterrichts darstellt. Die einzelnen relevanten Teilgebiete werden allerdings nicht gleichmäßig abgedeckt – das Thema Brennstoffzelle ist z.B. sehr häufig vertreten, während Redox-Flow-Systeme und die Technologie der Lithium-Ionen-Akkumulatoren kaum angeboten werden – und eine stärkere Berücksichtigung der Sekundarstufe wäre auch wünschenswert. Aus fachdidaktischer Sicht wäre es nun sinnvoll, die jeweiligen Programme der Schülerlabore (Experimente, Konzeption, Arbeitsmaterialien) abzufragen, inhaltlich zu sortieren und beispielweise auf einer Internetplattform zu dokumentieren.

Darüber hinaus wäre es sicherlich wünschenswert, wenn Standorte gefunden oder durch die Förderung von der DBU neu gegründet werden, die sich ausschließlich mit dem Thema Energie befassen und ihre Angebote für Schüler, Lehrer und der interessierten Öffentlichkeit öffnen, um Einblicke in aktuelle Strategien der Energiegewinnung, Energiespeicherung und Energieeinsparung aufzuzeigen.

### Was kann die fachdidaktische Forschung beitragen?

Das Alleinstellungsmerkmal derartiger fachdidaktischen Forschungs- und Entwicklungsprojekte ist die fachwissenschaftliche Tiefe, mit der das jeweilige Gebiet erforscht wird. Dabei wird am *state of the art* in der jeweiligen Disziplin angeknüpft und mit entsprechenden Fachwissenschaftlern kooperiert. Darüber hinaus werden umfangreiche Experimentierreihen erforscht und entwickelt, die eine schrittweise und lückenlose Hinführung zu den Elementarprozessen in komplexen Themenfeldern wie das der modernen Speichersysteme und der Energiekonversion ermöglichen. Die charakteristischen Merkmale dieser Experimentierreihen sind didaktische Prägnanz und wissenschaftliche Konsistenz für verschiedene Abstraktionsebenen, also auch für verschiedene Schuljahrgangsstufen bis hin zur universitären Ausbildung. Auf die Experimente aufbauend werden didaktische Konzepte entwickelt, die an Schlüsselbegriffe und Grundkonzepte der Chemie und anderer MINT-Fächer anknüpfend, diese im Kontext der neuen Phänomene ergänzen oder vertiefen. Zu den Experimenten und didaktischen

Konzepten werden Videos, Modellanimationen, Arbeitsblätter und weitere didaktische Materialien entwickelt und mit Studierenden, Lehrerinnen und Lehrern, Schülerinnen und Schülern getestet und optimiert.

Ebenso wie bei anderen Forschungsvorhaben in der Fachdidaktik wird auch mit diesen Projekten in erster Linie die Qualitätssteigerung der Lehre im Fach Chemie und anderen Naturwissenschaften durch curriculare Innovation angestrebt. In diesem Fall geschieht das durch die Erneuerung und Anpassung der Unterrichtsinhalte, Methoden und Medien an den heutigen Stand wissenschaftlicher Erkenntnisse, technischer Anwendungen und zukunftsrelevanter Fragestellungen. Dafür eignen sich die oben benannten Inhalte, weil damit ebenso gut wie mit traditionellen Schulbeispielen die Schlüsselbegriffe und -konzepte der Chemie und anderer MINT-Fächer erschlossen werden können und weil sie ein hohes Motivationspotential für naturwissenschaftlich interessierte Jugendliche haben. So kann die Heranbildung des dringend erforderlichen wissenschaftlichen und technischen Nachwuchses in Deutschland katalysiert werden.

Mit Blick auf die avisierte Energiewende in Deutschland müssen größte Anstrengungen unternommen werden, das Themenfeld der modernen Speichersysteme und der Energiekonversion mit all seinen vielfältigen Facetten für Schülerinnen und Schüler im Chemieunterricht bzw. für Studierende an der Hochschule zugänglich zu machen, denn sie werden die Generation sein, die diese Entwicklung mitgestalten wird.



**Prof. Dr. Marco Oetken,**

*Pädagogische Hochschule Freiburg  
Institut für Biologie, Chemie, Geographie und Physik,  
Abteilung Chemie  
Kunzenweg 21, 79117 Freiburg  
marco.oetken@ph-freiburg.de*



# BIOETHANOL ALS ALTERNATIVER TREIBSTOFF

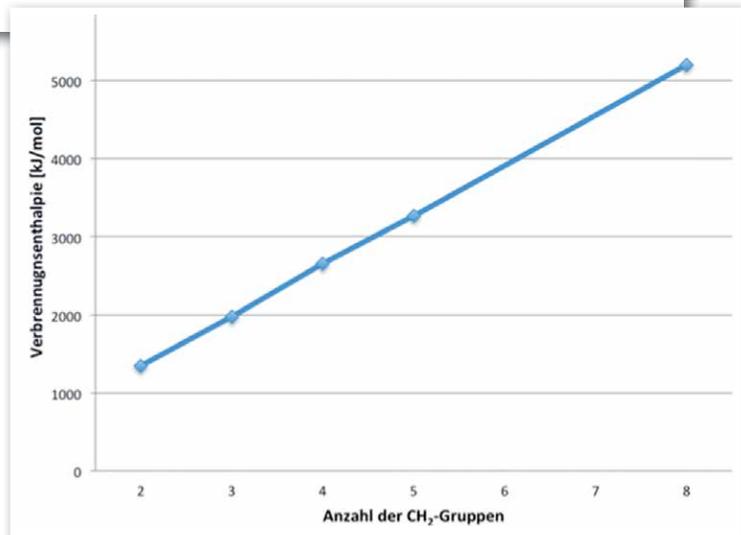




## Bioethanol als alternativer Treibstoff

Der sorglose und verschwenderische Umgang mit fossilen Brennstoffen führte in den vergangenen zwei Jahrhunderten zu einer Verknappung der Ressourcen. Diese Problematik lenkt den Blick besonders auf alternative Treibstoffe und Heizmaterialien. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe, wie Stroh oder Mais, steht dabei im Fokus. Aus ihnen können Biokraftstoffe gewonnen werden. Man unterscheidet dabei zwischen Biokraftstoffen der ersten und der zweiten Generation. Biokraftstoffe, wie Bioethanol der ersten Generation werden aus zucker- oder stärkehaltigen Pflanzen hergestellt, Bioethanol der zweiten Generation wer-

den hingegen aus Cellulose gewonnen. In der Versuchsreihe „Bioenergie aus nachwachsenden Rohstoffen – Alternative Brennstoffe aus dem Alltag – Thermodynamische Aspekte“ lernen die SchülerInnen eine Methode zur Bestimmung der Verbrennungsenthalpie, die Kalorimetrie, kennen. Das modifizierte Verbrennungskalorimeter liefert sehr genaue Ergebnisse. Somit ist es auch möglich, Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zu zeigen. Hierfür könnten sich die Verbrennungsenthalpie in Abhängigkeit von den  $\text{CH}_2$ -Gruppen homologer Alkohole oder der Vergleich von Holz, Braun und Steinkohle eignen.



## Chemie und Energie – Welchen Beitrag leisten, welches Potenzial haben die Schülerlabore?

Schülerlabore sind in besonderem Maße dazu geeignet, Jugendlichen in selbst und eigenständig ausgeführten Experimenten die naturwissenschaftlich-technischen Prinzipien von Energiewandlung und Energiespeicherung bei erneuerbaren Energie zu vermitteln und ihnen dabei gleichzeitig die Konzepte nachhaltiger Energienutzung nahe zu bringen. Zusätzlich tragen Schülerlabore diese Prinzipien und Konzepte über die Jugendlichen als Multiplikatoren in die breite Bevölkerung und leisten damit einen nicht zu unterschätzenden allgemeinen Beitrag zu naturwissenschaftlicher Grundbildung und Technikmündigkeit / Technikakzeptanz. Das wird erläutert anhand der Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken bzw. in Mini-KWKs und in Brennstoffzellen-Heizungen sowie anhand des Problems der Speicherung regenerativ erzeugter Energien.

### Schülerlabore

In der großen Vielfalt von außerschulischen MINT<sup>1</sup>-Angeboten bilden die Schülerlabore einen großen, relativ einheitlichen Block. Ihr Alleinstellungsmerkmal besteht darin, dass sie es Schüler/innen ermöglichen, eigenständig Experimente durchführen mit dem Forschungsprozess im Fokus<sup>2</sup>, und zwar in Laboren oder Fachräumen, die deutlich besser ausgestattet sind als schulische Räume. Das zeichnet Schülerlabore gegenüber sonstigen „outreach“-Aktivitäten ihrer Trägerorganisation aus: Kinder-Unis, Schüler-Unis, Schnupper-Studium, Girls´ Day, Tag der Offenen Tür, Nacht der Wissenschaften, etc. In Schülerlaboren können die Schüler/innen Wissenschaft und Technik im Wort-wörtlichen Sinne „begreifen“, was im Vergleich zur Teilnahme an einer Vorlesung einen deutlich tieferen Eindruck hinterlässt. Das ist keine ganz neue didaktische Erkenntnis:

Erzähle es mir – und ich werde es vergessen,  
zeige es mir – und ich werde mich erinnern,  
lass es mich tun – und ich werde es behalten.<sup>3</sup>

Insgesamt gibt es ca. 310 Schülerlabore im deutschsprachigen Raum (Abb. 1) mit zusammen ca. 600.000 Schülerlaborbesuchen pro Jahr, mit folgender Wirksamkeit:

- *Schülerlabore wecken bzw. fördern das Interesse von Jugendlichen an Natur- und Ingenieurwissenschaften. Damit tragen*

*sie zur Verbesserung sowohl der naturwissenschaftlichen Grundbildung („Scientific Literacy“) als auch der Technikmündigkeit / Technikakzeptanz („Technical Maturity“) in der Bevölkerung bei.*

- *Schülerlabore motivieren für MINT-Berufe und MINT-Studien; dies ist eine Maßnahme zur Fachkräftesicherung im Bereich Wissenschaft und Technik.*
- *Schülerlabore sind in gewisser Weise Innovationszentren für die Förderung und Verbreitung von Wissenschaft und Technik, denn sie bieten spezielle Aus- und Fortbildungsprogramme für Lehramtsstudierende und aktive Lehrer an, in denen es einerseits um didaktische Konzepte<sup>4</sup> und andererseits um neue fachwissenschaftliche Inhalte geht; die Lehrer als Multiplikatoren tragen diese Innovationen in die Schulen und damit auch in die Gesellschaft.*
- *Schülerlabore arbeiten an der Schnittstelle von Schule und Hochschule, also an einer Stelle von enormer strategischer Bedeutung für die Entwicklung der Bildung.*

Schülerlabore lassen sich kategorisieren<sup>5</sup> in *Klassische Schülerlabore* (Breitenförderung, ganze Klassen)<sup>6</sup>, in *Schülerforschungszentren* (Individualförderung, kleine Teams interessierter Jugendlicher)<sup>7</sup>, in *Lehr-Lern-Labore* (Schülerlaborbetrieb gekoppelt mit Fachdidaktikausbildung von Lehramtsstudierenden)<sup>8</sup>, in *Schülerlabore zur Wissenskommunikation*, *Schülerlabore zur Vermittlung von Unternehmertum* und *Schülerlabore zur Berufsorientierung*. Eine andere Möglichkeit ist die Einteilung nach Fächern (Biologie, Chemie, Physik, Technik, ...). Im vorliegenden Buch geht es kategorien- und fächerübergreifend um Schülerlabore, die sich mit dem Thema Energie beschäftigen. Seitens der Biologie kann es um Energiepflanzen und Biogas gehen, die Physikalische Chemie kann z.B. die Brennwerte von Biokraftstoffen bestimmen und bewerten, die Elektrochemie beschäftigt sich mit Batterien und Brennstoffzellen, die Physik zum Beispiel mit effizienten Methoden der Lichterzeugung (LED, OLED), usw.: Eigentlich alle Schülerlabore könnten Praktika zum Thema Energie anbieten. Trotz fachlicher Unterschiede werden dabei identische übergeordnete Ziele verfolgt:

- *Kinder früh für Energiefragen, Ressourceneffizienz, Nachhaltigkeit etc. und deren*

- <sup>1</sup> MINT-Fächer ist eine zusammenfassende Bezeichnung von Unterrichts- und Studienfächern bzw. Berufen aus den Bereichen Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik
- <sup>2</sup> D. Dänhardt, O.J. Haupt & C. Pawek (Hrsg.) (2009). *Kursbuch 2010 – Schülerlabore in Deutschland*, Tectum Verlag Marburg 2009
- <sup>3</sup> Konfuzius, chinesischer Philosoph, ca. 500 v.Chr.
- <sup>4</sup> European Commission 2007 EUR22845: *Science Education NOW: A renewed Pedagogy for the Future of Europe*, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 978-92-79-05659-8, [http://ec.europa.eu/research/science-society/document\\_library/pdf\\_06/report-rocard-on-science-education\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/report-rocard-on-science-education_en.pdf)
- <sup>5</sup> O.J. Haupt, J. Domjahn, U. Martin, P. Skiebe-Corrette, S. Vorst, W. Zehren und R. Hempelmann, *Schülerlabor – Begriffsschärfung und Kategorisierung*, MNU **66/6**, 324-330 (2013)
- <sup>6</sup> O.J. Haupt & R. Hempelmann (2013). *Schülerlabor Kategorien: Das Klassische Schülerlabor*, *LeLa magazin*, Ausgabe 6, Juni 2013, S. 4-5
- <sup>7</sup> A. Kratzer (2013). *Kategorisierung der Schülerlabore: Das Schülerforschungszentrum*, *LeLa magazin*, Ausgabe 7, November 2013, 6-7
- <sup>8</sup> P. Skiebe-Corette, J. Fandrich, A. Faber, J. Schulz, S. Vorst & C. Seidler (2014). *Kategorisierung der Schülerlabor: Das Lehr-Lern-Labor*, *LeLa magazin*, Ausgabe 8, März 2014, 2-5

*naturwissenschaftlich-technische Aspekte zu interessieren,*

- *den Bezug der MINT-Fächer in Schulen und Universitäten zum Thema Energie zu steigern, also im Unterricht naturwissenschaftlich-technische Phänomene auch an Themen wie Energiewandlung, Energiespeicherung, Umweltschutz, Ressourceneffizienz, etc. zu erläutern,*
- *MINT-Lehrer für Energie-Themen zu sensibilisieren, und zwar durch Einbringung dieser Thematik in Lehrerbildung und Lehrerfortbildung,*
- *eine bessere Orientierung und Vorbereitung von Jugendlichen auf eine spätere berufliche Tätigkeit im Bereich der Energietechnologien zu erzielen,*
- *mehr Frauen für das Thema Energie und Energietechnik zu gewinnen.*

### Energie und Naturwissenschaftlich-technische Grundbildung: Beitrag des Schülerlabors

Die Weiterentwicklung unserer Industrie, unser eigener Lebensstandard und derjenige nachfolgender Generationen werden schon jetzt durch Verknappung der Ressourcen beeinträchtigt, und in Zukunft wird sich diese Situation noch zuspitzen. Die Verknappung betrifft fossile Brennstoffe, aber mittlerweile sogar auch Biomasse / Energiepflanzen. Auch die geographischen Möglichkeiten zur Nutzung von Wasserkraft oder für den Bau von Pumpspeicherwerken sind weitgehend erschöpft. Gegenmaßnahmen sind die verstärkte Nutzung von Wind- und Solarenergie sowie der nachhaltige Umgang mit Energie. Gerade im Bereich Energie wird die Bedeutung von Nachhaltigkeit und damit auch von Bildung für nachhaltige Entwicklung, BnE,<sup>9</sup> weiter steigen. Bekanntlich umfasst nachhaltige Entwicklung ökologische, ökonomische und soziale Aspekte, aber ebenso – das wird häufig außer Acht gelassen – auch technische Entwicklungen.<sup>10</sup>

<sup>11</sup> Grundlagen für technische Entwicklungen sind naturwissenschaftliche Erkenntnisse.

Schülerlabore mit ihren Experimentiereinrichtungen bieten Jugendlichen hervorragende Möglichkeiten, sich gründlich mit Energiefragen auseinanderzusetzen. Weil die ersten beiden Hauptsätze der Thermodynamik zentral für alle Energiefragestellungen sind, müssen deren Aussagen in altersgerechter Form klar sein bzw. klar gemacht werden, ohne dass unbedingt die Begriffe Innere Ener-

gie / Enthalpie und Entropie verwendet werden müssen. „Es gibt keine Erzeugung oder Vernichtung von Energie, sondern immer nur Umwandlungen von einer Energieform in eine andere“<sup>12</sup>. Energieformen sind, gereiht nach abnehmender „Wertigkeit“ (siehe unten), u.a.: Elektrische Energie, Arbeit, Wärme bei höherer Temperatur, Wärme bei niedrigerer Temperatur. Bei Energiewandlungen in Richtung höherer „Wertigkeit“ treten inhärente Verluste auf (Verluste durch nichtideale Prozessführung, z.B. Reibung, bleiben außer Betracht): „Wärme kann nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden“.<sup>13</sup> Ein spontaner Prozess ist dadurch gekennzeichnet, dass Energie in höherwertiger Form in Energie in niedrigerwertiger Form umgewandelt wird. Z.B. fließt Wärme immer von einem heißen zu einem kalten Körper, d.h. Wärme auf hohem Temperaturniveau kann sich spontan in Wärme auf niedrigerem Temperaturniveau umwandeln; der umgekehrte Prozess läuft nicht spontan ab und ließe sich nur unter Einsatz von Energie (Wärmepumpe) bewerkstelligen. Ein weiteres Beispiel: Elektrizität lässt sich leicht in Wärme umwandeln. Der umgekehrte Prozess ist nie vollständig, ein Teil der Energie wird in Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau (Abwärme) umgewandelt und ist damit nicht mehr nutzbar, muss an die Umgebung abgegeben werden, ist also sozusagen „verloren“.

Diese Zusammenhänge sollen nachfolgend an drei Fällen von „Neuer Energie“ aus dem Bereich Chemie (Physikalische Chemie, Elektrochemie) konkretisiert werden:

### Kraft-Wärme-Kopplung, Bioheizkraftwerk:

Der Klassiker ist die Umwandlung von Wärme in Arbeit und dann weiter in Bewegungsenergie (Verbrennungsmotor) oder in elektrische Energie (Kraftwerk). Ausgangsmaterial des Biokraftwerks ist Biomasse (meistens Holz), die durch Photosynthese entstanden ist. Die Pflanzen haben also die Strahlenenergie der Sonne in chemische Energie umgewandelt und in stofflicher Form gespeichert (Langzeitspeicherung!). Im Bioheizkraftwerk wird diese Biomasse zunächst verbrannt und so chemische Energie in Wärme umgewandelt. Mit der Wärme wird Wasser in Dampf überführt und so ein Überdruck erzeugt (mechanische Energie); die mechanische Energie wird in Rotationsenergie (d.h. in kinetische Energie) umgewandelt, und diese dann im Generator in elektrische

<sup>9</sup> United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), [http://www.unesco.org/education/justpublished\\_desd2009.pdf](http://www.unesco.org/education/justpublished_desd2009.pdf) (Febr. 2014).

<sup>10</sup> I. Eilks, S. Markic & B. Ralle (Hrsg.), *Science education research and education for sustainable development*, Shaker, Aachen 2014

<sup>11</sup> R. Hempelmann, *Schülerlabors and Sustainability*, in Ref. 10

<sup>12</sup> Erster Hauptsatz der Thermodynamik, siehe z.B. G. Wedler & H.-J. Freund, *Lehrbuch der Physikalischen Chemie*, Wiley-VCH, Weinheim 2013, Seite 23

<sup>13</sup> Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, ibidem Seite 60

Energie. Der thermodynamische, also der theoretisch maximal erreichbare Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{(T_{\text{heiß}} - T_{\text{kalt}})}{T_{\text{heiß}}} \quad \text{Gl. 1}$$

wobei  $T_{\text{heiß}}$  die Arbeitstemperatur und  $T_{\text{kalt}}$  die Umgebungstemperatur ist, beides in Kelvin. In der Realität kommen noch Verluste durch Nichtidealitäten (Reibung) und durch den Energieverbrauch von peripheren Geräten (Pumpen) hinzu. Einen hohen *elektrischen Wirkungsgrad* erreicht man, indem man die obere Temperatur möglichst hoch wählt (da setzt das Wandmaterial Grenzen) und die untere Temperatur möglichst niedrig, also knapp über Umgebungstemperatur, z.B. 40°C. Durch sogenannte Kraft-Wärme-Kopplung (Heizkraftwerk) kann man den Gesamtwirkungsgrad steigern, indem man zusätzlich zur elektrischen Energie auch die entstehende Wärme nutzt (Abwärme als Nutzwärme für Heizzwecke z.B. als sogenannte Fernwärme). Allerdings muss man dazu das untere Temperaturniveau auf z.B. 100 °C anheben, damit die Wärme nutzbar wird. Damit verschlechtert sich gemäß Gl. 1 unvermeidlich der elektrische Wirkungsgrad. Dieser Zusammenhang, der keineswegs allgemein bekannt ist, lässt sich im Schülerlaborexperiment, beispielsweise mit einem Stirling-Motor, herausarbeiten, was den Schulunterricht zu dieser sicherlich nicht ganz einfachen Materie wirkungsvoll ergänzt. Für das Einfamilienhaus gibt es auf dem Markt kleine Blockheizkraftwerke (BHKW), sogenannte Mini-KWKs, die Erdgas in Strom und Wärme umwandeln, es gibt also unmittelbar einen gesellschaftlichen Kontext.

### Brennstoffzellen

In Brennstoffzellen wird die chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt, ohne den „Umweg“ über Wärme. Der Wirkungsgrad ist gegeben durch

$$\eta = \frac{\Delta G^0}{\Delta H^0} = 1 - T \frac{\Delta S^0}{\Delta H^0}$$

nämlich durch das Verhältnis von herausgeholt elektrischer Energie  $\Delta G^0 = -z \cdot F \cdot E^0$  ( $z$  = Zahl der übertragenen Elektronen,  $F$  = Faraday-Konstante,  $E^0$  = Standard-Zellspannung) zu hineingesteckter chemischer Energie (hier ausgedrückt in Form der Standardverbrennungsenthalpie  $\Delta H^0$ ); dieser Wirkungsgrad ist größer als bei der Wärme-Kraft-Maschine,

was Brennstoffzellen sehr attraktiv macht. Auch hier gibt es die Möglichkeit der Kraft-Wärme-Kopplung, denn auch Brennstoffzellen erzeugen elektrische Energie *und Wärme*, allerdings ist das Verhältnis elektrische Energie/Wärme günstiger als beim Verbrennungsmotor. Da für die Umsetzung von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser die Standard-Reaktionsenthalpie  $\Delta H^0$  und die Standardreaktionsentropie  $\Delta S^0$  (Gl. 2) beide negativ sind, bedeutet auch hier die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades durch Kraft-Wärmekopplung aufgrund der dazu erforderlichen Erhöhung der Arbeitstemperatur  $T$  eine Erniedrigung des elektrischen Wirkungsgrads, siehe Gl. 2. Derzeit erfolgt die Markteinführung der ersten Brennstoffzellen-Heizungen für Ein- und Mehrfamilienhäuser. Brennstoffzellen-Praktika in Schülerlaboren können sehr gut, neben den naturwissenschaftlichen Fragestellungen Klemmspannung (open circuit voltage, OCV) und Gas-Permeation, Elektrokatalyse, Membranwiderstand, und Transporthemmnissen, auch die praktischen Fragestellungen der Zentralheizung im Ein- bzw. Mehrfamilienhaus adressieren.

### Batterien zur Speicherung von Elektrizität aus Wind- oder Solarenergie

Erneuerbare Quellen für elektrische Energie sind Windenergie und Sonnenenergie, aber diese Energieformen sind volatil, d.h. zu gewissen Zeiten im Überschuss, zu anderen Zeiten nicht ausreichend verfügbar. Deshalb muss elektrische Energie gespeichert werden können. Dazu gibt es mehrere Möglichkeiten, z.B. ein Pumpspeicherwerk (d.h. die Umwandlung von elektrischer in potentielle Energie) oder Power2Gas, d.h. die Erzeugung von Wasserstoff (Wasserelektrolyse), dessen Umwandlung in Methan (Sabatier-Prozess), die Speicherung im Erdgasnetz und bei späterem Bedarf die Verstromung in Gasturbinen. Für das Schülerlabor ist eher die elektrische Batterie als Elektrizitätsspeicher von Interesse. In der Batterie wird beim Einspeichern von elektrischer Energie ein chemischer Stoff von einer energiearmen Form in eine energiereiche Form überführt, d.h. elektrische Energie wird umgewandelt in chemische Energie. Beim Ausspeichern geschieht das umgekehrte. In der Dual-Graphit Lithium-Batterie<sup>14,15</sup> ist der energiearme Zustand: beide Graphit-Elektroden sind nativ, während im energiereichen Zustand Li-Ionen in die eine Elektrode und Perchlorat- (bzw.

<sup>14</sup> M. Hasselmann & M. Oetken, *Elektrische Energie aus dem Kohlenstoffsandwich Lithium-Ionen-Akkumulatoren auf Basis redoxamphoterer Graphitintercalations-Elektroden*, CHEMKON 2011, 18, Nr. 4, 160 – 172

<sup>15</sup> J.A. Read,\* A.V. Cresce, M.H. Ervin & K. Xu, *Dual-graphite chemistry enabled by a high voltage Electrolyte*, Energy Environ. Sci., 2014, 7, 617–620



Abb. 1: Schülerlabore im deutschsprachigen Raum<sup>19</sup>

Hexafluorophosphat-) Ionen in die andere Elektrode intercaliert sind.

Chemische Reaktionen laufen nicht unbedingt vollständig ab, sondern es gibt, wenn auch nur in geringem Umfang, Nebenreaktionen; ein Teil der elektrischen Ladung (Strom  $\cdot$  Zeit) wird also gewissermaßen „zweckentfremdet“; das senkt die Coulomb-Effizienz eines Lade-Entladezyklus ab (und beeinträchtigt auch die mit der Batterie erreichbare Zyklenzahl). Damit Strom fließt (Entladestrom oder Ladestrom), bedarf es einer Überspannung (mäßige Elektrokatalyse  $\rightarrow$  hohe Überspannung, gute Elektrokatalyse  $\rightarrow$  niedrige Überspannung). Deshalb ist die Spannung beim Entladen niedriger als

die Klemmspannung (im stromlosen Zustand), die Ladespannung ist höher. Die Spannungseffizienz ist also niedriger als 100%. Das Produkt aus Coulomb-Effizienz und Spannungseffizienz ist die Energieeffizienz, und die liegt dann in günstigen Fällen zwischen 80 und 90%, abhängig davon ob man schnell oder langsam lädt: langsamer Laden  $\rightarrow$  niedrigerer Ladestrom  $\rightarrow$  höhere Energieeffizienz. Die Schüler/innen können durch entsprechende Experimente im Schülerlabor verinnerlichen, dass die Speicherung von Energie grundsätzlich verlustbehaftet ist.

### Energie – Technikmündigkeit: Beitrag des Schülerlabors

Technikmündigkeit bzw. Technikakzeptanz („technical maturity“) aufgrund Technischer Bildung ist genauso wichtig wie Naturwissenschaftliche Grundbildung. Sie unterscheidet sich von der naturwissenschaftliche Bildung,

die *erkenntnisorientiert* ausgerichtet ist. Die Deutsche Gesellschaft für Technische Bildung e.V.<sup>16</sup> beschreibt die Technik als Mittel und Methode zur *Gestaltung* der realen Welt, womit sie ein Ausdruck des Vermögens des Menschen zur schöpferischen Konstruktion ist. Die Schüler/innen sollten von einem Praktikum in einem im Bereich Energie tätigen Schülerlabor mitnehmen, dass unsere Energieversorgung Risiko-behaftet ist: es gibt keine Energieversorgung ohne Nebenwirkungen. Kohlekraftwerke erzeugen große Mengen des Klimagases CO<sub>2</sub> und haben auch noch andere unschöne Emissionen; das gilt in ganz besonderem Maße für Braunkohlekraftwerke. Wind und Solarenergie benötigen riesige Stromtrassen quer durch die Republik, weil Stromspeicherung nicht besonders effizient ist. Erdöl und Erdgas erzeugen ebenfalls CO<sub>2</sub> und zusätzlich politische Abhängigkeiten, Kernenergie hat das Problem der Entsorgung.

Technikakzeptanz erschließt Zugänge zu Wissenschaft und Technik, hier speziell im Bereich Energie. Dadurch ermöglicht sie den Jugendlichen, sich ein rationales Urteil über Chancen und Risiken der verschiedenen Energieversorgungsmöglichkeiten zu bilden, und bildet aufgrund einer fundierten Ausbildung einen Gegenpol zu der skeptischen Einstellung von Teilen der Bevölkerung gegenüber neuen Technologien und Innovationen auch im Bereich Energie. Technikmündigkeit gewinnt in einer zunehmend technisch geprägten Wirtschaft an Bedeutung und ermöglicht Mitsprache und Mitwirkung. Für die *technikbasierte Volkswirtschaft* als Ganzes sind diese individuellen Fähigkeiten von großer Bedeutung.<sup>17</sup> Denn die Prosperität der Wirtschaft industriell geprägter Staaten wird schon heute durch einen Fachkräftengpass beeinträchtigt, gerade auch im Bereich Umwelt- und Energietechnik. Aufgrund der demographischen Entwicklung wird sich dieses Problem in Zukunft noch verschärfen.<sup>18</sup> Auch die Vermittlung von Technikakzeptanz ist eines der Primärziele aller Schülerlabore und lässt gerade bei der Thematik Energie und Energietechnik sehr gut realisieren.

### Zusammenfassung

Schülerlabore sind hervorragend dazu geeignet, Schüler/innen Zugang zu den technischen Aspekten der nachhaltigen Entwicklung im Kontext der Energieversorgung zu bieten. Sie lernen kennen, wie die Natur-

<sup>16</sup> DGTB 2014. Deutsche Gesellschaft für technische Bildung e.V., siehe [http://www.dgtb.de/\(22.08.2014\)](http://www.dgtb.de/(22.08.2014))

<sup>17</sup> TIMSS 2015, Context Questionnaire Framework, by Martin Hooper, Ina V.S. Mullis, Michael O. Martin, Chapter 3. [http://timssandpirls.bc.edu/timss2015-advanced/downloads/TA15\\_FW\\_Chap3.pdf](http://timssandpirls.bc.edu/timss2015-advanced/downloads/TA15_FW_Chap3.pdf) (14.08.2014).

<sup>18</sup> Caldwell J.C., Caldwell B.K., Caldwell P., Peter F McDonald P.F. & Schindlmayr T. (2006).

*Demographic Transition Theory*. Dordrecht, The Netherlands: Springer. p. 239. ISBN 1-4020-4373-2.

<sup>19</sup> [www.lernort-labor.de](http://www.lernort-labor.de)

wissenschaften die Herausforderungen des Umweltschutzes und der nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen und Energie annehmen. Das setzt die Schüler/innen dazu instande, Umwelt- und Verknappungsprobleme zu verstehen, und das hilft ihnen, eigene Ideen und eigene Lösungsansätze zu entwickeln. Für ihre eigene Zukunft ziehen sie vielleicht sogar eine dementsprechende berufliche Tätigkeit in Erwägung, damit sie in Zukunft derartige Prozesse mitgestalten können. Experimentalangebote im Schülerlabor befördern auch die Wertschätzung von Nachhaltigkeit als persönlicher Haltung des Einzelnen und von den Naturwissenschaften als Basis von Energieverfahrenstechnik und letztlich auch von Energiesystemtechnik.

In altersgerechter Weise werden auch öffentliche Debatten über Nachhaltigkeit aufgegriffen und in Form von Experimenten verarbeitet. Ein Charakteristikum der meisten Schülerlabore ist der enge Bezug zwischen schulischem und außerschulischem Lernen. Das stellt die sorgfältige Behandlung entsprechender Inhalte des Lehrplans sicher und vermittelt gleichzeitig Kenntnisse über die von der akademischen Forschung und der Energiewirtschaft getroffenen Maßnahmen, Möglichkeiten zum nachhaltigen Umgang mit Energie aufzuzeigen bzw. zu nutzen.



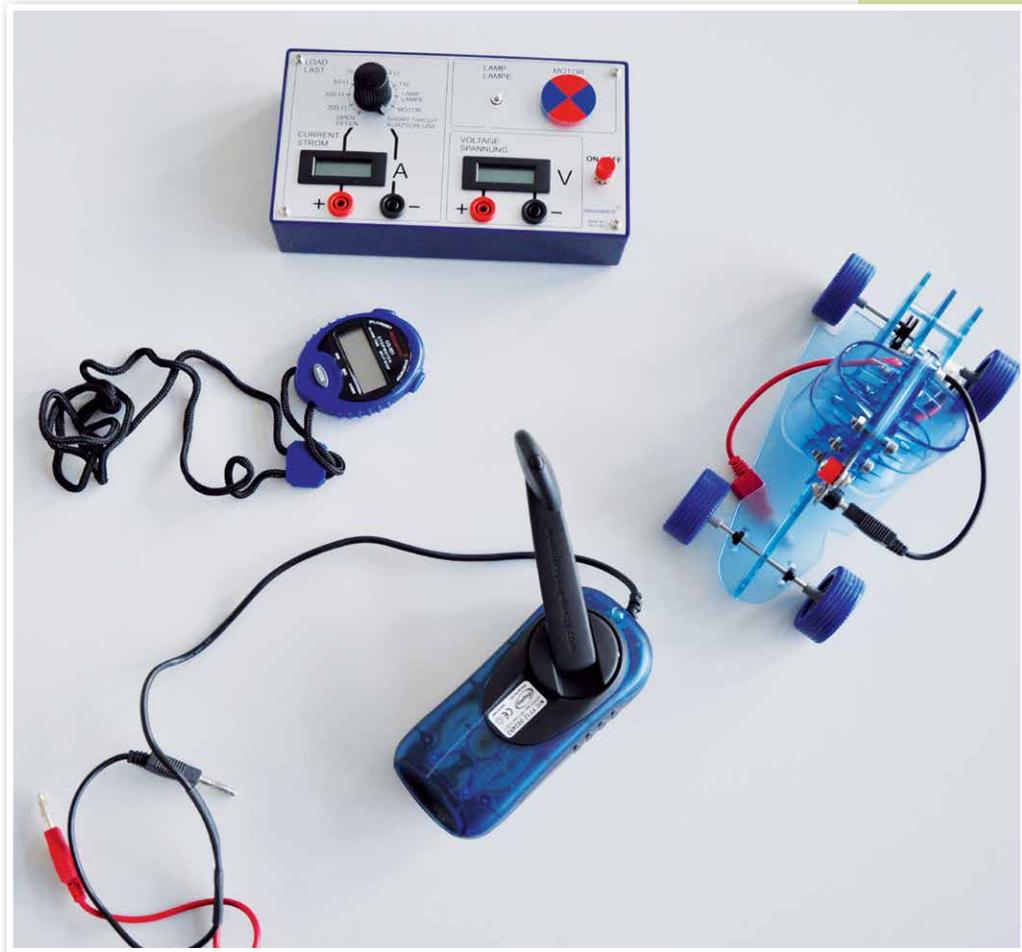
**Prof. Dr. Rolf Hempelmann**

*Physikalische Chemie, Universität des Saarlandes,  
Campus B 22, D-66123 Saarbrücken  
LernortLabor – Bundesverband der Schülerlabore e.V.,  
Berlin  
r.hempelmann@mx.uni-saarland.de*





# BETRIEB EINER BRENNSTOFFZELLE





### Betrieb einer Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle funktioniert wie eine Batterie. Ihre Vorteile gegenüber einer Batterie sind jedoch, dass sie nicht wieder aufgeladen werden muss und dass sich ihre Elektroden während der ablaufenden chemischen Reaktionen nicht verändern. Die gespeicherte Energie befindet sich bei einer Brennstoffzelle im Brennstoff.

Im Kurs „Erneuerbare Energien-Brennstoffzelle“ des zdi-Schülerlabors der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg werden der Aufbau und die Funktionsweise einer Brennstoffzelle erarbeitet, die aus Wasserstoff Energie freisetzt. Dabei werden die einzelnen beteiligten Stoffe, die in der Zelle ablaufenden Reaktionen und Reaktionsgleichungen thematisiert.

Von den Schüler/innen wird ein einfaches Elektroauto mit reversibler Brennstoffzelle aufgebaut, das wahlweise mit dieser Brennstoffzelle, einer Solarzelle oder einem Handgenerator angetrieben werden kann. Solarzelle und Handgenerator können außerdem zum Laden der Brennstoffzelle genutzt werden. So ist auch die Visualisierung eines Wirkungsgrades möglich. Das Laden der Brennstoffzelle zeigt eine Anwendung der Elektrolyse, das Betreiben eines kleinen Autos mit der Brennstoffzelle die Anwendung einer galvanischen Zelle. Über den Handgenerator bekommen die Schüler/innen ein Gefühl dafür, was hinter dem abstrakten Begriff der „Energie“ steckt.

## Was bedeutet das Schülerlabor für die Schule?

**Chemie und Energie** – aus Sicht einer Lehrkraft einer Realschule in Braunschweig mit Abordnung an das Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor, einem außerschulischen Lernort, der TU in Braunschweig:

Schülerlabore, Werkstätten und „Dolmetscher“ der Wissenschaftler oder Brücke zwischen Wissenschaft und Schule.

Das Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor an der TU Braunschweig steht seit 2002 allen Schultypen und Altersgruppen offen. Etwa 4.200 Besuche zählt das Labor jährlich. Die Besuche finden schwerpunktmäßig im zweiten Schulhalbjahr statt. Neben dem Experimentieren für Schulklassen hat das SchülerInnenlabor Anfänger- und Fortgeschrittenen-AGs für Schulkinder sowie einen Verleih von Kisten mit Versuchsmaterialien für Schulen im Programm. Die Kontaktaufnahme zum Labor kann über das persönliche Gespräch per Telefon zu festgelegten Zeiten innerhalb der Schulzeit oder per Mail erfolgen. Die Homepage des Schülerlabors gibt Auskunft über ständige und aktuelle Angebote. Viele Versuchsvorschriften mit dazugehöriger LehreinFORMATION sind auf der Internetseite hinterlegt. Zu vielen Themen werden Lehrerfortbildungen angeboten. Diese werden von den Lehrerseminaren sehr gut angenommen.

Das Thema Chemie und Energie ist im Chemieunterricht gem. aktuellem Kerncurriculum für die Realschulen in Niedersachsen kaum vorgesehen. Lediglich energetische Betrachtungen bei Stoffumwandlungen, die Energiespeicherung in den Stoffen sowie die Veränderung des Energiegehaltes der Stoffe bei chemischen Reaktionen wird thematisiert (Ionenbindung, Ionenbildung, Batterie als Energiespeicher). Inhalte, die sich mit erneuerbaren Energien beschäftigen, werden im Kerncurriculum der Sekundarstufe I in Niedersachsen kaum angesprochen. Eine Ausnahme macht dabei lediglich die Brennstoffzelle (Wasserstoff-, Methanol-Brennstoffzelle) im Rahmen der Unterrichtseinheit Chemie und Elektrizität. Dies spiegeln so auch die Inhalte der für die Sekundarstufe I zur Verfügung stehenden Schulbücher wider. Derzeit werden die Kerncurricula für die Naturwissenschaften der Sekundarstufe I überarbeitet. Sie sollen im Jahr 2015 erscheinen. Wünschenswert wäre für das Fach Chemie eine Fokussierung auf die Betrachtung der

Energieprozesse bei chemischen Reaktionen (Energieumwandlung in lebenden Organismen z.B. Photosynthese oder Ernährung). Die Aufgabe der Schülerlabore wäre hierbei, flexibel und zeitnah die neuen Anforderungen aufzugreifen und für die Schulen entsprechende Angebote bereitzustellen.

Seit Sommer 2007 fanden durch die Realschule Maschstraße Besuche einiger Schülergruppen im Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor statt. Lehrkräfte und SchülerInnen lobten dabei insbesondere die Ausstattung des Labors, die Betreuung durch wissenschaftliche Mitarbeiterinnen sowie das Arbeiten in einem „echten“ Chemielabor.



Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekts ist die Realschule Maschstraße seit September 2010 Partnerschule des Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor. Bis Ende 2013 fanden regelmäßig (ca. alle 2 Monate) Treffen mit den Mitarbeiterinnen des Instituts unter Leitung von Prof. Petra Mischnick und den Chemielehrerinnen der Realschule Maschstraße in deren Schule zum Austausch von Informationen, Vorstellen von Experimenten und Auswertung von Erfahrungen bei der Umsetzung sowie der didaktischen Beratung statt. Diese Arbeit der Lehrkräfte erfolgte zusätzlich zur Unterrichtsarbeit.

Für den Themenkomplex „Nachhaltigkeit und Energie“ wurden Experimente zu den Themen Stoffkreisläufe, Katalyse und Wärmespeicherung sowie Wärmedämmung entwickelt und erprobt. Beispiele sind der  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  Kreislauf, Vergleich von chemischer Biokatalyse, Phasenwechselmaterialien sowie verschiedene Formen des Recyclings.

Die entwickelten chemischen Versuche zum Thema „Stoffkreisläufe“ sind in die schuleigenen

Arbeitspläne der Schule eingebunden und im Schulprogramm aufgenommen. Konkret werden folgende Stoffkreisläufe in den Jahrgängen 6, 7, 8 und 10 be- und erarbeitet:

- *Wasserkreislauf, Abwasserbehandlung*  
*Klasse 6 Chemie*
- *Atmung/Verbrennung*  
*Klasse 7 Chemie*
- *Kohlenstoff/Sauerstoff - Fotosynthese*  
*Klasse 8 Biologie*
- *Recycling, Kompostierung*  
*Klasse 10 Chemie*

Die vom Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor entwickelten Experimente werden an Projekttagen im Labor durchgeführt. Alle Themen sind in den Unterricht eingebunden und werden vor- und nachbereitet.

Die Arbeit an den oben genannten Stoffkreisläufen beinhaltet fächerübergreifende Themen der Biologie (z.B. Fotosynthese), Physik (z.B. Abwasserbehandlung) und Arbeit, Wirtschaft, Technik (z.B. Recycling)

Die Fachlehrkräfte der Schule betonen den hohen Stellenwert der Zusammenarbeit mit dem Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor und die Selbstverständlichkeit mit der diese Besuche, durch ihre Festschreibung im schuleigenen Lehrplan sowie dem Schulprogramm, stattfinden können. Durch die schulische Einbindung sind die Besuche im Schülerlabor selbstverständlich geworden. Es entfallen zeitraubende Diskussionen. Die Vorbereitung des Projekttag ist ein wichtiger Teil des Unterrichts in der Schule. Die Bereitschaft der SchülerInnen sich mit dem Thema weiter auseinanderzusetzen erhöht sich nach dem Laborbesuch.

Auch wird festgestellt, dass die SchülerInnen im Umgang mit den Laborgeräten, den Chemikalien sowie den Versuchsvorschriften durch die Besuche im Labor noch geübter und sicherer werden. Abgesehen von den fachlichen Kompetenzen, werden auch die prozessbezogenen Kompetenzen im Bereich der Erkenntnisgewinnung durch das intensive (nicht nur 45 Minuten lange) Experimentieren und Auswerten gefördert. Der Abschluss der Arbeit durch ein angemessenes Protokollieren ist gewährleistet. Insbesondere bei leistungsschwachen SchülerInnen fällt auf, dass diese im Labor motivierter und engagierter als arbeiten als im Schulunterricht

Dass Schülerlabore fachliche sowie prozessbezogene Kompetenzen vermitteln können, spiegelt die Aussagen der SchülerInnenbefragungen wider. Sie sprechen für sich.

An der Realschule wurde in zwei aufeinanderfolgenden Jahren in den Abschlussklassen eine Erhebung durchgeführt. Die SchülerInnen wurden um Begründungen gebeten, weshalb der regelmäßige Besuch des Labors für SchülerInnen wichtig ist. Den SchülerInnen gefällt insbesondere das selbstständige Experimentieren in Zweiergruppen. Es können Versuche durchgeführt werden, die in der Schule in der Weise nicht möglich wären, da es dort häufig an Material und Ausstattung fehlt. Durch das Experimentieren im Labor wird das Wissen besser aufgenommen und gefestigt. Sie erfahren die Chemie in der Praxis, haben Einblick in die Arbeit als ChemikerIn. Durch die regelmäßigen Besuche dieses außerschulischen Lernorts erlangen sie immer mehr Sicherheit im Umgang mit den Geräten und den Chemikalien. Letztendlich wird genannt, dass die Chemie durch Laborbesuche interessanter wird, Prozesse durch die Experimente veranschaulicht werden und Unterricht in dieser Form Spaß macht. Der Alltagsbezug wurde nur von wenigen SchülerInnen in den Blick genommen. Er sollte stärker in den Focus gerückt werden.

Eine engere Verzahnung zwischen Schule und SchülerInnenlaboren zeigt große Vorteile und sollte gestärkt werden. Ein enger Kontakt zwischen Schule und Wissenschaft ist dabei unerlässlich.



**Petra Schille**

Realschule Maschstraße, Maschstraße 4,  
38114 Braunschweig  
Agnes-Pockels-SchülerInnen-Labor /  
Institut für Lebensmittelchemie,  
TU Braunschweig, Schleinitzstraße 20,  
D-38106 Braunschweig  
agnespockelslabor@tu-braunschweig.de  
www.tu-braunschweig.de/agnes-pockels-labor



# DAS E-BOBBYCAR-PROJEKT



Schülerlabor Chemie  
Institut für Physikalische und Theoretische  
Chemie, Technische Universität Braunschweig  
<https://www.tu-braunschweig.de/pci/service/schuelerlabor>



### Das E-Bobbycar-Projekt

Rutschautos wie z. B. Bobby-Cars sind bei kleinen Kindern sehr beliebt. Auch wenn die Schüler des Braunschweiger Gymnasiums Hoffmann-von-Fallersleben-Schule selbst diesem Alter bereits entwachsen sind, haben sie sich im Zuge der E-Mobilität und mit Unterstützung des Schülerlabors Chemie an der TU Braunschweig der Herausforderung gestellt, einen fortschrittlichen und umweltfreundlichen Elektro-Antrieb für derartige Fahrzeuge zu entwickeln. Dabei ging es darum, moderne Technologien im Rahmen der E-Mobilität und energieeffizienten Ressourcenschonung am Modell des Bobby-Cars in die Praxis umzusetzen. Das Vorhaben gliederte sich in verschiedene Teilprojekte, die erfolgreich in Zusammenarbeit mit weiteren externen Partnern (Fraunhofer ICT, Ferchau Engineering GmbH, Hochschule Ostfalia, Autostadt, Lineas Informationstechnik GmbH) abgeschlossen werden konnten:

- *Akkuschrauberantrieb*
- *Mobile Ladestation auf einem Anhänger mit Brennstoffzelle und Metallhydridspeicher*

- *Stationäre Ladestation (Solar-Carport)*
- *Licht- und Soundanlage*

Bisherige Testläufe mit Kindern auf diversen Präsentationen stießen auf große Begeisterung!

Zur Zeit wird an einer automatischen Steuerung der Lichtanlage mit Hilfe eines Mikrocomputers (Raspberry Pi) gearbeitet. Über diesen sollen weitere Fahrerassistenzsysteme wie z. B. eine Auffahrsperrung integriert werden. Angedacht ist ferner das Bobby-Car mit einem Emergency-Call-System (kurz E-Call) auszurüsten. Dieses ermöglicht es dem Fahrer (Kind), im Falle einer Panne oder Unfall einen automatischen Notruf an eine Zentrale (Erwachsener) abzusetzen. Gleichzeitig soll eine automatische Ortung des E-Bobby-Cars durch die Zentrale möglich sein. Die Kommunikation soll über Smartphones und entsprechend programmierte Apps realisiert werden.



4

**WAS GIBT ES NOCH?**



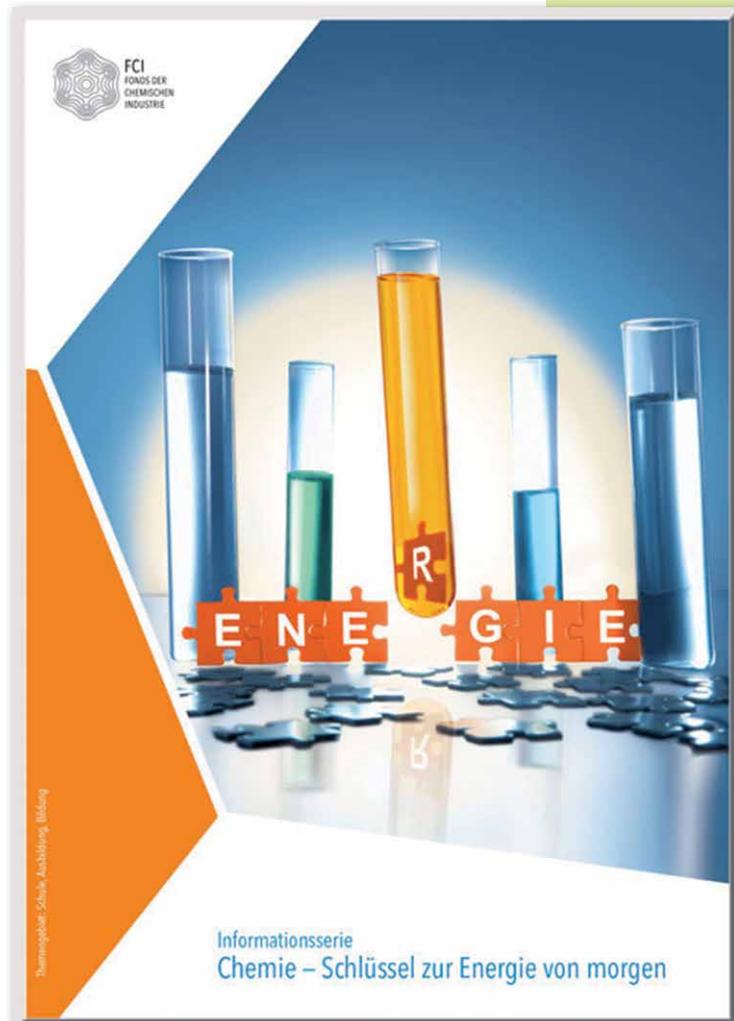
## Förderprogramm „Schulpartnerschaft Chemie“

Der Fonds der Chemischen Industrie (FCI) ist das Förderwerk des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI); er fördert die Grundlagenforschung, Nachwuchswissenschaftler sowie über sein bundesweites Förderprogramm „Schulpartnerschaft Chemie“ auch den Chemieunterricht und dessen gesamtes Umfeld. Mehr Jugendliche für die Chemie zu begeistern hat sich der FCI hierbei als Ziel gesetzt. U. a. vergibt er dazu Fördermittel an Schulen – für einen spannenden, lebensnahen und attraktiven Experimentalunterricht im Fach Chemie.

An den Start ging „Schulpartnerschaft Chemie“ im April 2001. Bis Ende des Jahres 2013 hat die chemische Industrie über ihr Förderwerk FCI mehr als 25 Millionen Euro dafür aufgewendet. Sie hat das Programm bisher vier Mal verlängert; die aktuelle dreijährige Förderperiode läuft bis inklusive 2015. Allein für das Jahr 2014 hält der FCI wieder rund 2,5 Millionen Euro bereit.

„Schulpartnerschaft Chemie“ besteht aus einem Bündel unterschiedlichster Maßnahmen. Eine der „tragenden Säulen“ ist die oben bereits erwähnte Unterrichtsförderung; bis zu maximal 5.000 Euro Fördermittel kann ein Chemielehrer hier für den Experimentalunterricht an seiner Schule erhalten. Mit diesen Fördergeldern können die Lehrer Chemikalien und Geräte für Experimente – vor allem für Schülerexperimente – anschaffen und so ihren Chemieunterricht anschaulicher gestalten. Von April 2001 bis Ende des Jahres 2013 gingen rund 11,6 Millionen Euro als Unterrichtsförderung an 3.700 Schulen. Im Laufe der Jahre haben zahlreiche Schulen auch schon mehr als einmal diese Mittel beantragt: 6.890mal konnte der FCI in diesem Zeitraum seine Unterrichtsförderung vergeben.

Andere Förderdomänen im Programm „Schulpartnerschaft Chemie“ sind kostenfreie Unterrichtsmaterialien, die Mentoring-Förderung, die Chemiedidaktik-Förderung, die Unterstützung von Chemie-Wettbewerben für Schüler und Stipendien für Lehramts-Studenden des Faches Chemie. Des Weiteren gibt es Fördermittel für Chemie-Lehramtsanwärter/Referendare und für schulübergreifende Kooperationen von Chemielehrern. Nicht zuletzt unterstützt der FCI im Programm „Schulpartnerschaft Chemie“ mit seinen Fördermitteln



„Chemie - Schlüssel zur Energie von morgen“, Informationsserie des FCI

auch die Chemielehrerfortbildung der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh).

Mit seinen Unterrichtsmaterialien hält der FCI Lehrer wie Schüler über aktuelle Entwicklungen in der Chemie auf dem Laufenden. Es gibt Unterrichtsmaterialien über z. B. Chemieprodukte aus der Alltagswelt, Lernsoftwares und Experimentier-Kits. Die Materialien behandeln wichtige Sachgebiete und Querschnittsthemen der Chemie, die sich oft noch nicht in Lehrbüchern finden. Bei der Erstellung werden Didaktiker, Lehrer, Hochschullehrer und bei Bedarf auch Industrievertreter beratend hinzugezogen, um eine hohe wissenschaftliche, fachliche und didaktische Qualität sicherzustellen. Zu den Qualitätsstandards gehört auch die ausgewogene und sachliche Erörterung der Themen mit Bezug zu den Lehr-

## WAS GIBT ES NOCH?

plänen und dem Alltag der Schüler (Chemie im Kontext). Es werden weiterhin keine Firmen (Ausnahme: Bildnachweise) und Handelsnamen von Produkten genannt oder politische Botschaften und Forderungen vorgestellt. Alle Unterrichtsmaterialien enthalten Vorschläge für Experimente und Schülerarbeitsblätter. Sie werden regelmäßig weiterentwickelt und ergänzt. Vor allem auch mit elektronischen Medien und Internetangeboten. In seine kostenfreien Unterrichtsmaterialien hat der FCI bislang über 4,9 Millionen Euro investiert.

Auch zum Thema Energie hält der FCI für Lehrer und Schüler Unterrichtsmaterial bereit mit dem Titel „Chemie – Schlüssel zur Energie von morgen“; es steht sowohl in gedruckter Form (Textheft plus CD-ROM) als auch zum Download im Internet zur Verfügung.

An einer weiteren informativen Publikation im Bereich Energie „Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie“ ist der FCI außerhalb seines Förderprogramms „Schulpartnerschaft Chemie“ über den VCI – „indirekt“ beteiligt. Diese Broschüre gehört somit auch nicht zu den speziell für Schulen/Lehrer/Schüler entwickelten Materialien des FCI. Diese Publikation hat der Koordinierungskreis Chemische Energieforschung folgender Chemieorganisationen erstellt und getragen: VCI, DBG (Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e. V.), DECHEMA (Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V.), DGMK (Deutsche wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e. V.), GDCh und VDI-GVC (Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen). Inhaltlich geht es darin u. a. um die Bereitstellung, die Speicherung und die effiziente Nutzung von Energie im Zusammenhang mit der Chemie.

Die im Folgenden beschriebenen Förderdomänen sind wieder im Programm „Schulpartnerschaft Chemie“ angesiedelt.

In der Mentoring-Förderung vergibt der FCI Fördermittel für Projekte, in denen zum Beispiel Hochschulen mit Schulen zusammenarbeiten. Von 2001 bis Ende 2013 erhielten 649 solcher Projekte mehr als 3,5 Millionen Euro. In der Mentoring-Förderung unterstützt der FCI derzeit ganz aktuell auch große Projekte zum Thema Chemie und Energie.

In einer weiteren Förderdomäne, der Chemiedidaktik-Förderung, geht es u. a. darum, neue und verbesserte Experimente zu entwickeln. Hier gab es vom FCI bisher über 634.000 Euro für 116 Projekte. Auch in dieser Förderdomäne finden sich unter den geförderten Projekten solche zum Thema Energie und Chemie.

Mit 1,33 Millionen Euro trug der Fonds zum Erfolg zahlreicher Chemie-Wettbewerbe für Schüler bei und mit weiteren 60.000 Euro zu einem jährlichen Chemiekurs bei der Deutschen SchülerAkademie. An insgesamt 226 Lehramtsstudenten gingen bis Ende 2013 insgesamt 600.000 Euro für Stipendien, und 3.218 Referendare erhielten in den Jahren 2001 bis 2013 weitere 605.000 Euro Fördermittel. Die sieben GDCh-Chemielehrer-Fortbildungszentren wurden in diesem Zeitraum mit mehr als 1,85 Millionen Euro unterstützt. Auch bei diesen Fortbildungsveranstaltungen ist das Thema „Energie“ nicht außen vor.

Der Grund für dieses außerordentliche Engagement der chemischen Industrie: Nur sehr gut ausgebildete Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker können die Leistungsfähigkeit des Wirtschaftsstandortes Deutschland gewährleisten. Und dafür muss man bereits in der Schule den Grundstock legen.

Informationen zu den genannten Förderbereichen und zum FCI finden sich unter: [www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)

**Dr. Sabine Bertram**

Fonds der Chemischen Industrie  
bertram@vci.de

## Projekt energie.bildung

Die Versorgung mit erneuerbaren und fossilen Energien und eine nachhaltige Nutzung von Energie stellt ein globales gesellschaftliches Schlüsselproblem der 21. Jahrhundert dar. Bildungsprozesse, die nachhaltige Energieversorgung und -nutzung unterstützen, sind neben technologischen Entwicklungen die zentralen Hebel, um das Problem anzugehen. Das Projekt energie.bildung an der Universität Oldenburg wurde 2009 mit Mitteln des Zukunfts- und Innovationsfonds Niedersachsen gestartet und hat sich auf folgende Ziele konzentriert:

- *Energiebildung soll als ein innovativer multi- und interdisziplinären Bildungsauftrag definiert und transportiert werden.*
- *Unterrichtskonzepte zur Energiebildung sollen für alle relevanten Fächer in Zusammenarbeit von Fachdidaktiken und Schulen unter Vernetzung naturwissenschaftlicher, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Perspektiven entwickelt und erprobt werden.*
- *Energiebildung soll durch die Integration in Schulprogramme und landesweite Kerncurricula verankert werden, wofür enge Kooperationen mit den Landesschul-behörden, mit Einrichtungen der Fortbildung von Lehrkräften sowie mit regionalen Unternehmen und Institutionen zu nutzen sind.*

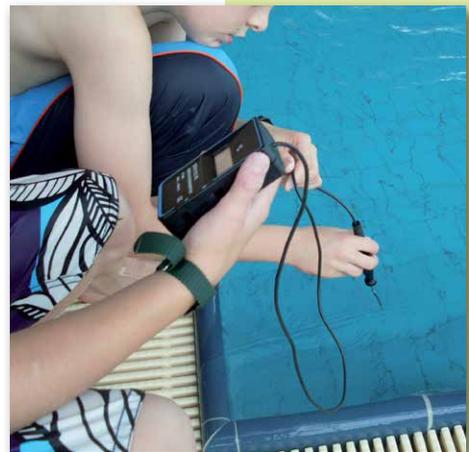
Unter schulischer Energiebildung (Grundschule, Sekundarstufen I und II) verstehen die Projektakteure die Gesamtheit aller erzieherischen Prozesse, die Kindern und Jugendlichen dabei helfen, energiebezogene Kenntnisse und Fähigkeiten sowie Verhaltensdispositionen und Einstellungen aufzubauen. Diese sollen es ihnen ermöglichen, sich aktiv mit den Bedingungen und der Bewertung unserer Energieversorgung und unseres Nutzungsverhaltens auseinanderzusetzen, indem ökonomische und ökologische Perspektiven ebenso einbezogen werden wie naturwissenschaftliche und technologische, soziologische und politische, historische und philosophische, rechtliche und ethische.

Eine solche Energiebildung umfasst auch eine berufsorientierende Komponente und soll die Berufswahl im Hinblick auf alternative Berufswege erweitern. Lehrer/innen sollen im Zuge von Energiebildung dazu befähigt werden, ihre Schüler/innen beim Aufbau dieser Kenntnisse, Fertigkeiten und Dispositionen zu

unterstützen. Diese Fähigkeit der Lehrkräfte ist zu einem wesentlichen Qualifizierungsbau-stein der Oldenburger Lehrerbildung geworden.

Diesen Zielen folgend, befasst sich energie.bildung in zahlreichen Teilprojekten der beteiligten sieben Fachdidaktiken mit der Integration der Energiebildung in Unterricht und Hochschulbildung, mit der Koordination von Veranstaltungen und der Durchführung von Lehrerfortbildungen. Resultierend sind bis 2014 eine Vielzahl von Unterrichtskonzeptionen und -materialien, Lehrerfortbildungen, Modulen für die Lehrerausbildung, Exkursionskonzepten, Veranstaltungen und rund 250 Publikationen entstanden. Die Ergebnisse des Projekts werden auf dem Webportal des Projekts präsentiert: <http://www.energieportal.uni-oldenburg.de/>.

Eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg von energie.bildung besteht im intensiven Austausch zwischen Schule und Universität. Hierzu haben sich Gruppen aus erfahrenen Lehrkräften und Fachdidaktiker/innen gebildet, die teilweise länger als ein Jahr gemeinsam Unterrichtskonzepte und Materialien für den Unterricht entwickelt und diese in der Schulrealität erprobt haben. Manche Konzepte sind auch in den von den Fachdidaktiken betriebenen Schülerlaboren ([www.olela.de](http://www.olela.de)) evaluiert worden. Die optimierten Unterrichtskonzepte haben Eingang in die Profile und Programme regionaler Schulen gefunden. Durch die enge Vernetzung innerhalb der Fachdidaktiken sind insbesondere interdisziplinäre und multidisziplinäre Ansätze erprobt worden. So sind z.B. ein fächerübergreifendes Buch zur Windenergie oder das Hochschulmodul „Energie interdisziplinär“ entstanden.



## WAS GIBT ES NOCH?

energie.bildung hat sich durch eine intensive Öffentlichkeitsarbeit Schulen, Lehrkräften und Unternehmen vorgestellt und hat mittels zweier Tagungen auch die fachdidaktische Diskussion angeregt. Die Energiemesse „Energieberufe LIVE!“ für Schüler/innen, Lehrerfortbildungen im Rahmen der Pädagogischen Woche, die Mitwirkung an einer Ideen-Expo und an der „Langen Nacht der Wissenschaft“ sind nur einige der besonderen Veranstaltungsformate. Durch das große Interesse der lokalen und regionalen Medien am Thema finden die Veranstaltungen immer wieder ihre Resonanz in Zeitung, Radio und Fernsehen, insbesondere nach dem Reaktorunfall in Fukushima.



energie.bildung hat einen intensiven Kontakt zu regionalen Energieunternehmen aufgebaut, die sich vor allem für den Energieparcours-Nordwest.de interessieren, einem Angebot an außerschulischen Lernorten der Region rund um das Thema Energienutzung. Der Parcours wurde im Jahr 2012 als UN-Dekade Projekt ausgezeichnet. Zu dem Parcours gehören auch energieorientierte Angebote der Oldenburger Schülerlabore (Chemie, Physik, Technik, Informatik, Biologie), die von Schulklassen gebucht werden können.

Auf Ebene der Hochschule ist das Modul „Energie interdisziplinär“ entwickelt worden und wird seither regelmäßig angeboten: Angehende Lehrkräfte und weitere Studierende haben die Möglichkeit, sich in diesem Modul multiperspektivisch mit den Themen Energie und der Vermittlung von Energiekompetenz zu befassen. Auch in den rein fachdidaktischen Veranstaltungen wird das Thema Energiebildung nun prominenter thematisiert als zuvor. Insgesamt hat die enge Zusammenarbeit der Fachdidaktiken mit den Energieforscher/innen der Universität Oldenburg dazu beigetragen.

Durch die Mitwirkung der Projektakteure am Arbeitskreis Energiebildung des Niedersächsischen Kultusministeriums konnten Ideen zur Verbesserung der Energiebildung in

den niedersächsischen Lehrplänen vorgetragen werden; zudem ist am Bericht der niedersächsischen Klimaschutzkommission mitgearbeitet worden.

Nach Ende der Förderphase bleibt die Energiebildung weiterhin ein wichtiges Thema an der Universität Oldenburg. Durch die Einrichtung der „Arbeitsstelle Energiebildung“ im Didaktischen Zentrum werden die genannten Ziele weiter verfolgt und durch Forschungen zum Themenfeld ergänzt, u.a. unter Nutzung der Oldenburger Lehr-Lern-Labore, die ab 2014 von der Deutschen Telekom-Stiftung gefördert werden. Energiebildung ist somit zu einem breiten Profilelement der Oldenburger Lehrerbildung geworden.



**Dr. Verena Niesel**

Projekt Energiebildung, Didaktisches Zentrum,  
26111 Universität Oldenburg, verena.niesel@uni-oldenburg.de



**Prof. Dr. Michael Komorek**

Arbeitsstelle Energiebildung, Physikdidaktik,  
26111 Universität Oldenburg,  
michael.komorek@uni-oldenburg.de

## „T-Shirts, Tüten und Tenside – Die Ausstellung zur Nachhaltigen Chemie“

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat eine Reihe von Wanderausstellungen entwickelt, die komplexe Umweltinhalte interaktiv vermitteln zu Themen wie „Weiße Biotechnologie“, „Energie“, „Wasser“, „Klimawandel“ usw. Die hier im weiteren Text beschriebene siebte DBU-Wanderausstellung wurde zum Thema „Nachhaltige Chemie“ umgesetzt. Diese interaktive Ausstellung wandert insgesamt fünf Jahre lang durch Deutschland und wurde im „Internationalen Jahr der Chemie“ im Jahr 2011 über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr im Zentrum für Umweltkommunikation der Deutschen Bundesstiftung Umwelt präsentiert. Neben einem Besuch der Ausstellung konnten schulische Gruppen ab der 7. Klasse – im Klassenverband oder Grund- und Leistungskursen Chemie – zusätzlich zum Ausstellungsbesuch ein pädagogisches Begleitprogramm buchen. Das pädagogische Begleitprogramm bestand aus einem Expertenpuzzle für die Sekundarstufe I oder einem Planspiel für die Oberstufe.

An neun Stationen mit insgesamt 18 interaktiven Elementen lädt die Ausstellung „T-Shirts, Tüten und Tenside“ dazu ein, Zusammenhänge zwischen alltäglichen Produkten und chemischen Verfahren spielerisch zu erforschen. Hier ist Anfassen und Ausprobieren von Pipette, Handy, Waschmittel und Co. unbedingt erwünscht. Die Ausstellung macht über das Mitmachen nicht nur auf Chemie, chemische Experimente und die chemische Industrie als Arbeitgeber neugierig, sondern trägt auch dazu bei, die Potenziale der Chemie für eine zukunftsfähige Entwicklung unserer Gesellschaft zu verstehen.

Um diese Ziele verfolgen zu können, hat die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) mit Partnern aus der Chemie zusammengearbeitet. Die Ausstellung entstand gemeinsam mit der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), der Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (DECHEMA) und dem Verband der Chemischen Industrie e. V. (VCI). Die Wanderausstellung wird noch bis 2018 deutschlandweit und auch nach Österreich und in die Schweiz verliehen, bevor sie einem festen Entleiher übergeben wird.

### Alltägliche Produkte und chemische Verfahren

T-Shirts, Tüten und Tenside – nicht nur der Titel der Ausstellung besagt es, sondern auch



das riesige Ethanolmolekül im Eingangsbereich der Ausstellung zeigt es beispielhaft: Chemie steckt in vielen unserer alltäglichen Produkte. Hier sind neben Tüte und T-Shirt, Medikamente und Magazine, DVD und Kartoffel unter Plexigaskuppeln zu finden. Die Liste ließe sich aber beliebig erweitern. Ohne Chemie ist unser Alltag kaum noch vorstellbar. Alleine die Tatsache, ständig erreichbar zu sein, ist ohne Handy, in dem natürlich auch Chemie steckt, kaum gewährleistet. Als Einführungsmodul werden diese Zusammenhänge thematisiert und geben den Besuchern einen Einstieg.

### „Was hat ein Handy mit dem Kongo zu tun?“

In der Ausstellung klingelt gelegentlich ein Handy. Nimmt der Besucher ab und lauscht, erfährt er, wie sich über das Entsorgen und Recyclen von Handys 17 der über 50 wertvollen Rohstoffe, die in einem Handy stecken, wieder verwenden lassen. Einige der Rohstoffe, wie





Gold, Nickel, Cobalt und Tantal, sind sogar in der Ausstellung zu finden und lassen sich dort tatsächlich unter die Lupe nehmen. Per Monitor erfährt der Besucher, wo diese Elemente herkommen, was sie wert sind und unter welchen Bedingungen sie gewonnen werden. So wird auch die Verbindung zwischen der unkontrollierten und menschenunwürdigen Förderung von Tantal im Kongo und den dadurch schwindenden Lebensräumen der vom Aussterben bedrohten Gorillas schnell klar.

### Nachhaltige Chemie auf vielen Wegen

Ein Haus dämmen, mit einem Solarmodul Energie erzeugen, Menthol nicht nur riechen, sondern auch seine Herstellung verfolgen, Wasser filtern, nachvollziehen, wie aus PET-Flaschen Pullover werden, Druckerschwärze von alten Zeitungen lösen oder mit Seepocken auf Tuchfühlung gehen: Beim Rundgang durch diese Ausstellung, vorbei an den Labortischen mit den 18 Experimentierstationen, erfahren die Besucher spielerisch, dass Nachhaltige Chemie bedeutet, Ressourcen zu sparen, die Effizienz zu steigern, weniger giftige Stoffe zu verwenden und das Klima zu schonen.



### Organisatorisches zur Wanderschaft der Ausstellung

Die Ausleihe der gut 230 m<sup>2</sup> großen Wanderausstellung ist kostenlos. Der Entleiher der Ausstellung trägt lediglich die Kosten für Auf- und Abbau der Ausstellung sowie Transport und Versicherung. Der Zeitraum der Ausleihe sollte mindestens zwei bis drei Monate betragen. Das Zentrum für Umweltkommunikation der DBU (ZUK) hat Begleit- und Unterrichtsmaterialien sowie zusätzliche Experimente zur Ausstellung entwickelt. Diese Materialien bietet das ZUK den Entleihern der Ausstellung ebenfalls an.

Weitere Informationen unter:  
[www.t-shirts-tueten-und-tenside.de](http://www.t-shirts-tueten-und-tenside.de)

Fotos: Deutsche Bundesstiftung Umwelt



**Ulrike Peters**

Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Leiterin Referat Umweltinformationsvermittlung  
Förderschwerpunkt Naturwissenschaftlich-technische  
Umweltbildung und Kommunikation  
[U.Peters@dbu.de](mailto:U.Peters@dbu.de)

**EXPERIMENTELLE  
ANGEBOTE ZU  
,CHEMIE UND ENERGIE'  
IN SCHÜLERLABOREN –  
WAS IST ZU TUN?**





## Experimentelle Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren – Was ist zu tun?

Ein gemeinsames Ziel aller BetreiberInnen von chemisch orientierten Schülerlaboren ist es naturgemäß, chemische Experimente für Kinder und Jugendliche anzubieten, um das Interesse und Verständnis für Naturwissenschaften im Allgemeinen und die Chemie im Speziellen zu wecken und zu fördern. Schülerlabor ist jedoch nicht gleich Schülerlabor. Sie lassen sich in unterschiedliche Kategorien einteilen (s. Kap. 3.4, Hempelmann). Schon an dieser Einteilung lässt sich erkennen, dass die Motive für die Gründung und den Betrieb eines Schülerlabors sehr verschieden sein können. So kann ein Schülerlabor der Breitenförderung in Ergänzung des Schulunterrichts dienen oder auch mit der Ausbildung künftiger Chemielehrkräfte kombiniert sein. Viele universitäre Schülerlabore sind besonders an OberstufenschülerInnen mit naturwissenschaftlichen Leistungskursen interessiert. Auf diese Weise unterstützen sie die SchülerInnen bei der Berufsorientierung und verfolgen i.d.R. auch das Ziel, Nachwuchs für die eigenen einschlägigen Studienfächer zu gewinnen.

Die jeweilige Konzeption eines Schülerlabors spiegelt sich dann auch in seinem Angebot an Experimenten wider. So haben zwar 73% der Labore angegeben, Lehrpläne bei der Auswahl ihres Angebots zu berücksichtigen, aber immerhin 5% lassen sich laut eigener Aussage dabei ausschließlich von ihrer eigenen Expertise leiten, weitere 36% teilweise. Dies bedingt zwangsläufig eine gewisse Diversität des Angebots in den Schülerlaboren.

Lernpläne und Curricula hinken der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung immer etwas hinterher. Schülerlabore mit ihrer größeren Freiheit, ihren experimentellen Möglichkeiten und oft auch Forschungsnähe können flexibler auf solche Entwicklungen reagieren. Aber das vertiefte Verständnis der FachwissenschaftlerInnen kann auch den Blick auf Aspekte des Verständnisses lenken, die in die Konzeption von Schülerlaborexperimenten einfließen können. Ein intensiver Austausch und eine Zusammenarbeit zwischen Didaktik und Fachwissenschaft sind in jedem Fall wünschenswert, um einzelnen Experimente und die dazu gehörigen Arbeitsmaterialien unter chemiedidaktischem Blickwinkel zu sichten sowie auch frühzeitig Anregungen aus



Abb. 1: Zielgruppenspektrum von Schülerlaboren (Quelle: LernortLabor)

der aktuellen Forschung in die Didaktik hineinzutragen.

Im Bereich der Chemiesdidaktik werden interessante Experimente zum Thema Energie und Chemie entwickelt, denen ein umfassendes didaktisches Konzept zugrunde liegt (s. Kap. 3.3, Oetken). Mit den Schülerlaboren als Mittler können diese vielleicht die Schülerinnen und Schüler schneller erreichen. Die oft mit geringen Ressourcen und ohne Planstellen betriebenen Schülerlabore würden davon auch profitieren. Dabei können alle Altersstufen und Schulformen fachdidaktisch angemessen berücksichtigt werden. Gleichzeitig kann so sichergestellt werden, dass das zu vermittelnde Wissen fachwissenschaftlich aktuell ist.

Man könnte darüber nachdenken, eine Art Qualitätskontrolle einzurichten, ähnlich dem peer review in der Wissenschaft, und vielleicht auch eine einheitliche professionelle Aufbereitung für Schülerlaborexperimente zu organisieren – z.B. unter dem Dach von Lernort Labor –, damit mehr Experimente einschließlich fachlicher Hintergrundinformationen und eines didaktischen Kontexts auf einem gesicherten Niveau der Allgemeinheit oder der Community zur Verfügung gestellt werden. Schülerlabore unterstützen die Schulen durch experimentelle Angebote auch zu aktuellen Themen. Zusätzlich können durch das Ex-

perimentieren wichtige Fähigkeiten, sowohl praktische als auch kognitive, anders gefördert werden als im normalen Unterricht (s. Kap. 3.5, Schille). Dies kann im Idealfall sogar so weit gehen, dass SchülerInnen sich durch die praktische Beschäftigung mit einem Thema konkret angeregt fühlen, sich über das schulische Maß hinaus sehr engagiert weiter damit auseinander zu setzen.

Die einzelnen Fachgebiete wurden in den Einschätzungen der Fachwissenschaftler eingehend beleuchtet, die Schwerpunkte und aktuellen Entwicklungen benannt. Dabei ist es Schülerlaboren sicher nicht möglich, immer mit dem aktuellen Stand der Forschung gleichzuziehen. Grundlegende Techniken und elementare Prozesse und Phänomene sollten aber experimentell nachvollziehbar sein.

Eine für die Energiewende wichtige Technologie ist die Photovoltaik. Grundlage hierfür sind die elementaren Prozesse bei der Umwandlung von Licht in andere Energieformen. Dies betrifft nicht nur die Photovoltaik, sondern alle Prozesse, bei denen Licht(energie) beteiligt ist, also auch photokatalytische Prozesse (s. Kap. 3.1, Tausch). Deswegen müssen entsprechende Experimente zur Verfügung stehen, mit denen SchülerInnen die Umwandlung von Licht in elektrische oder chemische Energie ergründen können.

Die Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie findet in Batterien und Brennstoffzellen statt. Grundlage hierfür sind Redoxsysteme. Gerade in diesem Themenbereich zeigt sich der Aspekt der Chemie besonders deutlich, denn sowohl Membranen, das Elektrodenmaterial als auch die Elektrolyte haben einen entscheidenden Einfluss auf die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit von Batterien und Brennstoffzellen. Hinzu kommt, dass mit mikrobiellen Brennstoffzellen auch eine für SchülerInnen häufig motivationssteigernde Brücke zu biologischen Prozessen geschlagen werden kann, die ja auch reich an Redoxreaktionen sind (s. Kap. 2.2, Krewer, Schröder).

Experimente, die Verfahren zur Gewinnung von Biokraftstoffen behandeln, stehen durchaus zur Verfügung. Sie beschränken sich jedoch überwiegend auf die erste Generation der Biokraftstoffe. Bei diesen Verfahren besteht die Konkurrenz von Tank und Teller, es ist ab-

zusehen, dass die Energiewende mit derart gewonnenen Biokraftstoffen nicht zu schaffen ist. Die Verfahren zur Gewinnung von Biokraftstoffen der zweiten Generation sind allerdings schwieriger auf Schülerlaborniveau umzusetzen (s. Kap. 2.1, Schüth).

Experimente unter Verwendung von Wasserstoff als Energieträger werden von vielen Schülerlaboren angeboten. Dabei ist die Problemstellung für die Verwendung von Wasserstoff nicht unerheblich. An dieser Stelle wäre für eine umfassende Betrachtung des Power-to-Gas-Konzepts zu thematisieren (siehe Kap. 2.3, Pütter), das die Umsetzung von Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu Methan beinhaltet. Vorteil dieses Verfahrens wäre, dass die bereits flächendeckend existierende Infrastruktur des Erdgasnetzes genutzt werden könnte. Hierzu gibt es bereits auch schülerlaborgeeignete Experimente (Rubner/Oetken, s. Lit. im Anhang (CD)).

Durch die Entwicklung ‚Intelligenter‘ Materialien bzw. Werkstoffe mit besonderen Funktionen trägt die Chemie in vielen Bereichen zur Senkung des Energiebedarfs bei. Hier tut sich noch ein weites Feld für die Entwicklung von Experimenten auf, an denen physikochemische Grundlagen gelernt und der Zusammenhang von Stoffeigenschaften zu energetischen Fragen hergestellt werden können (s. Kap. 2.5, Mischnick).

Im Spannungsfeld zwischen begrenzten Rohstoffquellen und dem fortwährenden Bedarf in der Technik, eben auch für die Energiewende, spielt die Chemie als Stoffwissenschaft eine große Rolle. Schon bei der Entwicklung von Materialien und Technologien müssen zukunftsfähige Konzepte hinsichtlich der beteiligten Stoffe - nicht nur aus dem Blickwinkel von Naturwissenschaft und Technik - geschaffen werden (s. Kap. 2.4, Reller). Die Stichworte reichen von Nachhaltigkeit, Stoffkreisläufen und Recycling bis hin zu Umweltbelastung, geopolitischen Aspekten der Ressourcensicherung und unzumutbaren Arbeitsbedingungen z.B. bei der Förderung der Seltenerdmetalle. Um die SchülerInnen in die Lage zu versetzen, das Potenzial regenerativer Energieträger für die Zukunft einschätzen zu können, sind folglich nicht nur die chemischen Parameter relevant, sondern auch Probleme, potentielle Risiken und letztlich auch Kosten. Eine fächerübergreifende Einbindung

des Energiethemas in der Schule drängt sich geradezu auf. Schülerlabore könnten hierzu neben faszinierenden Werkstoffen und Verfahren des Recyclings auch die Eigenschaften und Wirkweise von Hilfsstoffen wie z.B. beim umstrittenen Fracking behandeln. Dabei wird dann deutlich, wie facettenreich und kontrovers viele Themen sind. Zu einer umfassenden Betrachtung gehören auch ökonomische (z.B. Kosten für die Bereitstellung der benötigten Infrastruktur), ökologische (CO<sub>2</sub>-Problematik), politische (Ausstieg aus der Kernenergie) oder soziale (Konkurrenz von Tank und Teller) Aspekte. Eine ganzheitliche Betrachtung, wie sie im Rahmen der Bildung für nachhaltige Entwicklung erforderlich ist, muss in der Schule erfolgen. Dazu bedarf es für Themen zur Energie nicht nur wie bisher der Festlegung einheitlicher Bildungsstandards für den Fachunterricht, sondern auch fachübergreifender Bezüge (s. Kap. 3.2, Parchmann).

Eine enge Zusammenarbeit von Schulen und Schülerlaboren ist wünschenswert, damit die Inhalte miteinander verzahnt werden können. Die rein chemische oder technische Betrachtung von Prozessen ist nicht ausreichend. So ist z.B. die Herstellung von Methan aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff technisch möglich, schließlich steht bei Bremen mit einer Kapazität von 2000 t/a Methan die größte Anlage weltweit. Um diesen Prozess aber überhaupt sinnvoll betreiben zu können, ist viel Energie in Form von photovoltaisch oder mittels Windenergie - also CO<sub>2</sub>-frei - erzeugtem Strom erforderlich, und selbst dann ist die CO<sub>2</sub>-Menge, die auf diese Weise umgesetzt werden kann, viel zu gering, um einen nennenswerten Einfluss auf das Weltklima zu haben.

Die Zugänglichkeit von Experimentieranleitungen und Hintergrundinformationen könnte verbessert werden. LernortLabor bietet auf seiner Internetseite die Möglichkeit, nach

Schülerlaboren oder Themen zu suchen. Allerdings sind die Suchkategorien aufgrund der breiten Palette an Laboren, die dort registriert sind, nicht sehr feinmaschig. Auch die Robert-Bosch-Stiftung hat mit dem NaT-Working-Programm eine Internetplattform geschaffen, auf der Initiativen aus Naturwissenschaft und Technik vernetzt werden. Ein Problem ist jedoch die Aktualität der dort registrierten Informationen. Gerade bei einem hochaktuellen Thema wie ‚Chemie und Energie‘ ist das ein wichtiger Aspekt. Die Ergebnisse dieser Umfrage sind elektronisch erfasst. Damit besteht grundsätzlich die Option, die Inhalte zu erweitern und zu aktualisieren.

### Fazit

Welche Schlüsse lassen sich nun aus dieser Umfrage ziehen? Man kann mit einiger Berechtigung davon ausgehen, dass die erfassten Experimente in etwa die Vielfalt des Angebots von Schülerlaboren widerspiegeln. Auf Basis dieser Annahme findet man thematisch eine Konzentration in den Bereichen Photovoltaik, Brennstoffzellen und alternative Treibstoffe und damit auch bei der Wasserstofftechnologie. Mit Blick auf das Alter der Zielgruppen wurden – entsprechend dem Zielgruppenspektrum von Schülerlaboren allgemein (Abb. 1) – bevorzugt Oberstufen- gefolgt von MittelstufenschülerInnen genannt,



jedoch kaum Angebote für die Klassenstufen 1 - 6. Hier sind also kreative und originelle Ideen gefragt, wie man Kindern, an Alltagserfahrungen anknüpfend, wesentliche Phänomene des Zusammenspiels von stofflichen Eigenschaften sowie Veränderungen mit Energie vermitteln kann. Denn gerade in einem Alter, in dem die Kinder offen für Neues sind und die geschlechterspezifische Prägung noch nicht voll ausgebildet ist, werden vergleichsweise unbefangene und intuitiv Zusammenhänge verinnerlicht und ein ‚Feuer entzündet‘ für eine ‚längerfristig wärmende Beziehung‘ zu dem Thema.

Der Bereich der Materialien erscheint noch als ein weitestgehend weißer Fleck auf der Landkarte der Schülerlaborexperimente. Interdisziplinäre Ansätze bieten sich an. Chemie und Physik liegen in den Materialwissenschaften immer dicht beieinander und auch die Ingenieurwissenschaften sind betroffen. Auch wenn diese Studie auf die chemischen Aspekte konzentriert ist, so soll die wichtige Rolle anderer Disziplinen nicht aus dem Blick geraten. Sie bietet vielversprechende Ansätze für eine Kooperationen von Schülerlaboren unterschiedlicher fachlicher Ausrichtung, wie sie in den multidisziplinären möglicherweise schon verwirklicht ist. Eine Kooperation mit Technikwissenschaften lässt eine Stärkung des Anwendungs- bzw. Alltagsbezugs erwarten, sicher eine wertvolle Perspektive.

Welche Rolle spielen nun die Schülerlabore für die Schulen, für den Chemieunterricht? - Das Potenzial der Schülerlabore, gesellschaftspolitisch wichtige technologische Entwicklungen frühzeitig aufzugreifen und in Experimente umzusetzen, wie es gerade das Thema ‚Energie‘ erfordert, ist vorhanden. Dadurch könnten sie den naturwissenschaftlichen Unterricht in der Schule nicht nur technisch unterstützen, sondern inhaltlich bereichern. Der handwerkliche Aspekt des in Schülerlaboren im Mittelpunkt stehenden Experimentierens bietet Schülerinnen und Schülern aller Altersgruppen und Schultypen einen anderen Zugang als eine theorie-lastige Vermittlung.

Die Schülerlabore sind in den letzten 10 Jahren zu einer festen Größe geworden und haben einen gewissen Standard und Organisationsgrad erreicht. Ihre Zahl hat sich nach jahrelangem Anstieg bei ca. 300 verstetigt – sie

waren also kein Strohfeuer, sondern präsentieren eine nachhaltige Entwicklung (Abb.2). Es erscheint an der Zeit, die Zusammenarbeit mit Schulen nicht allein der individuellen Initiative von Lehrkräften zu überlassen, sondern Schülerlaborbesuche in Lehrplänen zu verankern, im Gegenzug aber auch die Weiterentwicklung zu einem qualitativ gesicherten und flächendeckenden Angebot seitens der Kultus- und Wissenschaftsministerien zu unterstützen. Durch stärkere Zusammenarbeit von Fachwissenschaft, Didaktik, Schülerlaboren und Schulen kann die Qualität, Breite und Wirksamkeit von Schülerlaborangeboten gesteigert werden. Aber auch Organisation und Pflege eines solchen Austauschs brauchen Energie, u.a. in Form personeller Ressourcen. Die Wirkung könnte nachhaltig, der Wirkungsgrad hoch sein.



**Dr. Ilka Deusing-Gottschalk**

*Technische Universität Braunschweig  
Agnes-Pockels-SchülerInnenlabor  
Schleinitzstr. 20, 38106 Braunschweig  
i.deusing-gottschalk@tu-bs.de*



**Prof. Dr. Petra Mischnick**

*Technische Universität Braunschweig  
Institut für Lebensmittelchemie /  
Agnes-Pockels-SchülerInnenlabor  
Schleinitzstr. 20, 38106 Braunschweig  
p.mischnick@tu-bs.de*

A large, bold, lime-green number '6' is positioned on the right side of the page. The number is partially overlaid by a vertical rectangular bar of the same color that extends from the top to the bottom of the page. The '6' is centered vertically within the white space on the left of the bar.

**DANK**



## Wir danken

- der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt, DBU**, für die finanzielle Förderung dieses Projektes sowie für die gute Zusammenarbeit
- der **Gesellschaft Deutscher Chemiker, GDCh**, für das Interesse an diesem Projekt sowie die Unterstützung in Form eines Druckkostenzuschusses
- **Lernort Labor e.V.**, dem Bundesverband der Schülerlabore e.V., insbesondere dem Geschäftsführer **Dr. Olaf Haupt** für die Mitwirkung bei der Durchführung des Projekts
- den **AutorInnen**, die mit ihren Beiträgen zum Gelingen dieser Broschüre beigetragen haben
- ebenso den **ReferentInnen** der Abschlusstagung für ihre Bereitschaft, das Programm mit zu gestalten
- ganz herzlich **Kristiena Matis**, die viele technische Probleme im Verlauf der Projektdurchführung lösen konnte, für ihre Mitarbeit
- ganz besonders den **Schülerlaboren**, die durch ihr Feedback an der Gestaltung des Fragebogens mitgewirkt und allen, die sich an der Umfrage beteiligt haben, für ihre Zeit und ihre Informationen

## Ohne Ihren Beitrag hätte dieses Projekt nicht verwirklicht werden können!

- *Akademie junger Forscher, experimenta gGmbH;* [www.experimenta-heilbronn.de](http://www.experimenta-heilbronn.de)
- *Biotechnologisches Schülerlabor Braunschweig - BioS;* [bios-braunschweig.de](http://bios-braunschweig.de)
- *C#NaT Bayreuth;* <http://didaktikchemie.uni-bayreuth.de/de/teachers/06besuche/index.html>
- *Chemie in der Mikrowelle;* [www.chf.de](http://www.chf.de)
- *Chemie-Labothek;* <http://www.chemiedidaktik.uni-wuppertal.de/labothek/index.html>
- *CHEMOL-Chemie in Oldenburg;* <http://www.chemol.uni-oldenburg.de/>
- *Curie-AG*
- *DLR\_School\_Lab Berlin;* <http://www.dlr.de/schoollab/berlin>
- *DLR\_School\_Lab TU Dortmund;* [www.tu-dortmund.de/schoollab/](http://www.tu-dortmund.de/schoollab/); [www.dlr.de/schoollab/tu-dortmund](http://www.dlr.de/schoollab/tu-dortmund)
- *ELAN (Experimental Labor Adlershof für Naturwissenschaften);* <http://www.tiemann-education.de/>; <http://plone.chemie.hu-berlin.de/forschung/elan/>
- *EnergyLab - Schülerlabor im Wissenschaftspark Gelsenkirchen bzw. zdi-Netzwerk Gelsenkirchen;* [www.energylab-gelsenkirchen.de/](http://www.energylab-gelsenkirchen.de/); [www.zdi-gelsenkirchen.de](http://www.zdi-gelsenkirchen.de)
- *Fehling-Lab-Schülerlabor;* [www.fehling-lab.de](http://www.fehling-lab.de)
- *FreiEx-Schülerlabor;* <http://www.freix.uni-bremen.de/>; <http://www.nachhaltigkeit-schuelerlabor.de/>
- *Helmholtz-Zentrum Geesthacht - Schülerlabor Quantensprung;* [schuelerlabor.hzg.de](http://schuelerlabor.hzg.de)
- *IPN;* <http://www.forschungs-werkstatt.de/>
- *Kepler-Seminar für Naturwissenschaften Stuttgart;* <http://kepler-seminar.heidehof-stiftung.de>
- *Kinderlabor Brunsbüttel;* [www.lernort-labor.de](http://www.lernort-labor.de)

## DANK

- *MariSchool*; [www.marischool.de](http://www.marischool.de)
- *NanoBioLab*; [www.nanobiolab.de](http://www.nanobiolab.de)
- *Naturwissenschaftlich-Technisches Kinder- und Jugendzentrum NATZ e. V.*; [www.natz-hoy.de](http://www.natz-hoy.de)
- *OpenLab Wels*; [www.openlab.at](http://www.openlab.at)
- *Projektbüro Biotechnologie der Bezirksregierung Arnsberg*; [www.probiochem.de](http://www.probiochem.de)
- *Sächsische Umweltakademie der URANIA e.V.*; [www.sua-urania.de](http://www.sua-urania.de)
- *Schülerforschungszentrum TheoPrax*; [www.theo-prax.de](http://www.theo-prax.de)
- *Schülerlabor ABI Lab*; [www.tgz-chemie.de](http://www.tgz-chemie.de)
- *Schülerlabor Chemie - Institut für Physikalische und Theoretische Chemie TU Braunschweig*; <https://www.tu-braunschweig.de/pci/service/schuelerlabor>
- *Schullabor an der Hochschule Bremerhaven*; [www.hs-bremerhaven.de](http://www.hs-bremerhaven.de)
- *Science meets School - Werkstoffe & Technologien in Freiberg*; [www.schuelerlabor.tu-freiberg.de](http://www.schuelerlabor.tu-freiberg.de)
- *Science-Forum*; [www.science-forum.de](http://www.science-forum.de)
- *SKZ Lab*; [www.skz.de/skzLab](http://www.skz.de/skzLab)
- *SPURT-Labor Universität Rostock*; <http://www.kickmetoscience.uni-rostock.de/>
- *Swiss Science Center Technorama*; [www.technorama.ch](http://www.technorama.ch)
- *Teutolab*; <http://www.uni-bielefeld.de/teutolab/>
- *TU Clausthal - Superlab*; <http://www.we.tu-clausthal.de/schuelerlabore/organische-chemie/>
- *TU Clausthal - Flying Circus*; <http://www.we.tu-clausthal.de/flying-science-circus/>
- *Unex Cottbus - Schülerlabor des College der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus*; <http://www.tu-cottbus.de/unex>
- *Virchowlab und Rudis Forschercamp*; <http://www.rudolf-virchow-zentrum.de/nachwuchsfoerderung/virchow-schuelerlabor.html>
- *Weserrenaissance-Museum Schloss Brake*; [www.wrm.lemgo.de](http://www.wrm.lemgo.de)
- *Wiesbadener Experimentierwerkstatt*; [www.experimentierwerkstatt.com](http://www.experimentierwerkstatt.com)
- *XLAB*; [www.XLAB-goettingen.de](http://www.XLAB-goettingen.de)
- *zdi MINT IN MIND - Schülerlabor der Fachhochschule Köln*; [http://www.fh-koeln.de/studium/schuelerlabor\\_185.php](http://www.fh-koeln.de/studium/schuelerlabor_185.php)
- *zdi-Schülerinnen- und Schülerlabor experiMINT*; <http://www.fh-bielefeld.de/schuelerlabor>
- *zdi-Schülerlabor der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg*; <http://gleichstellung.h-brs.de/Schuelerlabor.html>





## Systemanforderungen

CD-ROM Laufwerk, Web-Browser, Internetzugang für externe Links, Microsoft Excel (Um alle Funktionen nutzen zu können, müssen unter dem Punkt „Makrosicherheit“ Makros zugelassen werden. Dazu müssen gegebenenfalls die Entwicklertools aktiviert werden.)

---

Auf der CD befindet sich:

1. Experimentelle Angebote zu ‚Chemie und Energie‘ in Schülerlaboren – Was gibt es?
2. Der Fragebogen in der Form, wie er den Schülerlaboren zugegangen ist.
3. Eine tabellarische Zusammenstellung mit sämtlichen im Rahmen der Umfrage erfassten Experimenten und den dazu gehörigen Informationen.

Im Einzelnen wurden folgende Informationen erfasst:

- Bezeichnung des Experiments
- Themenfeld (Die Zuordnung der einzelnen Experimente zu den Themenfeldern erfolgte durch das jeweilige Schülerlabor.)
- Klassenstufe(n), an die sich das Experiment richtet
- Link zum Versuch oder zusätzliche Informationen nach Angabe des jeweiligen Schülerlabors
- Name, Sitz und Adresse der Homepage des jeweiligen Schülerlabors
- Verweis auf ein- oder weiterführende Literatur zur Thematik (diese Angaben stammen überwiegend aus der Eingangsforschung in chemiedidaktischen Fachzeitschriften und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit)

