



FCI  
FONDS DER  
CHEMISCHEN  
INDUSTRIE



Unterrichtsmaterial

## Innovationen in der Chemie

Materialien, Wirkstoffe und Verfahren für unsere Zukunft

Die CD-ROM enthält Arbeitsmaterialien zum Einsatz im Unterricht. Zudem sind die Abbildungen und dieses Textheft hinterlegt.

Zur Anwendung der CD-ROM: Sie müssen nicht online sein, sondern lediglich Ihren Browser aktivieren (optimiert für html5-kompatible Browser). Starten Sie die CD-ROM im Laufwerk durch Doppelklick auf START.html.

Alle auf der CD-ROM hinterlegten Materialien stellen wir auch online unter [www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/](http://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/) zur Verfügung.

|   | Seite |
|---|-------|
| Vorwort                                       | 4     |
| Didaktische Grundlagen                        | 6     |
| Einordnung in die Lehrpläne                   | 7     |
| <b>1.</b> Innovationen und Chemie             | 8     |
| <b>2.</b> Werkstoff- und Wirkstoffforschung   | 16    |
| <b>3.</b> Verfahrens- und Prozessinnovationen | 22    |
| <b>4.</b> Gesundheit                          | 28    |
| <b>5.</b> Energie                             | 36    |
| <b>6.</b> Mobilität                           | 44    |
| <b>7.</b> Bauwesen                            | 50    |
| <b>8.</b> Ressourcenschonung                  | 54    |
| Glossar                                       | 60    |
| Websites und Literatur                        | 62    |
| Impressum und Bildnachweise                   | 63    |

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im gesamten Textheft das generische Maskulinum gewählt.

Im Glossar können die mit \* markierten Begriffe nachgeschlagen werden.

## Vorwort

Innovationen sind der Motor unserer modernen Industriegesellschaft. Gestern wie heute sichern sie Wachstum, Wettbewerbsfähigkeit und Wohlstand.

Mehr noch: Angesichts des globalen Klimawandels und des weltweiten Bevölkerungswachstums sind sie der Schlüssel, um den Ausstoß klimaschädlicher Gase zu verringern, endliche Ressourcen zu schonen sowie Gesundheitsversorgung, Ernährung und Lebensqualität für alle Menschen zu sichern. Denn nachhaltige Entwicklung ist das Gebot der Stunde.

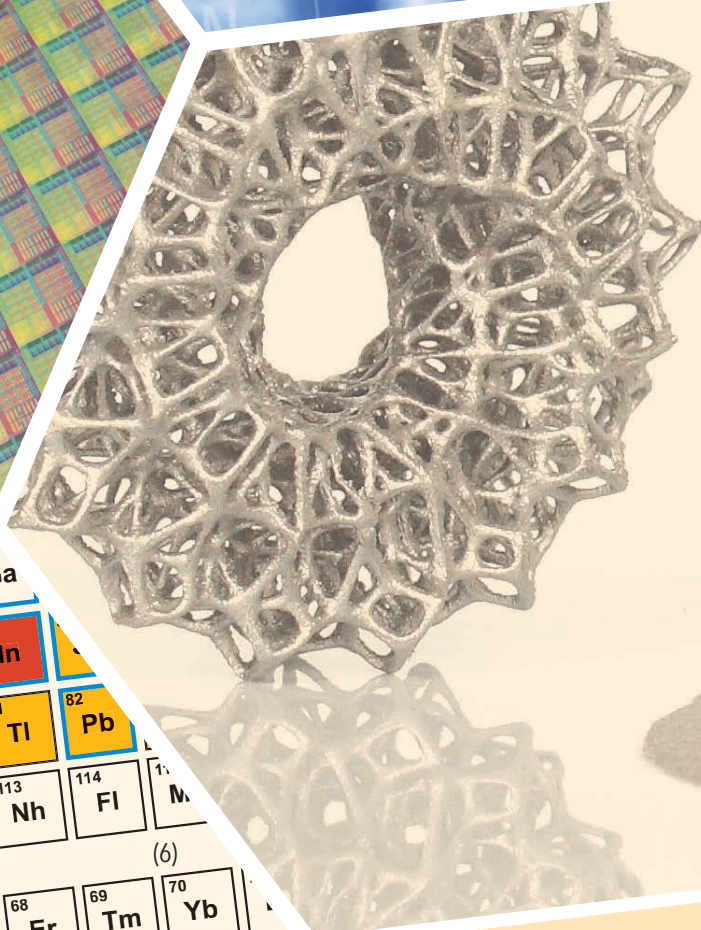
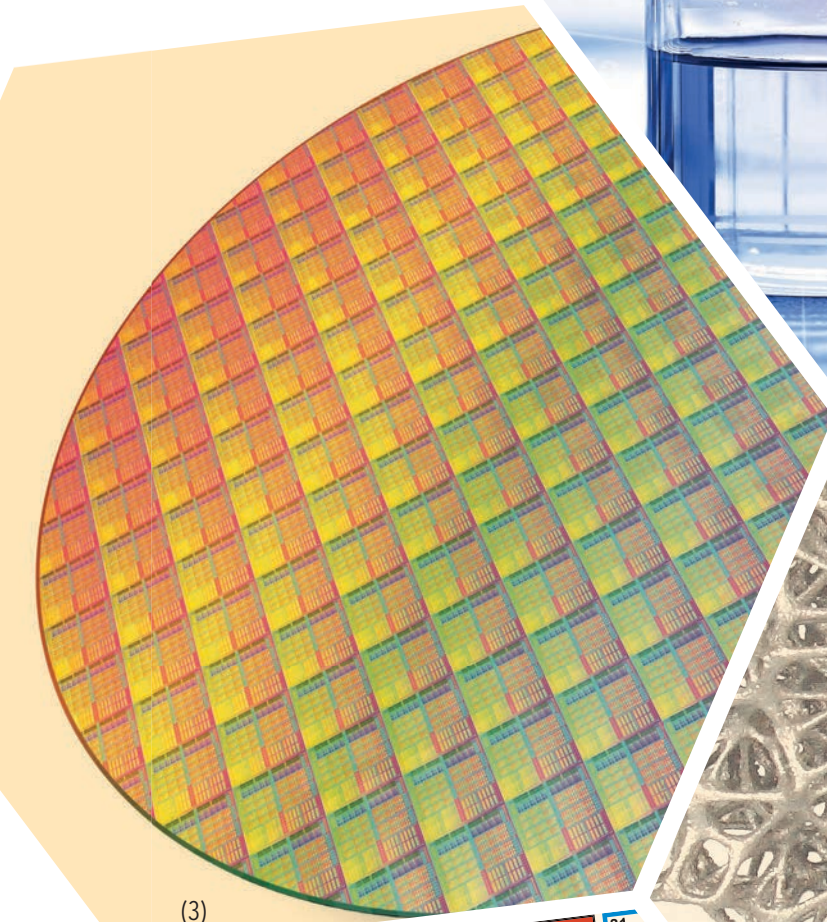
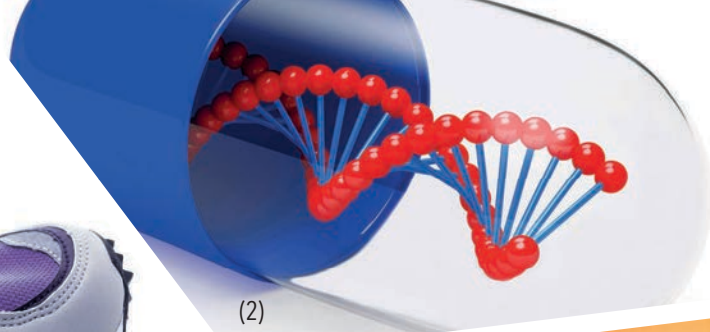
Neue Materialien, Ideen und das Anwendungs-Know-how der chemischen Industrie werden in vielen anderen Wirtschaftszweigen benötigt. Innovationen aus der Chemie ermöglichen neue oder leistungsfähigere Produkte. Ein Vorsprung, der einen entscheidenden Vorteil im Wettbewerb auf den globalen Märkten bedeutet. Jedes fünfte Patent mit branchenübergreifender Bedeutung steuert die Chemie bei – von der Pharmazie über den Mobilitätsbereich bis hin zum Bauwesen und dem Energiesektor.

Das Innovationsgeschehen ist untrennbar mit exzellenter Forschung und Entwicklung (F&E) verknüpft. Knapp zehn Prozent aller Chemiemitarbeiter in Deutschland arbeiten daran, neue Produkte zu erforschen und zu entwickeln. Knapp elf Milliarden Euro investiert die chemisch-pharmazeutische Industrie in Forschung und Entwicklung (Stand 2017). Das entspricht 15 Prozent der Aufwendungen der gesamten deutschen Industrie in diesem Bereich und dem dritthöchsten Wert nach der Automobil- und der Elektroindustrie. Im weltweiten Vergleich gehört Deutschland damit zu den führenden Chemieforschungsnationen.

Um diesen Erfolgskurs halten zu können, darf ein ganz wichtiger Faktor nicht fehlen: Bildung. Eine moderne Bildung, die Chemie als das vermittelt, was sie ist: faszinierend, intellektuell fordernd, sich selbst immer wieder erneuernd, nachhaltig und zukunftsweisend. Eben innovativ.

[www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/  
unterrichtsmaterialien/](http://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/)





(6)

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 25  | 26  | 27  | 28  | 29  | 30  | 31  |     |     |     |    |
| Mn  | Fe  | Co  | Ni  | Cu  | Zn  | Ga  |     |     |     |    |
| 43  | 44  | 45  | 46  | 47  | 48  | 49  |     |     |     |    |
| Mo  | Tc  | Ru  | Rh  | Pd  | Ag  | Cd  | In  |     |     |    |
| 74  | 75  | 76  | 77  | 78  | 79  | 80  | 81  | 82  |     |    |
| W   | Re  | Os  | Ir  | Pt  | Au  | Hg  | Tl  | Pb  |     |    |
| 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 |    |
| Db  | Sg  | Bh  | Hs  | Mt  | Ds  | Rg  | Cn  | Nh  | Fl  | Mc |
| 60  | 61  | 62  | 63  | 64  | 65  | 66  | 67  | 68  | 69  | 70 |
| Nd  | Pm  | Sm  | Eu  | Gd  | Tb  | Dy  | Ho  | Er  | Tm  | Yb |
| 99  | 100 | 101 | 102 | 103 |     |     |     |     |     |    |
| Uu  | Uu  | Uu  | Uu  | Uu  |     |     |     |     |     |    |

## Didaktische Grundlagen

Es liegt in der Natur der Sache, dass Lehrpläne für den naturwissenschaftlichen Unterricht aktuellen Innovationen in den naturwissenschaftlich-technischen Wissenschaftsdisziplinen immer nur verspätet gerecht werden können. Das ist ein Grund dafür, dass in aktuellen Lehrplänen verstärkt Wert auf die Formulierung von Kompetenzziele gelegt wird und weniger auf die Angabe konkreter Lehrinhalte. Das kommt naturwissenschaftlichen Disziplinen sehr entgegen, entwickeln sie sich doch seit Jahrzehnten sehr stürmisch, und zwar sowohl in der Grundlagenforschung als auch bei der Übertragung und Anwendung dieses Wissens in die Praxis und in den Alltag.

In unserem Leben ist Chemie allgegenwärtig: Die biologischen Funktionen unseres Körpers beruhen auf chemischen Reaktionen, und wir sind von chemischen Stoffen und Produkten umgeben, deren Nutzung für uns alltäglich und selbstverständlich ist. Chemisches Wissen trägt also maßgeblich zur Erklärung der unbelebten und der belebten Natur bei und erlaubt eine gezielte Vorgehensweise bei der Entwicklung neuer Verfahren und Produkte.

Chemische Forschung ist stets auch im historischen Kontext zu betrachten. Deren Ergebnisse wurden zum Wohle der Menschheit und der Umwelt eingesetzt. Sie haben aber auch Schäden verursacht und an vielen Stellen zu Belastungen unserer Umwelt geführt. Dadurch wird deutlich, dass die Chemie auch ethischen Ansprüchen gerecht werden muss. Denn auch Innovationen stehen immer auf dem Prüfstand – schon bei der Entwicklung und Erprobung und auch im Bereich der Anwendung.

Die Folgen menschlichen Handelns für die Umwelt bei der Herstellung von Stoffen müssen immer kritisch im Sinne einer Bildung für nachhaltige Entwicklung reflektiert werden.

Insofern erlaubt das Aufgreifen neuer Entwicklungen und Produkte der Chemie im Unterricht, die Kompetenzbereiche Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung mit modernen Inhalten zu verknüpfen und den Lernenden erste Vorstellungen von einem Beruf in der chemischen Forschung und Entwicklung zu vermitteln.

Das Unterrichtsmaterial ermöglicht einen Einblick in den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik und erlaubt die Bewertung von Aussagen in Medien über naturwissenschaftliche Zusammenhänge. Sowohl bei der Erarbeitung von fachlichen Inhalten als auch bei der Präsentation von Arbeitsergebnissen können die Schüler auf die verschiedensten Medien zurückgreifen; sie üben so den Umgang damit und stärken ihre Präsentationskompetenz. In ihrer Rolle als Verbraucher werden sie zusätzlich in ihrer Bewertungskompetenz geschult und können so ein verantwortungsvolles Konsumverhalten entwickeln.

Das Unterrichtsmaterial enthält Lehrstoff für die Fächer Chemie, Physik und Biologie an Gymnasien, Realschulen und berufsbildenden Schulen. Die Kapitel stellen frei wählbare und in sich geschlossene Themenmodule für die Unterrichtsgestaltung dar.

Am Ende jedes Kapitels finden Sie als Grundlage für den Unterricht, für Referate oder Facharbeiten verschiedene Arbeitsmaterialien, die die Themen des jeweiligen Kapitels ergänzen und erweitern. Alle Einheiten dieses Texthefts bieten wir auf der Internetseite [www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/](http://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/) zum Lesen und Herunterladen an.

## Einordnung in die Lehrpläne

### 1. Innovation und Chemie

---

#### Metaebene „Erkenntnisgewinnung“

Verknüpfungen zwischen ökonomischen, ökologischen, sozialen und kulturellen Entwicklungen und Erkenntnissen der Chemie.

Diskussion und Bewertung gesellschaftsrelevanter Aussagen aus unterschiedlichen Perspektiven.

#### Metaebene „Bewertung“

Entwicklung aktueller, lebensweltbezogener Fragestellungen, die unter Nutzung fachwissenschaftlicher Erkenntnisse der Chemie beantwortet werden können.

### 2. Werkstoff- und Wirkstoffforschung / Verfahrens- und Prozessinnovationen / Gesundheit / Energie / Mobilität / Bauwesen / Ressourcenschonung

---

#### Metaebene „Fachwissen“

Im Rahmen der in diesem Heft thematisierten Innovationen werden für die Chemie die Basiskonzepte „Stoff-Teilchen“, „Struktur-Eigenschaft“, „Chemische Reaktion“ und „Energie“ gleichermaßen angesprochen. Schwerpunkte sind je nach Ausführlichkeit der Behandlung einzelner Themen sowie den jeweiligen Voraussetzungen in der Lerngruppe setzbar.

Aus biologischer Perspektive stehen die Beeinflussung lebendiger Systeme (Biosysteme) mit der einhergehenden Stoff- und Energieumwandlung, Steuerung und Regelung, Informationsverarbeitung, Bewegung sowie die Ausprägung und die Weitergabe genetischer Informationen im Vordergrund.

Physikalisch-fachliche Kompetenzen können in allen vier relevanten Bereichen der Schulphysik angebahnt werden: Materie, Wechselwirkung, System und Energie. An verschiedenen Stellen wird es darauf ankommen, Grundprinzipien und Größenordnungen zu erkennen und zu lernen. Die Kenntnis von Messvorschriften, Naturkonstanten und einfacher physikalischer Gesetze zur Lösung von Aufgaben und Problemen in verschiedenen Kontexten schulen das Fachwissen an interessanten Lerngegenständen.

#### Metaebene „Erkenntnisgewinnung“

In allen naturwissenschaftlichen Schuldisziplinen geht es um die Nutzung geeigneter Modelle, um naturwissenschaftliche Fragen zu bearbeiten. Dazu ist es häufig

notwendig, Daten, Trends, Strukturen oder Beziehungen zu recherchieren, um daraus (ggf. unter Anwendung einfacher mathematischer Operationen) geeignete Schlussfolgerungen zu ziehen. Die Themen liefern hierfür vielfältige Anknüpfungspunkte.

Hypothesengeleitetes Experimentieren, Modellbildung und kriterienbezogenes Vergleichen bzw. kritisches Reflektieren sind ebenfalls für alle Disziplinen gleichermaßen Kompetenzen, die in ausgewählten Zusammenhängen angesteuert werden sollen. Die Arbeitsblätter und Anregungen für Experimente liefern die Grundlagen dazu.

#### Metaebene „Bewertung“

Im Mittelpunkt der Schulung von Bewertungskompetenzen stehen der Vergleich und die Abwägung von Innovationen hinsichtlich ihrer Umsetzung unter Berücksichtigung naturwissenschaftlicher, ökonomischer, sozialer und ökologischer Aspekte. Dies spielt bei allen dargestellten Themen eine bedeutende Rolle. Ziel ist es, die fachlichen Sachverhalte in den öffentlich diskutierten Problemzusammenhängen zu erkennen und auf der Basis eines angemessenen Fachwissens zu bewerten. Darüber hinaus sollte die Einschätzung auch die eigene Lebensplanung erleichtern, zum Beispiel was die Berufswahl oder das soziale und ökologische Engagement betrifft.

## 1. Innovationen und Chemie: Untrennbar miteinander verbunden

Klimawandel, Umweltverschmutzung, Energiewende, Ressourcenschonung, alternde Gesellschaft – wir stehen heute vor großen Herausforderungen, die wir gemeinsam meistern müssen. Mit Hilfe der Chemie, verwandter Naturwissenschaften und neuer Technologien können wir tragfähige Lösungen für die Zukunft erarbeiten.

Gute Ideen sind der erste wichtige Schritt in diese Richtung. Allerdings müssen Ideen mittels weitsichtiger Planung und hochgradig strukturierter Abläufe erst in Produkte, Verfahren und Dienstleistungen umgesetzt werden, damit aus ihnen Innovationen entstehen können.

Die Chemie war schon immer der Motor für stoffliche Neuentwicklungen in allen bedeutenden Industriebranchen, von der Kunststoffherstellung bis zur Pharmaproduktion. Die Unternehmen der chemischen Industrie in Deutschland verpflichten sich dabei dem Leitbild der nachhaltigen Entwicklung, damit ihre Innovationen sowohl ökonomisch als auch ökologisch und sozial höchsten Ansprüchen genügen.

### Was ist eine Innovation?

Der deutsche Chemiker und Träger des Bundesverdienstkreuzes Prof. Dr. Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger hat einmal gesagt: „Innovation ist, wenn man trotzdem weitermacht.“

Diese Aussage enthält mehr Praxisbezug, als man zunächst vermutet. Entdeckungen und Erfindungen haben die Geschichte der Chemie seit der Antike geprägt. Aber längst nicht jeder Erfindung gelang der Durchbruch.

Denn: Eine Idee bzw. eine Erfindung wird erst dann zur Innovation, wenn sie erfolgreich in Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen umgesetzt wird, die den Markt durchdringen.

Innovation ist also als Prozess zu verstehen, in dessen Verlauf eine Erfindung verschiedene Stationen durchläuft. Der Prozess erstreckt sich von der Identifikation und Analyse eines Problems über Ideensuche und -bewertung, Forschung, Entwicklung und Konstruktion, Produktions- und Absatzvorbereitung bis zur Markteinführung. In innovativen Unternehmen wird die

Innovation nicht dem Zufall überlassen, sondern durch entsprechende Strukturen vorangetrieben. Dazu gehören zum Beispiel Forschung und Entwicklung (F&E), betriebliche Organisationsforschung, Marketing, strategisches Management, Ökologie und Ökonomie.

Allerdings zeigt die Erfahrung, dass Entdeckungen und Erfindungen und ihre möglichen Konsequenzen auch erkannt werden müssen. Der Immunbiologe Gerhard Uhlenbruck merkt dazu an: „Das Problem des Entdeckens liegt im Entdecken des Problems.“

### Beispiel

#### Innovationen, die es schwer hatten: Nicht jeder Geistesblitz führt auch ins Rampenlicht

Mitte des 19. Jahrhunderts experimentierte der deutsche Uhrmacher Heinrich Goebel mit der Herstellung einer elektrischen Lichtquelle. Den richtigen Glühfaden fand er in Form einer verkohlten Bambusfaser. 1854 gelang es ihm erstmals, eine gebrauchsfertige Glühlampe herzustellen. Damit ist er auch ganz offiziell ihr Erfinder – und nicht Thomas Alva Edison.

Letzterer soll, um seine Glühlampe funktionsfähig zu machen, mehr als 2.000 verschiedene Materialien als Glühfaden getestet haben. Dazu ist folgende Äußerung überliefert: „Ich habe nicht versagt. Ich habe mit Erfolg zehntausend Wege entdeckt, die zu keinem Ergebnis führen.“

Erst 1879 brachte er mit einer verkohlten Baumwollfaser als Glühfaden seine Lampe für 40 Stunden am Stück zum Leuchten.

Edison tat aber etwas sehr Entscheidendes, das Goebel versäumt hatte: Er meldete das Patent\* auf die Glühlampe an, ebnete so den Weg für deren Kommerzialisierung und versorgte als erster die Stadt New York mit elektrischem Licht.

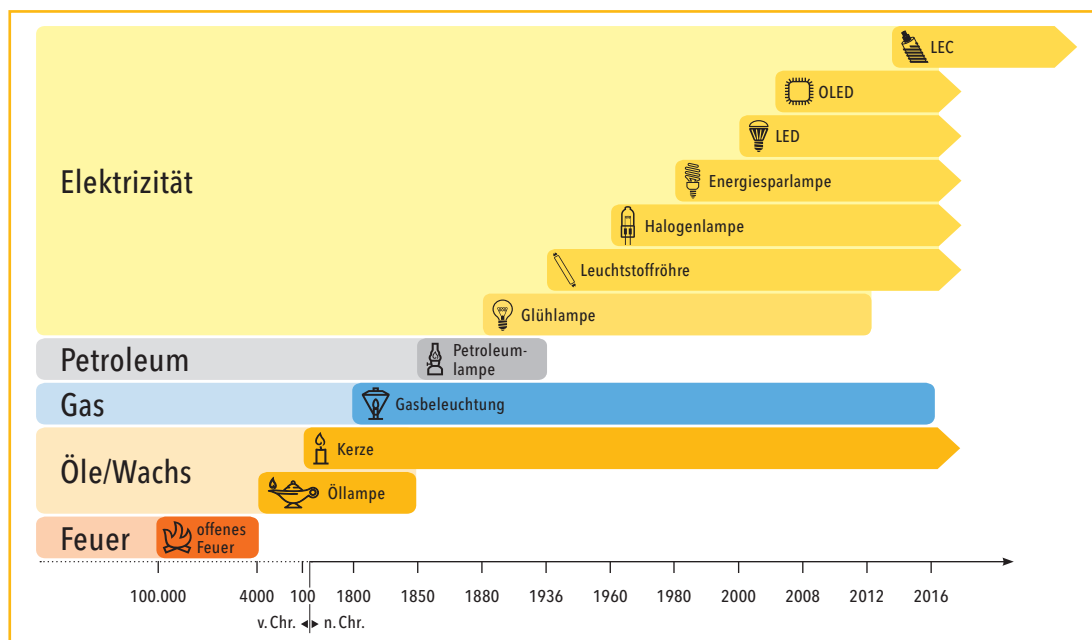
### Innovation im Wandel der Zeit

Die Glühlampe ist außerdem ein gutes Beispiel dafür, dass Innovationen immer nur für begrenzte Zeit Bestand haben. Sobald sie weitverbreitet sind, werden sie früher oder später von Nachahmerprodukten oder verbesserten Entwicklungen verdrängt.

Heute wird die Glühlampe wegen ihrer geringen Energieeffizienz zunehmend durch Leuchtdioden (LEDs) und organische Leuchtdioden (OLEDs) abgelöst (siehe Abbildung 1).

#### ABBILDUNG 1

Leuchtmittelentwicklung von der Kerze bis zu leuchtenden elektrochemischen Zellen (LECs)



#### HINWEIS

### Lichtquellen von morgen

#### Organische Leuchtdioden (OLEDs)

OLEDs basieren auf Licht emittierenden, organischen Halbleitermaterialien\* (kleine Moleküle und Polymere). Sie finden bereits in flächigen Leuchtmitteln und in verschiedensten Displays Anwendung. OLEDs zeichnen sich durch Energieeffizienz, hohe Farbbrillanz und Blickwinkelunabhängigkeit aus.

#### Leuchtende elektrochemische Zellen (LECs)

Einige Jahre nach den OLEDs wurden die LECs entwickelt. Deren optisch aktive Schichten sind im Gegensatz zu jenen der OLEDs mit mobilen Ionen durchsetzt. 2015 gelang es Forschern erstmals, LECs in Form sehr dünner leuchtender Fasern zu verarbeiten. Diese sind so robust, dass man sie in Kleidungsstücken verweben kann. Als innerer Träger und Kathode dient dabei ein Zinkoxid-beschichteter Stahldraht. Der darauf aufgebrachte Leuchtstoff wird mit einem dünnen, transparenten Band aus parallelen Kohlenstoffnanoröhren als Anode spiralg umwickelt.

## Chemie – Triebfeder für Innovationen

Ohne Frage traten im Lauf der Geschichte viele Innovationen aus der Chemie rein zufällig auf den Plan. Man hat eine neue Substanz entdeckt, ihre Eigenschaften untersucht und geschlussfolgert, wo und wie sie am besten eingesetzt werden kann. Die daraus entstandenen Produkte wurden dann im Laufe der Zeit verbessert. Mehrheitlich entstehen Innovationen aber auf sehr komplexe und planvolle Weise und werden heutzutage vor allem als Lösungen für die großen Herausforderungen der Menschheit gesehen. Hierzu einige Beispiele:

### Klimaschutz

Dass der Klimawandel nach aktuellem Kenntnisstand mit allergrößter Wahrscheinlichkeit menschengemacht ist, heißt auch, dass der Mensch diese Entwicklung (noch) gegensteuern kann. Die Vermeidung des Ausstoßes von klimaschädlichen Gasen – allen voran Kohlenstoffdioxid – beginnt bei der Energiegewinnung, setzt sich über die industrielle Produktion fort und reicht bis in die Mobilität hinein. Ein Job für innovative chemische Prozesse und neuartige Materialien!

### Schutz von Mensch und Umwelt

Um die Anreicherung schädlicher Stoffe in Böden und Gewässern zu vermeiden, müssen die Produkte der Zukunft nach Möglichkeit kreislauffähig sein. Das senkt nicht nur die Umweltbelastung, sondern auch unsere

Abhängigkeit von wertvollen Rohstoffen, die für die technische Nutzung nicht unendlich lang zur Verfügung stehen werden.

### Gesundheit und Lebensqualität

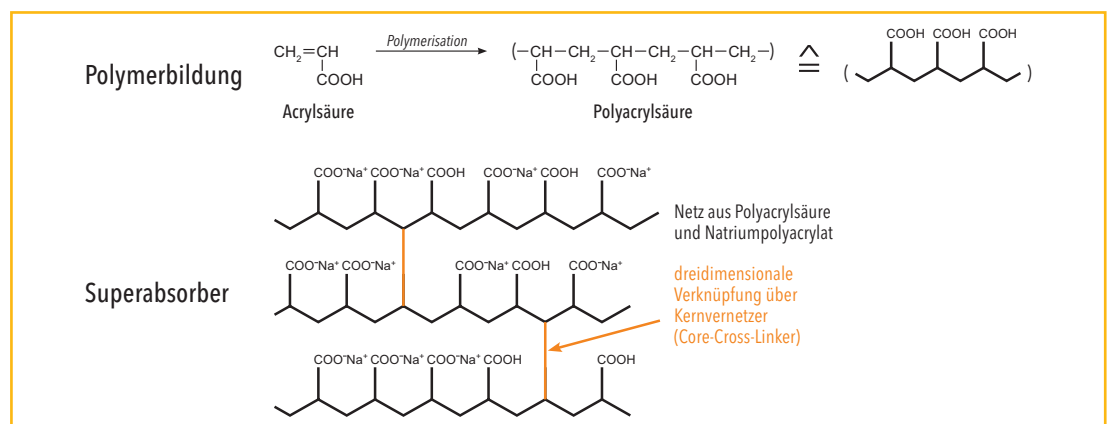
Laut der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) hat sich die Lebenserwartung in den Industrienationen seit 1960 um zehn Jahre erhöht. In den kommenden 50 Jahren wird sie Schätzungen zufolge um weitere sieben Jahre steigen. Mit immer höherem Lebensalter nimmt im Bevölkerungsdurchschnitt auch die Häufigkeit der Volkskrankheiten wie Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen zu, für die bessere Therapiekonzepte benötigt werden. Zusätzlich ist der Kampf gegen Infektionskrankheiten eine ständig neue Herausforderung. In Zukunft werden aus der chemischen Forschung dringend neue Wirkstoffe und Materialien für die Medizin benötigt.

### Globaler Wettbewerb

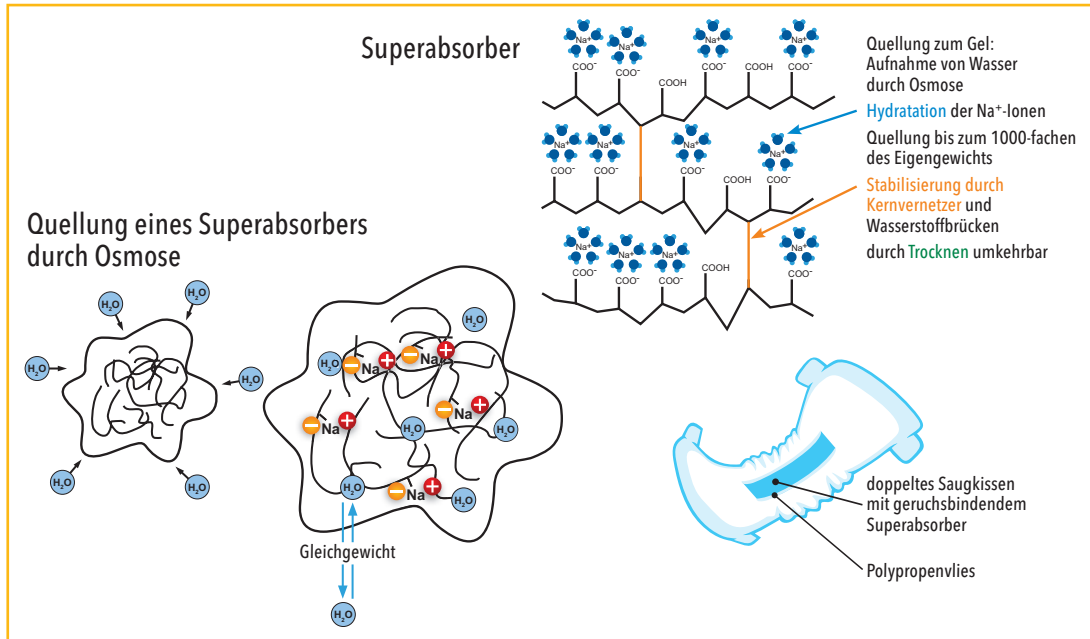
Als Motor für stoffliche Innovationen kann die Chemie in allen Bereichen unseres Lebens zu maßgeblichen Verbesserungen führen. Auch aus wirtschaftlicher Sicht werden Innovationen immer entscheidender für Erfolg, denn im globalen Wettbewerb wächst der Druck auf die deutsche Chemiebranche, ihre Führungsposition durch neuartige, spezialisierte Produkte und besonders leistungsfähige Verfahren zu behaupten (siehe auch Seite 12, Innovationsmanagement).

ABBILDUNG 2

## Superabsorber Polyacrylat



Der Clou bei der Babywindel



Beispiel

Innovationen, die es leicht hatten:  
Die Evolution der Babywindel dank Superabsorbern

Wer heute noch sehr klein und fröhlich glucksend über den Teppich krabbelt, kommt schon hautnah mit Innovationen aus der Chemie in Berührung. Die enorme Saugfähigkeit moderner Babywindeln ist sogenannten Superabsorbern zu verdanken. Diese bestehen aus dreidimensional vernetztem Natriumpolyacrylat.

Polyacrylat (siehe Abbildung 2) gehört (wie Eiweißstoffe oder das Erbmolekül DNA auch) zu den polymeren Elektrolyten: wegen der freien Carboxygruppe, die zurückbleibt, wenn die Acrylsäure ein Proton abspaltet, trägt sie eine negative Ladung. Um das Polyacrylat im Absorbiermaterial der Babywindel hautverträglicher zu machen, bildet man das Natriumsalz nach der Polymerisation durch Hinzufügen von Natronlauge.

Der Kern der Windel

Moderne Babywindeln bestehen etwa zur Hälfte aus Polyacrylat als Kernmaterial in Form von maximal 0,8 Millimeter großen weißen Körnchen. Diese haben es in sich: Durch das Aufquellen zu einem Gel können sie gut das Hundertfache ihres Eigengewichts an Urin aufnehmen. Pro Windel entspricht das also etwa 1,5 Litern. Anders als bei einem Schwamm, der bei Druck die eingeschlossene Flüssigkeit wieder abgibt, lässt der Superabsorber nichts heraus – selbst dann nicht, wenn das Baby mit der Windel auf dem Boden herumrutscht.

Was geschieht bei der Flüssigkeitsaufnahme durch die Körnchen auf molekularer Ebene? Sobald Natriumpolyacrylat mit Wasser in Berührung kommt, dissoziieren die Natriumionen von den Carboxylatgruppen ab. Dann stoßen sich die negativ geladenen Polymerketten elektrostatisch ab und das Polymernetz quillt auf. Wasser dringt durch osmotischen Druck in die zwischenmolekularen Hohlräume und geht Wasserstoffbrückenbindungen mit den negativ geladenen Gruppen des Polymers ein (siehe Abbildung 3).

Nützlich und vielseitig

Bis zur Einführung der Superabsorber um 1985 bestand das Innere der Windel lediglich aus Zellstoff, eingepackt in eine Plastikfolie. Durch Polyacrylate wurde die Babywindel bei erheblich gesteigerter Saugfähigkeit deutlich leichter. Wegen des geringeren Volumens der Windel kann sich das Baby freier bewegen. Außerdem fällt bei ihrer Entsorgung weniger Abfall an.

Die supersaugfähigen Polymere bieten außerdem weitere nützliche Anwendungen, etwa in medizinischen Wundauflagematerialien und in Damenhygieneprodukten, als Schutzschicht in den Ummantelungen von elektrischen Erdkabeln, als Löschmittelzusatz in der Brandbekämpfung, im Gartenbau zum Schutz von Wurzelsystemen oder in der Möbelindustrie als Bestandteil von Sitzpolstern.

Acrylsäure als Grundstoff für die Superabsorber (aber auch für Farben und Anstriche) wird im industriellen Maßstab bislang aus Propen gewonnen, das petrochemisch hergestellt wird. Derzeit arbeiten deutsche Chemieunternehmen gemeinsam mit internationalen Partnern an alternativen Herstellungsverfahren, die Kohlenhydrate aus pflanzlicher Biomasse anstelle des erdölbasierten Grundstoffs nutzen.



### Beispiel Ein Hochleistungspolymer: PTFE

Polytetrafluorethen (PTFE) ist allgemein bekannt durch seine Anwendung in Antihafbeschichtungen, beispielsweise von Bratpfannen. PTFE verfügt über eine Reihe besonderer Eigenschaften, die es von anderen technischen Polymeren unterscheiden und einen äußerst vielseitigen Einsatz ermöglichen: Weil Fluor das chemische Element mit der höchsten Elektronegativität darstellt, ist die kovalente Bindung zwischen Kohlenstoff und Fluor äußerst stabil. Weil sämtliche Wasserstoffatome des Polyethenmoleküls im PTFE durch Fluoratome substituiert sind, ist das Material chemisch äußerst beständig. Selbst starke Oxidationsmittel wie Königswasser greifen es nicht an; ein chemischer Angriff erfolgt lediglich durch beispielsweise elementares Fluor bei erhöhten Temperaturen.

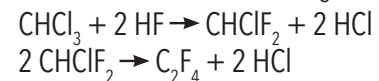
Durch diese hohe chemische Beständigkeit kann es überall dort als Konstruktions- oder Auskleidungsmaterial verwendet werden, wo aggressive Substanzen gelagert, transportiert oder umgesetzt werden müssen, beispielsweise in der chemischen Industrie. Die außergewöhnliche Inertheit von PTFE bewirkt außerdem, dass es im menschlichen Körper nicht angegriffen oder verändert wird. Dies macht es zu einem geeigneten Beschichtungsmaterial für Implantate, zum Beispiel für Gefäßprothesen, die in defekte Arterien eingesetzt werden.

Sein sehr geringer Reibungskoeffizient und seine weitestgehende Nichtbenetzbarkeit ermöglichen nicht nur den Einsatz in den erwähnten Antihafbeschichtungen, sondern ebenso in zahlreichen technischen Anwendungen, wo es auf geringe Reibung und hohe Beständigkeit ankommt, zum Beispiel in Wellendichtringen.

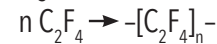
Weitere vielseitige Anwendung finden Membranen aus gerecktem PTFE, die mikroporös sind. In unterschiedlichen Ausführungen werden sie unter anderem als Filtermembranen verwendet. Besonders verbreitet ist ihre Anwendung in Funktionstextilien. Der Kern des Funktionsprinzips besteht darin, dass die Poren solcher Membranen zwar für Gasmoleküle, also auch Wasserdampf, durchlässig sind, nicht aber für flüssiges Wasser. So kann verdunsteter Schweiß abgeführt werden, während Regen die Membran nicht durchdringen kann.

### Synthese von PTFE

Wegen der großen Reaktionsenthalpie der Fluorierung von Kohlenwasserstoffen erfolgt diese Reaktion so heftig, dass sie für technische Zwecke nicht eingesetzt werden kann. Bei der Synthese von PTFE geht man deshalb von Trichlormethan aus, das mit Fluorwasserstoff in zwei Stufen zu Tetrafluorethen und Chlorwasserstoff umgesetzt wird:



Dieses wird dann in einer radikalischen Polymerisation (üblicherweise mit Persulfat als Radikalstarter) zum Polymer umgesetzt:



Diese Reaktion ist stark exotherm, außerdem besteht bei höheren Temperaturen die Gefahr einer explosionsartigen Disproportionierung von Tetrafluorethen zu Kohlenstoff und Tetrafluormethan, weshalb die Reaktion zur besseren Kontrolle in wässriger Suspension durchgeführt wird.

### Von der Idee zum Kunden: Innovationsmanagement

„Innovate or die!“ – Die Unternehmen der chemischen Industrie stehen weltweit im Wettbewerb um Rohstoffe, Kunden und qualifizierte Mitarbeiter. Die Rohstoffe werden knapper und teurer, die Kunden stellen immer höhere Anforderungen, die Märkte sind hart umkämpft. Nur Innovation sichert hier das Überleben. Je nach Ausrichtung und Größe des Unternehmens kann die Art, wie Innovationen generiert und gesteuert werden, sehr unterschiedlich sein. Einen Königsweg gibt es nicht, dafür aber eine Reihe von Voraussetzungen, die erfüllt sein sollten.

### Mit Methode zu cleveren Ideen

Innovation beginnt in jedem Unternehmen bekanntlich mit einer guten Idee oder besser noch mit vielen. Die besten Ideengeber sind die Mitarbeiter selbst! Deshalb ist es wichtig, eine Innovationskultur zu schaffen, in der Kreativität und Gedankenaustausch besonders gut gefördert werden.

Es gibt eine Vielzahl von Instrumenten, mit denen Firmen den Ideenfindungsprozess in Gang setzen und fördern können. Beliebt sind zum Beispiel mehrtägige, moderierte Workshops, bei denen Vertreter der unterschiedlichsten Abteilungen zusammenarbeiten: beispielsweise aus der Forschung, aus dem Produktmanagement sowie aus Marketing und Vertrieb. Im Rahmen des Workshops setzt der Moderator wechselnde Methoden ein, etwa das Brainstorming oder alternativ das „Brainwriting“ (auch „6-3-5-Methode“ genannt).

**Beispiel  
Innovationsmanagement  
großer Chemieunternehmen**

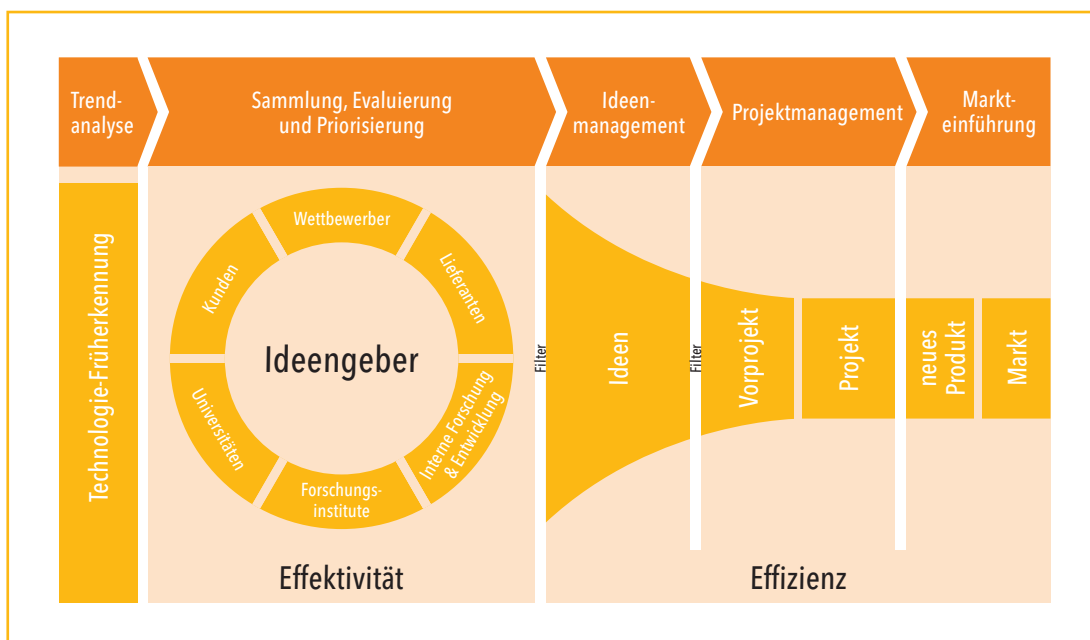
Viele große, international operierende Chemieunternehmen in Deutschland leisten sich ausgefeilte Organisationsstrukturen, um im Innovationsgeschehen die Nase vorn zu haben. Sie verfügen über eigene Teams oder sogar Abteilungen, die kontinuierlich das Wettbewerbsumfeld, potentiell relevante Trends, Märkte und technologische Entwicklungen analysieren. Andere wiederum nehmen besonders die Wünsche und Bedürfnisse ihrer Kunden unter die Lupe.

Und natürlich investieren die Unternehmen erheblich in die Forschung, denn die Chemie gehört zu den forschungsintensivsten Branchen überhaupt. Weil der Arbeitsaufwand in einem vernünftigen Verhältnis zum investierten Geld stehen muss, setzen die Firmen der Kreativität einen definierten Rahmen, thematisch wie organisatorisch. In vielen Fällen arbeiten sie auch mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen zusammen. Diese bringen ihr exzellentes Fachwissen, etablierte Methoden oder Instrumente ein und begleiten die technische Umsetzung der Idee, für die ihnen selbst die technischen Möglichkeiten fehlen.

Ausgewählte Ansätze aus der Forschung werden in mehrstufige und über alle Phasen streng überwachte Innovationsprojekte eingespeist (siehe Abbildung 4). Im Erfolgsfall gehen daraus neue Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen hervor. Zeichnet sich unterwegs aber ab, dass die Erfolgsaussichten nicht groß genug sind, werden Innovationsprojekte gestoppt. Chemie-Manager werten dies nicht selten als mutige und weitsichtige Entscheidung. Und auch die Innovationsteams sehen Positives darin, denn sie können aus den Fehlern lernen und dieses Wissen beim nächsten Projekt anwenden.

ABBILDUNG 4

**Der Innovationsprozess am Beispiel eines Spezialchemie-Unternehmens**



## Innovation braucht Nachhaltigkeit – und umgekehrt

Die chemische Industrie in Deutschland versteht Nachhaltigkeit als Verpflichtung gegenüber den jetzigen und künftigen Generationen und als Zukunftsstrategie, in der wirtschaftlicher Erfolg mit sozialer Gerechtigkeit und ökologischer Verantwortung verknüpft ist.

Um der großen Bedeutung dieses Themas Rechnung zu tragen, haben der Verband der Chemischen Industrie (VCI), die Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (IGBCE) und der Bundesarbeitgeberverband Chemie (BAVC) gemeinsam die Nachhaltigkeitsinitiative Chemie<sup>3</sup> ([www.chemiehoch3.de](http://www.chemiehoch3.de)) ins Leben gerufen. Im Zentrum stehen die „Leitlinien zur Nachhaltigkeit für die chemische Industrie in Deutschland“. Sie unterstützen Unternehmen und Beschäftigte dabei, ihren Beitrag zur Nachhaltigkeit auszubauen.

Fazit einer Fachveranstaltung der Initiative im Mai 2015 war: „Wer Nachhaltigkeit vorantreiben möchte, kann auf Innovationen nicht verzichten. Und wer innovativ sein möchte, muss Nachhaltigkeit in seine Innovationen integrieren.“

Das bedeutet, dass der Nachhaltigkeitsgedanke mit seinen drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales fest in der Unternehmensstrategie verankert wird. Die entsprechende Leitlinie formuliert das wie folgt:

„Langfristig orientiertes wirtschaftliches Handeln, globale Wettbewerbsfähigkeit und die finanzielle Stabilität der Unternehmen sind die Grundlage für Arbeitsplätze, Innovationen und Investitionen. Langfristiger unternehmerischer Erfolg dient den Mitarbeitern, den Eigentümern beziehungsweise Anteilseignern und der volkswirtschaftlichen Stabilität.

Der Schutz von Mensch und Umwelt und ein verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen sind fest in den Unternehmen verankert und werden zum Beispiel durch die Umsetzung von Responsible Care<sup>(1)</sup> unterstützt und kontinuierlich weiterentwickelt.

Die Unternehmen stehen für gelebte soziale Verantwortung als Teil der Gesellschaft. In Deutschland findet dies seinen Ausdruck im Bekenntnis zur sozialen Marktwirtschaft und ihrem Engagement in der besonderen Chemie-Sozialpartnerschaft<sup>(2)</sup>.“

### HINWEIS

#### Die zwölf Prinzipien der „Green Chemistry“

Das Leitbild der nachhaltigen Chemie orientiert sich an den zwölf Prinzipien, die Paul T. Anastas und John C. Warner in ihrem Konzeptpapier „Green Chemistry“ von 1998 beschrieben haben.

##### 1. Prävention

Es ist besser, Abfall zu vermeiden als ihn zu behandeln oder zu beseitigen.

##### 2. Atomökonomie

Synthesemethoden sollten so etabliert werden, dass der Einbau aller im Prozess verwendeten Materialien in das Endprodukt maximiert wird.

##### 3. Sicherere chemische Synthesen

Wo es möglich ist sollten Syntheseverfahren etabliert werden, die Substanzen generieren oder verwenden, die geringe bis keine Toxizität\* für Mensch und Umwelt aufweisen.

##### 4. Sicherere Chemikalien

Chemische Produkte sollten so beschaffen sein, dass sie bei optimaler Funktion minimale Toxizität aufweisen.

##### 5. Sicherere Lösemittel und Hilfsstoffe

Die Verwendung von Hilfsstoffen (zum Beispiel Löse- und Trennmittel) sollte vermieden werden. Wo unvermeidbar, sollten sie ungefährlich sein.

##### 6. Energieeffizienz

Der Energiebedarf chemischer Prozesse sollte im Hinblick auf seine ökologischen und ökonomischen Auswirkungen analysiert und minimiert werden. Wenn möglich, sollten Synthesen bei Umgebungstemperatur und -druck ablaufen.

(1) Weltweite Initiative der chemischen Industrie, siehe [www.vci.de/nachhaltigkeit/responsible-care/rc-initiative/listenseite.jsp](http://www.vci.de/nachhaltigkeit/responsible-care/rc-initiative/listenseite.jsp)

(2) [www.chemie-sozialpartner.de/](http://www.chemie-sozialpartner.de/)



1

#### 7. Verwendung nachwachsender Rohstoffe

Ein Rohstoff oder Ausgangsmaterial sollte nachwachsend sein, wann immer dies technisch oder wirtschaftlich möglich ist.

#### 8. Derivate\* reduzieren

Unnötige Derivatisierung (zum Beispiel Schutzgruppen, Schutz/Entschützen, temporäre Modifikation chemischer oder physikalischer Prozesse) sollte wenn möglich minimiert oder vermieden werden, weil jeder Schritt zusätzliche Reagenzien erfordert und Abfallstoffe erzeugen kann.

#### 9. Katalyse

Katalytisch wirksame Reagenzien (so selektiv wie möglich) sind in stöchiometrischen Mengen\* eingesetzten Reagenzien vorzuziehen.

#### 10. Abbaubarkeit

Chemieprodukte sollten so beschaffen sein, dass sie mit Ende ihrer Funktion in unschädliche Abbauprodukte zerfallen und nicht in der Umwelt verbleiben.

#### 11. Echtzeitanalyse zur Vermeidung von Schadstoffbelastungen

Es gilt, solche Analysemethoden weiterzuentwickeln, die prozessintegriertes Echtzeit-Monitoring und eine Kontrolle vor der Entstehung toxischer Substanzen ermöglichen.

#### 12. Inhärent\* sichere Chemie zur Unfallvermeidung

Substanzen und ihre Formulierungen in einem chemischen Prozess sollten so ausgewählt werden, dass die Wahrscheinlichkeit von Unfällen (zum Beispiel Explosionen, Feuer und Freisetzungen) minimiert wird.

### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

#### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 1: Innovationen und Chemie

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 1 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 1.1: Innovationen in der Chemie (SI)

Aufgabe 1.2: Vom „Friesennerz“ zur Funktionsjacke (SI)

Experiment 1.1: Vom „Friesennerz“ zur Funktionsjacke – Untersuchung der Wasserdichtigkeit (SI)

Experiment 1.2: Vom „Friesennerz“ zur Funktionsjacke – Untersuchung der Atmungsaktivität (SI)

Experiment 1.3: Vom „Friesennerz“ zur Funktionsjacke – Untersuchung der Winddurchlässigkeit (SI)

Experiment 1.4: Untersuchung der Quellfähigkeit eines Superabsorbers in verschiedenen Lösungen (SI/SII)

Aufgabe 1.3: Planung einer Schülerfirma (SI/SII)

Aufgabe 1.4: Innovation und Nachhaltigkeit am Beispiel der Produktion des Wachsesters Myristylmyristat (SI/SII)

Aufgabe 1.5: Nanosilber – pro und contra (SI/SII)

SI = Sekundarstufe I  
SII = Sekundarstufe II

## 2. Werkstoff- und Wirkstoffforschung: Von der Simulation bis zur Anwendung

### Werkstoffforschung

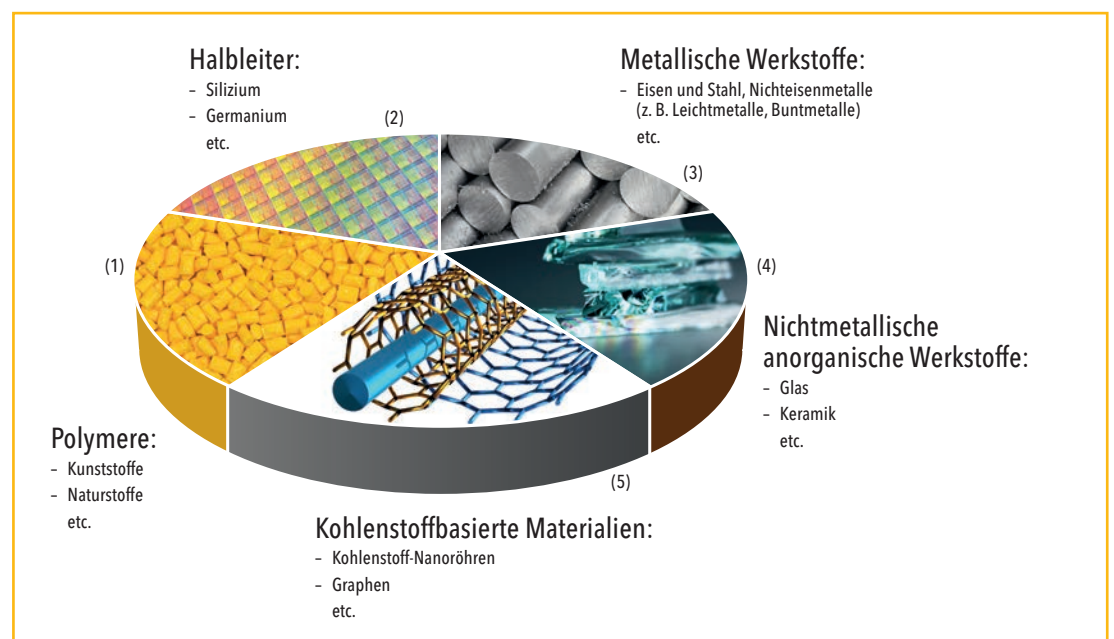
Schon seit frühester Menschheitsgeschichte nutzen wir die verschiedensten Materialien, um unser Leben zu verbessern. Während die längste Zeit Stoffe aus unserer natürlichen Umwelt verwendet wurden, ermöglicht es die chemische Industrie seit dem 19. Jahrhundert, gezielt Materialien mit besonderen Eigenschaften herzustellen.

Die Bereitstellung neuer Materialien ist in einer immer schneller wachsenden Gesellschaft wichtiger denn je (siehe Abbildung 5), sind doch die Ressourcen unseres Planeten endlich. Es gilt also, diese Ressourcen mit höchstmöglicher Effizienz zu nutzen. Auch bei der Energiegewinnung müssen wir neue Wege gehen, denn die althergebrachte Nutzung fossiler Energieträger wie Kohle, Öl und Erdgas ist eine Sackgasse: Unser Wirtschaften muss zukünftig wesentlich klima- und umweltschonender werden.

Wie aber gelangt man zu neuen Werkstoffen, die den Anforderungen an Umweltschutz und Ressourcenschonung entsprechen? In der Vergangenheit war oft das Prinzip „Versuch und Irrtum“ maßgeblich. Der Einsatz computergestützten Werkstoffdesigns hingegen ermöglicht eine wesentlich gezieltere Herangehensweise: Ausgehend von den Eigenschaften der Elektronen der Ausgangsmaterialien auf molekularer beziehungsweise atomarer Ebene wird berechnet, wie sich ein aus ihnen zusammengesetztes Material makroskopisch verhält – mit dem Erfolg, dass die Entwicklungszeiten neuer Materialien verkürzt und Kosten gespart werden können.

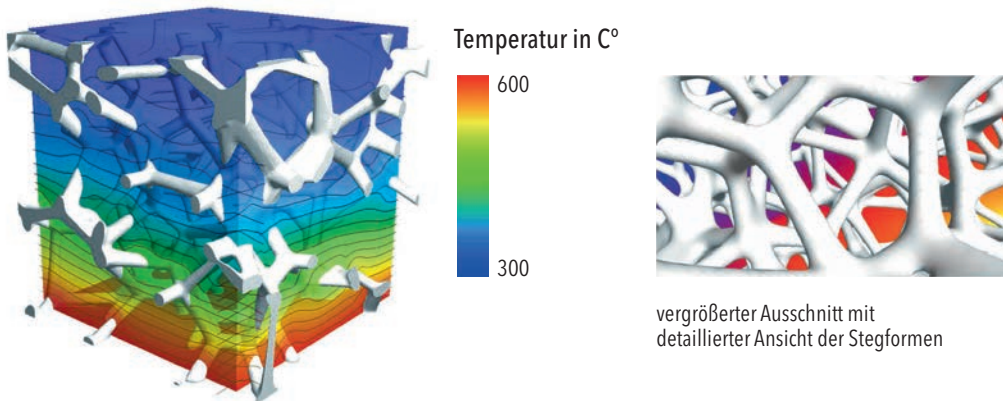
ABBILDUNG 5

### Anwendungsgebiete der Materialforschung



## Impressionen aus der „virtuellen Werkstoffforschung“

Beispiel einer speziell entwickelten mathematischen Simulationssoftware, mit der poröse Strukturen bezüglich ihrer Eigenschaften in technischen Anwendungen charakterisiert werden



Simulation der Temperaturverteilung in einem offenporigen Metallschaum beim Erwärmen vom unteren Gebietsrand her

### Beispiel

## Hightech-Legierungen: Materialforschung im Computer

Stähle sind die am häufigsten verwendeten und industriell bedeutendsten Legierungen. Basis aller Stähle ist das Eisen, das in Legierungen mit Kohlenstoff (in Konzentrationen zwischen 0 und 2,06 Prozent) vorliegt. Alle weiteren Elemente der Legierung liegen in deutlich geringerer Konzentration vor. In der Fahrzeugtechnik ebenso wie in der Luft- und Raumfahrt hat man inzwischen hoch- und ultrahochfeste Stähle etabliert, weil sie bei vergleichsweise geringem Gewicht ein Maximum an Sicherheit und Betriebsfestigkeit garantieren. Über 70 Prozent der Bleche in Rohbaufahrzeugen der gehobenen deutschen Automobilklasse enthalten bereits solche Hightech-Materialien. Würden die Konstrukteure stattdessen herkömmlichen Stahl verwenden, wäre zum Beispiel die B-Säule (die Verbindung zwischen Fahrzeugboden und Fahrzeugdach in der Mitte der Fahrgastzelle) ein Drittel schwerer, besäße aber nur rund ein Viertel der geforderten Zugfestigkeit\*. Wo man früher die Eigenschaften von Legierungen in einer Vielzahl von chemischen Experimenten erforschen und schrittweise optimieren musste, nimmt dem Men-

schen „Kollege Computer“ durch leistungsfähige Simulationen heute Arbeit ab und sorgt so für Material- und Zeitersparnis. Im Bereich dieser virtuellen Werkstoffforschung leisten Hochschulen und wissenschaftliche Einrichtungen wegweisende Arbeit, von der die Industrie später in der Produktentwicklung profitieren kann. Auch im nächsten Schritt, wenn aus den Legierungen Bauteile gefertigt sind, können Simulationen bereits reale Verformungsprüfungen ersetzen und zumindest einen Teil der Crashtests einsparen. Solche Forschungsarbeiten finden beispielsweise in der Abteilung Computational Materials Science and Engineering (CMSE) der Hochschule Karlsruhe statt.

Hier gewinnen Wissenschaftler mit Hilfe von Computersimulationen Erkenntnisse über die Bildung von Mikrostrukturen und ihren Einfluss auf Materialeigenschaften. Ausgehend von Phasendiagrammen und thermodynamischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten einer Legierung werden die Fest-Flüssig- und die Fest-Fest-Phasenübergänge während des Abkühlungsprozesses und die dabei entstehenden Mikrostrukturen modelliert. In aufwendigen 2D- und 3D-Simulationen wird dann der Einfluss dieser Strukturen auf Materialeigenschaften wie Zug- und Druckfestigkeit oder Elastizität überprüft (siehe Abbildung 6).

## Ein Quäntchen Zukunft mit Quantenphysik

Die Simulation von Werkstoffeigenschaften macht rasante Fortschritte, mittlerweile betrachtet sie sogar die Einflüsse einzelner Atome in Aggregaten von Hunderten, ja sogar Millionen Atomen. Diese Präzision verdanken wir immer leistungsfähigeren Rechnern und immer besseren mathematischen Modellen in der Software. Damit gelangt man in die Größenordnung von wenigen millionstel Millimetern und kann im Rechner bereits die Funktionen winziger Halbleiter-Schaltelemente simulieren – lange bevor man die ersten Prototypen der entsprechenden Computerchips herstellt.

Auch die Entwicklung von Ersatzstoffen für Seltene-Erden-Metalle könnte dadurch beschleunigt werden. Denn zum Ausbau der erneuerbaren Energien durch Windkraftanlagen werden bereits heute große Mengen von Seltene-Erden-Metallen, wie Neodym in den Magneten der entsprechenden Generatoren verarbeitet.

## Wirkstoffforschung

Zwar kann die moderne Medizin viele schwere Erkrankungen bereits behandeln, aber die Therapien gehen zum Teil noch mit schweren Nebenwirkungen einher oder sind nicht wirksam genug. Außerdem sind für sehr viele bekannte Krankheiten noch gar keine medikamentösen Therapien vorhanden. Beides zeigt: Die Suche nach neuen Wirkstoffen ist eine gesellschaftlich wichtige Aufgabe.

Früher war „Versuch und Irrtum“ die übliche Herangehensweise, um neue, medizinisch wirksame Substanzen zu finden und in Medikamenten verfügbar zu machen. Moderne Verfahren hingegen ermöglichen heute gezieltes Wirkstoffdesign. Sie verbinden Erkenntnisse aus Molekularbiologie, Biochemie und Zellbiologie in Kombination mit Informatik und Computertechnik. Der Trend geht dahin, in die Simulation immer mehr und immer komplexere biologische Daten einzubeziehen. Insgesamt sparen forschende Pharmaunternehmen durch diese Vorgehensweise nicht nur Zeit und Kosten, sondern sie verringern auch die Anzahl der Tierversuche auf ein absolutes Minimum.

## HINWEIS

### Die Kohnsche Dichtefunktionaltheorie

Computersimulationen in der modernen Materialforschung nutzen heute oft die Dichtefunktionaltheorie des Physikers Walter Kohn. 1998 wurde er für ihre Entwicklung mit dem Chemie-Nobelpreis honoriert. Diese Theorie beruht auf der Quantenphysik\*, deren Ursprünge bis zu den Arbeiten von Max Planck zurückreichen. Sie ermöglicht die mathematische Beschreibung von Systemen aus sehr vielen Elektronen, wie sie in Molekülen und Festkörpern auftreten.

Die Dichtefunktionaltheorie geht davon aus, dass der Grundzustand eines Elektronensystems durch die ortsabhängige Elektronendichte eindeutig beschrieben werden kann. Aus der ermittelten Elektronendichte im Grundzustand lassen sich dann prinzipiell alle weiteren Eigenschaften wie zum Beispiel die Gesamtenergie ableiten. Diese Eigenschaften sind somit Funktionale der Elektronendichte.

## Die Suche nach der Nadel im Heuhaufen

Egal ob aus der Natur oder dem Labor: Die Suche nach dem Wirkstoff gegen eine definierte Erkrankung beginnt immer mit einer immensen Zahl möglicher Kandidaten, meist kleinen Molekülen. Diese werden Schritt für Schritt in verschiedenen Testsystemen auf ihre Wirksamkeit und Unbedenklichkeit untersucht und ihr Kreis wird immer weiter eingeengt. Wegen der enormen Probenanzahl kommen hier zunehmend automatisierte Verfahren zum Einsatz, die viele tausend Substanzen in wenigen Stunden durchmustern („Hochdurchsatzscreening“). Aussichtsreiche Kandidaten werden Zug um Zug chemisch verändert, bis sie das Zeug zum Wirkstoff haben.

Typischerweise bleibt am Ende höchstens eine Substanz übrig, die als neuer Medikamentenwirkstoff Potential zur Zulassung besitzt – ein Verfahren, das mit einer Dauer von zehn bis fünfzehn Jahren äußerst langwierig ist und viele hundert Millionen Euro kosten kann.

## Strukturbasierte Wirkstoffforschung: Der Computer hilft mit

Das Beispiel Krebsmedizin zeigt die Auswirkungen des technischen Fortschritts in der Wirkstoffforschung: Früher haben Forscher sehr viele verschiedene therapeutische Substanzen zu Krebszellen in Laborkultur gegeben und diejenigen Stoffe ausgewählt, in deren Gegenwart die Tumorzellen abstarben.

Durch den immensen Fortschritt in der biowissenschaftlichen Forschung kennt man heute aber oft schon die Art und den molekularen Aufbau der Schlüsselmoleküle (zum Beispiel bestimmte Eiweißstoffe), die für die Tumorentstehung verantwortlich sind. Es reicht dann also, die Suche nur mit solchen Wirkstoffen zu beginnen, deren Leitstruktur zu dem Eiweiß passt, die daran bindet und es in seiner Funktion beeinflusst.

Dieser Schritt, der ein wenig einem 3D-Puzzlespiel ähnelt, findet dank moderner Bioinformatik\* mit atomgenauen 3D-Modellen der Moleküle in sehr leistungsfähigen Computern statt. Dieses Verfahren heißt strukturbasierte Wirkstoffforschung (engl.: structure-based drug design, SBDD).

Das SBDD liefert detaillierte Einblicke in die Wechselwirkung zwischen einem Zielprotein und seinem möglichen Wirkstoff als Bindungspartner (Ligand). Auf diesem Wissen aufbauend können Chemiker die Gerüststruktur des Liganden gezielt und präzise an den Seitengruppen verändern, um die Wirkung zu steigern oder die Toxizität zu verringern.

Mit einem weiteren Verfahren, dem „virtuellen Ligandenscreening“ (VLS), werden sowohl chemisch tatsächlich synthetisierte als auch rein theoretische Strukturen in die Simulation einbezogen. Diese theoretischen Moleküle, sogenannte Pharmakophore, stellen nur noch elektronische und räumliche Eigenschaften dar, während die atomare Zusammensetzung des Moleküls in den Hintergrund tritt. Findet man im VLS, dass ein solches Pharmakophor an ein Zielprotein bindet, können dann in weiteren Schritten Substanzen identifiziert werden, die sterisch und elektronisch möglichst gut mit dem Pharmakophor übereinstimmen.

### HINWEIS

#### Kleine Moleküle – große Chancen

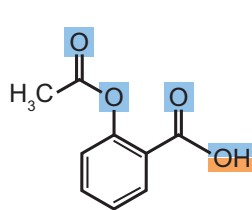
Die Anzahl vorstellbarer organischer Moleküle mit einer Masse von maximal 600 Dalton ist unüberschaubar groß. Beispielsweise umfasst die Moleküldatenbank GDB-13 fast eine Milliarde Strukturen von Molekülen mit maximal 13 Atomen aus den Elementen Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und Chlor. Die Anzahl der thermodynamisch möglichen Strukturen mit einer Molekülmasse  $< 600$  Dalton ist noch gewaltiger: Aktuelle Schätzungen liegen im Bereich der Avogadrozahl ( $6,022 \times 10^{23}$ ), manche Experten halten sogar eine Größenordnung von  $10^{60}$  für realistisch (zum Vergleich: Die Zahl aller Atome im Universum wird auf eine Größenordnung von  $10^{78}$  geschätzt).

Ein wichtiges Prinzip bei der Auswahl dieser Substanzen ist die sogenannte „Rule of Five“ (Fünferregel, siehe Abbildung 7); der Name rührt daher, dass alle Zahlenwerte gleich fünf oder ein geradzahliges Vielfaches von fünf sind. Die Regeln lassen Vorhersagen zur Bioverfügbarkeit von Wirkstoffen zu:

1. Der Wirkstoff darf ein bestimmtes Molekulargewicht nicht überschreiten; die Grenze wird oft bei 500 Dalton gezogen.
2. Das Molekül sollte nicht mehr als fünf Donatoren von Wasserstoffbrücken, also beispielsweise Hydroxy- oder Aminogruppen, enthalten.
3. Es sollte über nicht mehr als zehn Akzeptoren für Wasserstoffbrücken wie Sauerstoff- oder Stickstoffatome enthalten.
4. Der Verteilungskoeffizient\* ( $\log P$ ) zwischen Oktanol und Wasser sollte maximal fünf betragen.

Die „Rule of Five“

1. Molekulargewicht  $\leq 500 \text{ g x mol}^{-1}$  ( $= 5 \times 100 \text{ g x mol}^{-1}$ )
2. Anzahl Wasserstoffbrückendonatoren  $\leq 5$  ( $= 5 \times 1$ )
3. Anzahl Wasserstoffbrückenakzeptoren  $\leq 10$  ( $= 5 \times 2$ )
4. Verteilungskoeffizient (log P) zwischen Oktanol und Wasser  $\leq 5$



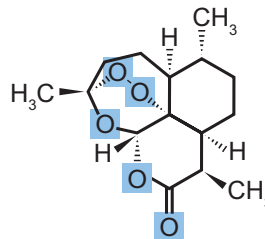
Acetylsalicylsäure

MW =  $180,16 \text{ g x mol}^{-1}$

$^n\text{H-Donatoren} = 1$

$^n\text{H-Akzeptoren} = 4$

log P = 1,433



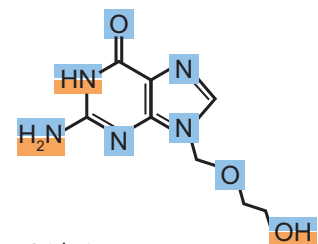
Artemisinin

MW =  $282,34 \text{ g x mol}^{-1}$

$^n\text{H-Donatoren} = 0$

$^n\text{H-Akzeptoren} = 5$

log P = 2,372



Aciclovir

MW =  $225,21 \text{ g x mol}^{-1}$

$^n\text{H-Donatoren} = 3$

$^n\text{H-Akzeptoren} = 8$

log P = -2,42

Beispiel  
Virtuelle Arzneimitteltests

Ein führendes deutsches Pharmaunternehmen hat eine Software entwickelt, die es ermöglicht, Aussagen darüber zu treffen, welchen Weg eine Substanz nach oraler Gabe oder nach Injektion im Körper nimmt, in welchen Organen der Abbau erfolgt und welche Konzentrationen sie in verschiedenen Organen und Geweben erreicht.

Die Basis für diese Voraussagen ist eine umfangreiche Datenbank. In ihr sind Daten von mehreren zehntausend Substanzen mit Molekulargewicht, Löslichkeit, Proteinbindung und Ausscheidungsverhalten hinterlegt. Gleichzeitig sind Daten zu fünfzehn Organen wie Blutflussrate, Volumen, Fett- und Proteinanteil sowie Gefäßoberfläche gespeichert. Das Programm macht dabei nicht nur differenzierte Voraussagen für einen menschlichen Organismus in verschiedenen Lebensaltern, sondern auch für Mäuse, Ratten und Hunde.

Systembiologie:  
Der nächste Schritt in die Zukunft

Die Systembiologie hat das Ziel, die komplexen und dynamischen Abläufe in einer Zelle oder einem Organ (beispielsweise abhängig von Umweltbedingungen oder Alter) zu verstehen (siehe Abbildung 8) und mit Hilfe einer Software möglichst vollständig nachzubilden. Für die Zukunft haben sich Forscher das Ziel gesetzt, Vorhersagen auch ohne Laborexperimente treffen zu können. Damit dies gelingt, erfordert die Systembiologie wie kaum ein anderer Bereich die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen so verschiedenen Fachwissenschaften wie Biologie, Physik, Informatik, Mathematik und Ingenieurwissenschaften.

Beispiel  
Unterwegs zum Verständnis umweltbedingter Hautalterung

Unsere Haut ist die äußerste Schutzschicht unseres Körpers. Dass sie sich im Alter von selbst verändert, kann man beispielsweise an Runzeln oder Pigmentverschiebungen erkennen. Aber auch Umwelteinflüsse, vor allem Sonnen-

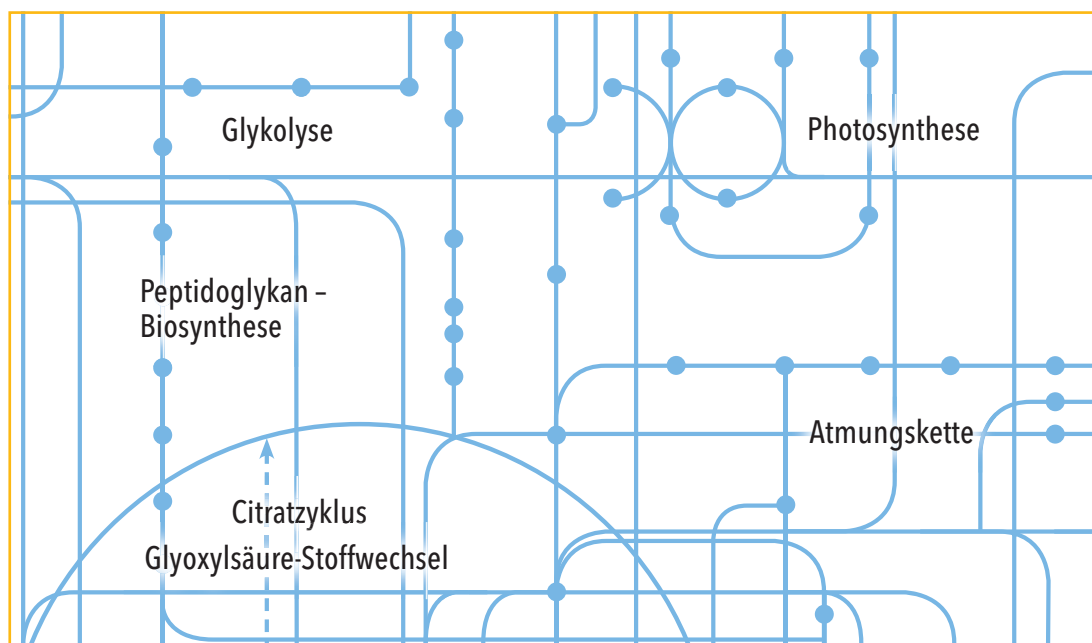
strahlung, haben Einfluss auf Alterungsprozesse im „größten Organ des Menschen“. Mittels Systembiologie haben es sich Forscher eines deutschen Chemieunternehmens gemeinsam mit Wissenschaftlern des Deutschen Krebsforschungszentrums und der TU Dresden zur Aufgabe gemacht, den Hautalterungsprozess selbst und auch die Auswirkungen äußerer Einflüsse biochemisch besser zu verstehen. Dazu haben sie untersucht, wie sich die Ablesehäufigkeit von Genen in den Hautzellen älterer Menschen im Vergleich zu einer jüngeren Kontrollgruppe verhält.

An 104 von 27.000 untersuchten Orten auf dem Erbgut der 71-bis-75-Jährigen fanden die Forscher punktuelle Methylierungen von DNA-Bausteinen, die zu einer deutlichen Verringerung der Genaktivität führten.

Somit kennen die Forscher bereits eine ganze Reihe von Genen, die direkt oder indirekt mit der Hautalterung in Verbindung stehen. Diese ersten Erkenntnisse sind ermutigend: Sie weisen den Weg zu möglichen Angriffspunkten für Wirkstoffe, mit denen alternde Haut besser geschützt und gepflegt werden kann.

#### ABBILDUNG 8

#### Systembiologische Darstellung biochemischer Prozesse



#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

##### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 2: Werkstoff- und Wirkstoffforschung

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 2 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 2.1: Anwendungsgebiete der Materialforschung (SI/II)

Aufgabe 2.2: Berufe in der Werkstoff- und Wirkstoffforschung (SI/II)

Aufgabe 2.3: „Maßgeschneiderte“ Blutverdünner (SII)

Aufgabe 2.4: Bioverfügbarkeit von Schmerzmitteln (SII)

Experiment 2.1: Kleine Strukturänderung – neue Stoffeigenschaft (SII)

Experiment 2.2: Kleine Moleküländerung – große Wirkung (SII)

### 3. Verfahrens- und Prozessinnovationen: „Intelligenter“ produzieren

Innovationen finden nicht nur bei Produkten, sondern auch bei Verfahren und Prozessen statt.

Ein härterer Wettbewerb übt mehr Druck auf die Unternehmen aus, neue und/oder bessere Produkte in möglichst kurzer Zeit in die Märkte einzuführen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, müssen Herstellungsprozesse beschleunigt und Energie und Rohstoffe eingespart werden, wodurch sich die Kosten weiter senken lassen. Trotz der geringen Zeit von der Idee bis zur Markteinführung soll das Produkt höchsten Qualitätsansprüchen gerecht werden. Hat der Kunde Sonderwünsche, muss man schnell und flexibel darauf reagieren können.

Die Lösungen zur Bewältigung all dieser Herausforderungen finden sich in der Miniaturisierung, in der Automatisierung, in der umfassenden Vernetzung und in der Integration von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien in den Produktionsprozess.

#### Modularisierung, Flexibilisierung, Automatisierung ...

Wer schon einmal ein Chemiewerk oder einen Chemiapark\* besichtigt hat, der glaubt vielleicht, dass Chemieproduktion immer in riesigen Anlagen stattfindet. Das trifft aber nur auf bestimmte Anwendungsbereiche der Chemie zu, etwa auf die Petrochemie\* oder auf die Kunststoffherstellung.

In der Spezial- und Feinchemie\* hingegen werden vergleichsweise kleine Mengen nachgefragt, dafür sind die Produkte aber sehr hochwertig und entsprechend wertschöpfend. Führende deutsche Unternehmen arbeiten deshalb gemeinsam mit Hochschulpartnern bereits seit einigen Jahren an einem kompakteren Produktionskonzept im Containerformat.



Für die Zukunft solcher Minianlagen gibt es verschiedene Einsatzszenarien, zum Beispiel:

- Bei kurzfristiger Nachfrage wird die Chemikalie nah beim Kunden produziert, beispielsweise Feinlacke in der Nähe eines Automobilherstellers.
- In den Abnehmerländern werden für den letzten Herstellungsschritt Container aufgestellt, um deren Bedürfnissen nach lokaler Produktion gerecht zu werden.
- Die Produktion im Container findet auf einem Schiff statt, am Zielort wird das fertige Produkt entladen.

Eine Chemiefabrik im Containerformat kostet nur einen Bruchteil einer Großanlage und birgt für den Betreiber im Falle einer unsicheren Nachfrageentwicklung wesentlich geringere finanzielle Risiken. Von der „small scale“ genannten Kleinmengen-Produktion erwarten Chemieunternehmen darüber hinaus, ihre innovativen Produkte in der Hälfte der bisherigen Entwicklungszeit („time-to-market“) auf den Markt bringen zu können.

#### Beispiel

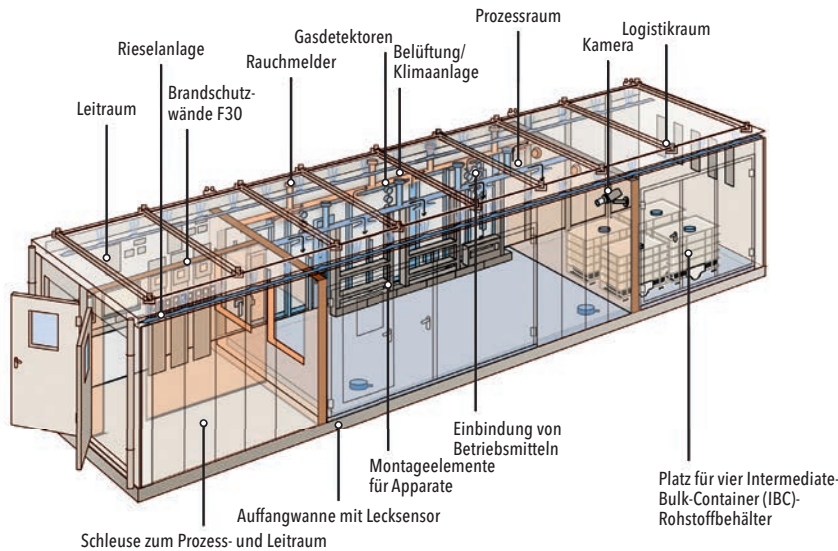
#### Miniaturisierung heute: Warum eine Chemiefabrik in einen Überseecontainer passen kann

In drei Jahren Entwicklungszeit und gefördert von der Europäischen Kommission hat ein führendes deutsches Chemieunternehmen zusammen mit weiteren Firmen- und Hochschulpartnern aus mehreren Ländern eine betriebsfertige Mini-Chemiefabrik in einem 3 x 6 Meter oder 3 x 12 Meter großen Überseecontainer Realität werden lassen.

Klein, aber oho: Reaktoren, Produktaufarbeitung, Prozessleittechnik, Lagerflächen, Brandschutzvorrichtungen, Auffangwannen, etc. – Alles was für den kompletten Produktionsprozess nötig ist wurde auf engstem Raum untergebracht (siehe Abbildung 9).

Aufbau einer Chemieanlage im Containerformat

„Klein, aber oho“: alles, was für den kompletten Produktionsprozess nötig ist, ist auf engstem Raum untergebracht



3

Additive Fertigung: So wird's gemacht!

Schneiden, Fräsen und Bohren sind sogenannte „subtraktive Fertigungsverfahren“, denn dabei wird ein Objekt erzeugt, indem von einem größeren Teil Material entfernt wird. Bei „additiven Fertigungsverfahren“ hingegen entsteht das neue Objekt, indem es, einem digitalen Bauplan (CAD-Datensatz) folgend, Schicht für Schicht aufgebaut wird.

Das funktioniert heute mit Kunststoffen und Metallen in der Praxis bereits so gut, dass man komplette Endprodukte erzeugen kann. Deshalb spricht man auch von „Rapid Manufacturing“ (schneller Fertigung).

Additive Fertigung erzeugt hochkomplexe Formen, die mit herkömmlichen Verfahren nur schwer oder gar nicht produzierbar sind (siehe Abbildung 10). Sie ist extrem materialsparend, weil nur das Material verwendet wird,

das später auch im fertigen Produkt enthalten ist. Im Gegensatz zu den subtraktiven Verfahren entstehen keine nennenswerten Abfälle durch Schleifen, Fräsen oder Spanen.



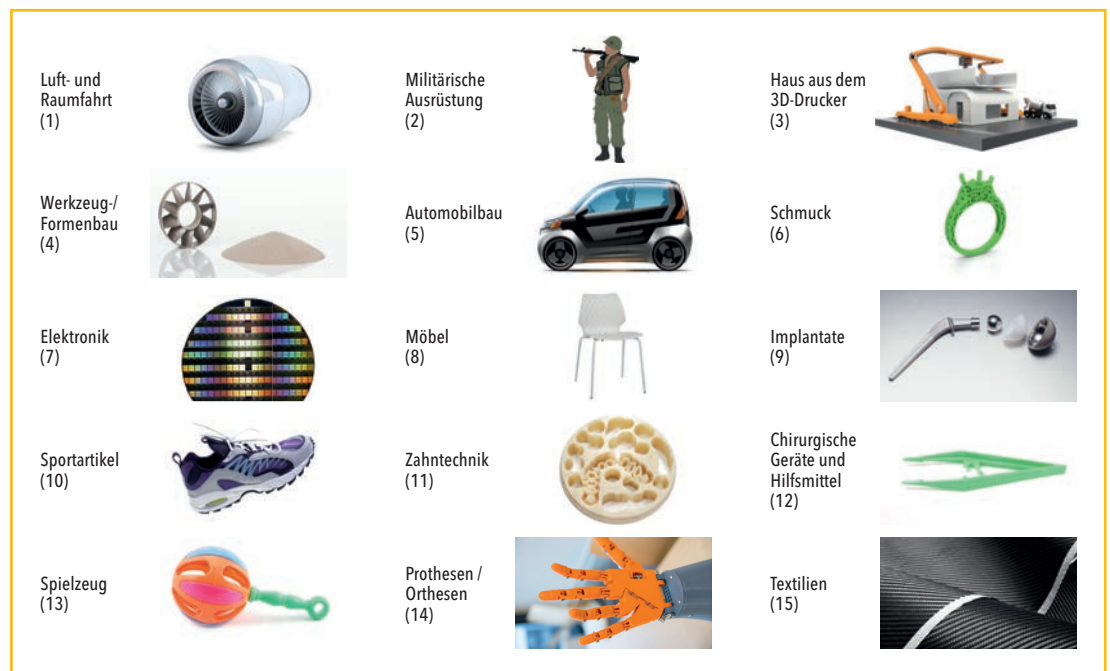
### Das ist 3D-Druck

Im öffentlichen Sprachgebrauch hat sich „3D-Druck“ für alle additiven Fertigungsverfahren eingebürgert. Fachleute verstehen darunter allerdings nur eine bestimmte Methode, bei der ausgewählte Bereiche einer pulverbeschichteten Oberfläche über einen Druckkopf mit Bindemittel benetzt werden. Die Partikel an der benetzten Stelle werden fest miteinander verbunden. Dann kommt eine weitere Schicht Pulver darüber, der Druckkopf benetzt die ausgewählten Stellen und der Vorgang beginnt von vorn.

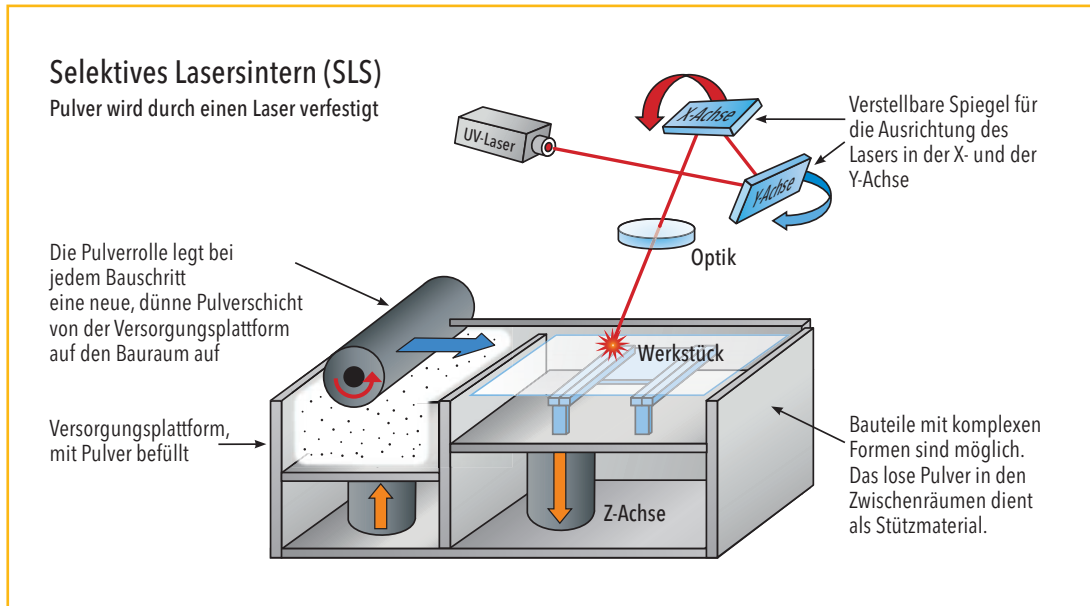


ABBILDUNG 10

### Beispiele für Produkte aus dem 3D-Drucker



Phasen der additiven Fertigung am Beispiel des pulverbasierten Lasersinterns

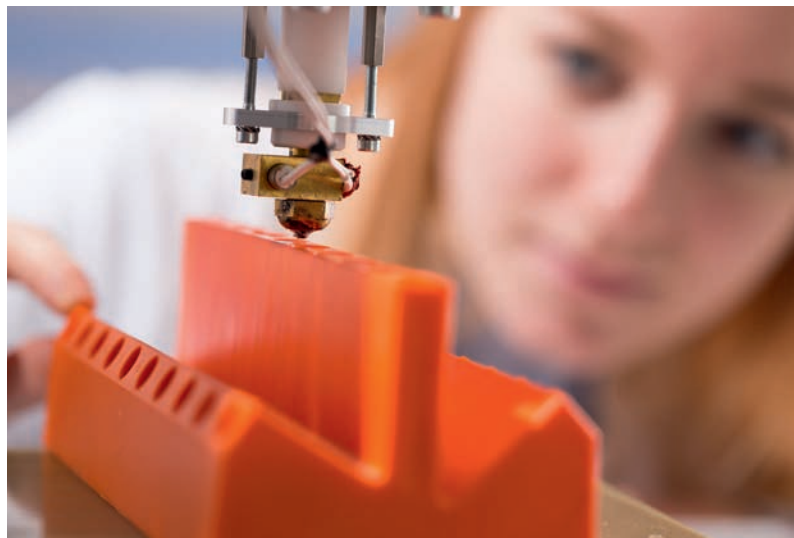


Ohne Bindemittel funktioniert das auch

- Beim Laserstrahlsintern wird ein Polymergranulat oder eine Polymerlösung auf einem Träger mit einem Laser lokal geschmolzen und härtet an der belichteten Stelle aus.
- Im Fall des Laserstrahlschmelzens geschieht dieser Vorgang mit Metallpulver. Für die Herstellung der nächsten Schicht wird der Träger dann um ein kleines Stück (zum Beispiel 100 Mikrometer) abgesenkt (siehe Abbildung 11).
- Das Extrusionsverfahren schließlich nutzt einen Kunststofffaden, der durch eine beheizte Düse geleitet und an der gewünschten Stelle hochdosiert auf ein Trägermaterial aufgeschmolzen wird.

Neue Impulse aus der Forschung

Anfang 2015 ist es deutschen Forschern erstmals gelungen, für die additive Fertigung von Kunststoffen ein automatisiertes Herstellungsverfahren zu etablieren, das nicht in Einzelschritten, sondern kontinuierlich abläuft. Der Trick: Anstelle einer Trägerplatte verwendeten sie eine drehbare Walze, die in ein Polymerbad eintaucht. Mittels verschiedener Lichtquellen wird der flüssige Kunststofffilm auf ihrer Oberfläche mittels Photopolymerisation\* ausgehärtet.



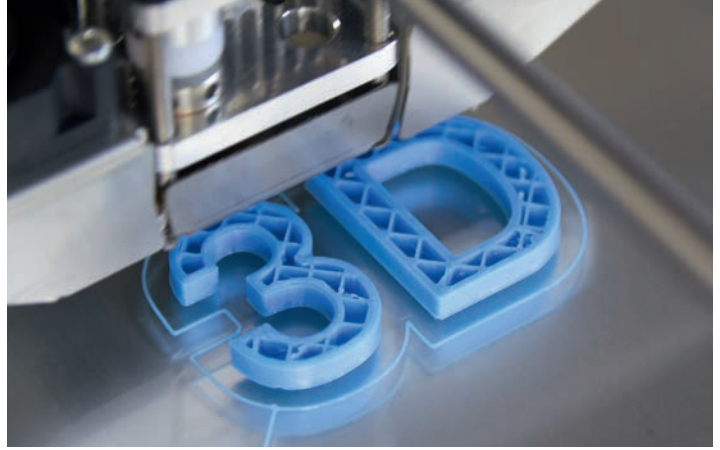


TABELLE 1

### Ausgangsstoffe für additive Fertigung – heute und morgen

| notwendige Eigenschaftsverbesserungen heute genutzter Werkstoffe | zukünftig zu erschließende Werkstoffgruppen                        |
|--|--|
| Brandschutz  | technische Thermoplaste  |
| elektrische Isolationseigenschaften                              | natürliche und organische Werkstoffe                               |
| Alterungsverhalten   | biokompatible, biologisch abbaubare Werkstoffe                     |
| Reproduzierbarkeit der Werkstoffeigenschaften                    | Nanowerkstoffe<br>Keramik<br>farbige Werkstoffe<br>Metallkomposite |

### HINWEIS

#### Das Plus an Wissen über additive Fertigung

Bereits 1983 wurde in den USA der erste 3D-Drucker entwickelt, und auch einzelne deutsche Unternehmen stellen ihre Produkte mit diesem Verfahren zum Teil schon seit 25 Jahren her. Durch technologische Weiterentwicklungen ist es aber erst in den letzten Jahren möglich geworden, 3D-Drucker immer breiter einzusetzen. Auch in der Großindustrie hat die additive Fertigung inzwischen ihren festen Platz, beispielsweise in der Luftfahrtbranche. Flugzeugbauteile aus Metall können durch den Einsatz dieses Verfahrens um 30 bis 55 Prozent leichter werden. Im Fertigungsprozess werden bis zu 90 Prozent an Rohmaterial eingespart.

Daraus darf man aber nicht schließen, dass der 3D-Druck herkömmliche Herstellungsverfahren (etwa das Spritzgießen von Kunststoffen) in Zukunft gänzlich verdrängen

wird. Dafür ist die additive Fertigung nämlich zu teuer, zu langsam und deshalb für die Großserienproduktion untauglich. Außerdem stößt sie an ihre Grenzen, wenn Bauteile aus mehreren Materialien hergestellt werden sollen. Und schließlich bedingt die Herstellung „Schicht um Schicht“, dass erzeugte Objekte oft noch geschliffen, poliert oder sogar spezialbeschichtet werden müssen, bevor man sie verwenden kann.

Clevere Chemiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker werden in Zukunft auch diese Hürden überwinden. Analysten sind sich da bereits ganz sicher, sie schätzen den weltweiten Markt für additive Fertigungsverfahren im Jahr 2023 auf 7,7 Milliarden Euro (zum Vergleich: 2,9 Milliarden US-Dollar in 2014).

## Beispiel

### 3D-Druck von Keramik

Nicht nur für Werkstoffe wie Silikon, Kunststoff oder Metall haben additive Fertigungsverfahren schon in der industriellen Produktion Einzug gehalten. Auch komplexe Keramikprodukte im Millimeter- bis Zentimetermaßstab, etwa für die Zahnmedizin, können heute additiv hergestellt werden. Als Grundmaterial dienen hierbei feine Pulver, beispielsweise aus Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid oder Hydroxylapatit.

Diese werden mit einem lichtempfindlichen Harz als Bindemittel vermischt, das mit einem Laser oder einer Reihe von LED-Lampen zur Aushärtung gebracht wird („Lithografie“). Ist das als „Grünling“ bezeichnete Rohprodukt fertig, wird es einer Temperaturbehandlung unterzogen. In einem als „Entbinderung“ bezeichneten Prozess löst sich dabei das Harz aus dem Formkörper heraus. Beim „Sintern“ werden die Keramikteilchen fest miteinander verbunden. Danach kann die Oberfläche noch mit einer Lasur überzogen werden. Die so erzeugten Produkte unterscheiden sich von herkömmlich gefertigten in den meisten Eigenschaften so gut wie gar nicht.



#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

##### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 3: Verfahrens- und Prozessinnovationen

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 3 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 3.1: Fabriken der Zukunft – Chemieanlagen im Containerformat (SI/SII)

Aufgabe 3.2: Produkte aus dem 3D-Drucker (SI/SII)

Aufgabe 3.3: Quiz (SI/SII)

## 4. Gesundheit: Große Erfolge beginnen im Kleinen

Mit den Erkenntnissen aus der Chemie hat die Medizin in den vergangenen 120 Jahren immense Fortschritte gemacht. Insbesondere die strukturelle und funktionelle Charakterisierung der Nukleinsäuren, der Proteine und zahlreicher Stoffwechselprodukte öffneten die Tür zu einem wesentlich präziseren Verständnis von Krankheitsursachen und ebneten den Weg für wirksamere Diagnose- und Therapieverfahren.

Das Erbgut des AIDS-Erregers, des HI-Virus, ist, wie das fast aller humanpathogener Viren, vollständig entschlüsselt. Man kennt die meisten molekularen Vorgänge, die sich bei einer Infektion mit dem Erreger außerhalb und innerhalb der menschlichen Zellen abspielen. Mit diesem Wissen haben Wissenschaftler erfolgreiche Eindämmungsstrategien entwickelt, die an den Schlüsselstellen der Virusvermehrung greifen. Auch wenn eine Heilung von der Krankheit bisher noch nicht gelungen ist, kann Millionen von betroffenen Menschen mittlerweile ein vergleichsweise normales Leben ermöglicht werden.

Neben Infektionskrankheiten plagen vor allem Krebs und Herz-Kreislauf-Leiden und Erkrankungen des zentralen Nervensystems unsere immer älter werdende Gesellschaft. Bei der Bekämpfung dieser Krankheiten weckt der Ansatz der personalisierten Medizin große Hoffnungen. Medikamente sollen dabei nicht nur passend zur Krankheitsursache, sondern auch mit Blick auf genetische Besonderheiten des jeweiligen Patienten ausgewählt bzw. dosiert werden. Neue Materialien als Hilfsstoffe in Medikamenten sind ein weiteres Innovationsfeld in der Medizin. So helfen beispielsweise spezielle Polymere dabei, Pharmawirkstoffe oder auch neuartige Kontrastmittel präziser an ihren Zielort zu bringen.

### AIDS: ein weltweites Problem

1981 wurde AIDS erstmals von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) als eigenes Krankheitsbild anerkannt. Das englische Kürzel steht für „Erworbenes Immunschwäche-Syndrom“ und bezeichnet das am weitesten fortgeschrittene Stadium eines komplexen Krankheitsbildes, das vom Humanen Immundefizienz-Virus (HIV) ausgelöst wird. HI-Viren werden überwiegend durch

ungeschützten sexuellen Kontakt übertragen. Die Viren befallen menschliche Abwehrzellen (vor allem T-Helferzellen\*), vermehren sich in ihnen und zerstören sie bei der Freisetzung neuer Viruspartikel. Je mehr Viren im Blut zirkulieren, desto geringer wird die Zahl der T-Helferzellen. Patienten sind dann ab einem bestimmten Stadium opportunistischen Infektionen durch Viren, Bakterien, Pilze und Einzeller ausgesetzt, gegen die sich ein gesunder Körper problemlos wehren kann. Auch bestimmte Tumorerkrankungen (beispielsweise das Kaposi-Sarkom, eine Hautkrebsform) sind für das Krankheitsbild AIDS typisch.

Seit dem ersten dokumentierten Fall einer AIDS-Erkrankung im Jahr 1959 sind weltweit mehr als 35 Millionen Menschen an AIDS gestorben (Stand: November 2017, siehe [www.unaids.org/sites/default/files/media\\_asset/UNAIDS\\_FactSheet\\_en.pdf](http://www.unaids.org/sites/default/files/media_asset/UNAIDS_FactSheet_en.pdf)).

### HIV: molekularer Steckbrief eines Killers

Viren sind winzige biologische Partikel, die überwiegend aus Erbmaterial, Eiweißstoffen (Proteinen) und manchmal auch noch aus Fettstoffen (Lipiden) bestehen. Sie benötigen die biochemischen Leistungen eines Wirtsorganismus, um sich zu vermehren. Sobald Viren in eine Wirtszelle eingedrungen sind, wird dort das Viren-Erbgut entweder ins Zell-Erbgut eingefügt und dann sofort oder zeitversetzt abgelesen, was die Zelle dazu zwingt, neue Viren zusammenzubauen und freizusetzen.

Unter dem Elektronenmikroskop offenbart das HI-Virus seinen Aufbau: Man erkennt eine kleine Hohlkugel aus einer Lipiddoppelmembran, die ringsum mit noppenförmigen Oberflächenproteinen bedeckt ist. In der Kugel, deren Innenseite ebenfalls mit Eiweißstoffen besetzt ist, liegt ein kegelförmiges „Core-Partikel“ aus verschiedenen Proteinen, die für Strukturgebung und die Vermehrung des Viruspartikels zuständig sind, sowie zwei Kopien eines einzelsträngigen RNA-Moleküls, die alle Virusgene enthalten. Das HI-Virus gehört zu den Retroviren, das bedeutet: Seine RNA\* wird in der Wirtszelle in DNA\* umgeschrieben, die dann die Kontrolle übernimmt.

Der Vermehrungszyklus des HI-Virus läuft in folgenden Schritten ab (siehe Abbildung 12):

### 1. Andocken

Mit einem seiner Hüllproteine dockt das Virus an einem bestimmten Rezeptor einer T-Helferzelle oder eines Makrophagen (Fresszelle) an.

### 2. Fusion

Sobald das Virus fest an die Zellmembran des Wirts gebunden ist, verändert sich die räumliche Struktur der Bindungspartner, und die Verschmelzung mit der Zellmembran (Fusion) setzt ein.

### 3. Reverstranskription

Nun muss das Virus sein RNA-Genom in DNA umschreiben. Das Werkzeug dafür hat es „praktischerweise“ in Form des Enzyms\* Reverse Transkriptase (RT) mitgebracht. Die Reverse Transkriptase arbeitet extrem schnell, sie leistet rund 10 Milliarden Virus-RNA-Übersetzungen pro Tag. Allerdings hat sie kein eingebautes Fehlerkontrollsystem („proofreading“), was zu häufigen Abschreibfehlern und deshalb zu einer sehr hohen genetischen Vielfalt der neu produzierten Viren führt. Hier wird die Grundlage für eine „Evolution im Zeitraffer“ gelegt.

### 4. Integration

Ein weiteres virales Enzym, die HIV-Integrase, baut anschließend die neue DNA-Kopie stabil in das Erbgut der Wirtszelle ein. Dieses Provirus ist nun arbeitsfähig. Es kann über Jahre in einem Ruhezustand verbleiben – oder umgehend sein zerstörerisches Werk beginnen.

### 5. Produktion neuer Viruspartikel

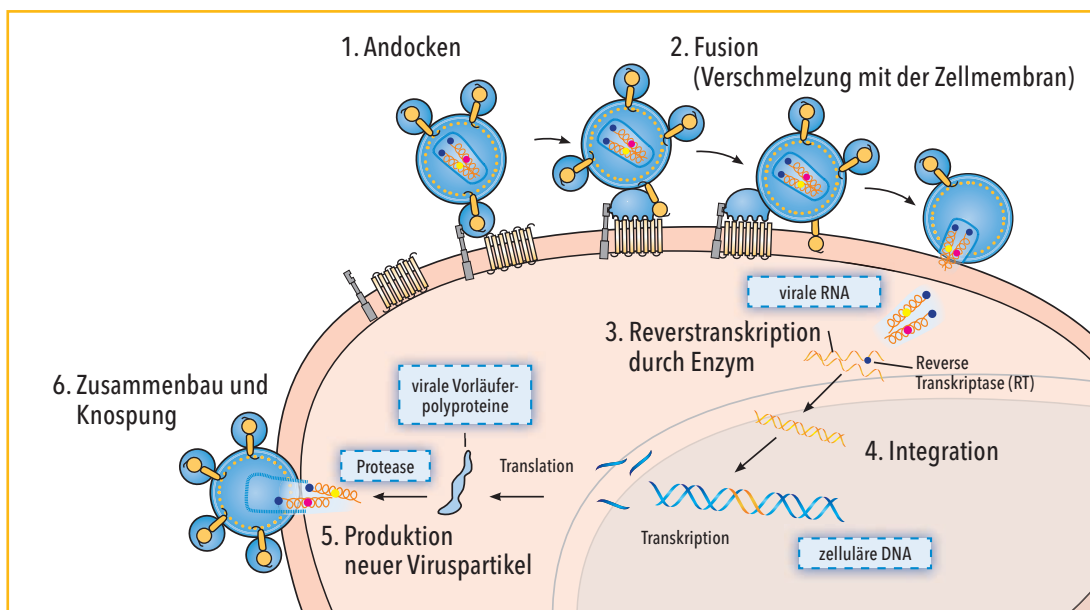
Die verschiedenen Gene auf dem Provirus werden in kontrollierter Weise aktiv; unter ihrer Anleitung werden alle Virusproteine synthetisiert. Diese liegen teilweise zunächst noch als unreife Tandemprodukte auf einer langen Polypeptidkette vor, die auseinandergeschnitten werden muss. Diesen Part übernimmt das Enzym HIV-Protease. Erst danach können infektiöse Viruspartikel gebildet werden.

### 6. Zusammenbau und „Knospung“

An der zytoplasmatischen Seite der Zellmembran werden die neuen Viruspartikel zusammengebaut und in das extrazelluläre Milieu abgeschnürt. In dieser Phase wird die Wirtszelle so massiv beschädigt, dass sie stirbt.

ABBILDUNG 12

Der Vermehrungszyklus des HI-Virus



### Errungene Siege und (doch noch) offene Fragen

Bereits 1985 war der erste AIDS-Test auf Basis eines Nachweises patienteneigener Antikörper\* verfügbar. Darüber hinaus kommt heute für die Diagnostik auch die Polymerase-Kettenreaktion\* (PCR) routinemäßig zum Einsatz. Mit ihr lässt sich mittlerweile sogar die Anzahl der viralen RNA-Kopien pro Milliliter Blut bestimmen. Derart präzise Diagnoseverfahren ermöglichen es dem behandelnden Arzt, eine für den Patienten hinsichtlich Zeitpunkt und Art möglichst schonende Therapie zu wählen.

Noch 1994 bedeutete für einen zwanzigjährigen Patienten der Befund „HIV-positiv“ eine Lebenserwartung von meist nur noch wenigen Monaten. Heute können Menschen mit HIV-Infektion ein weitgehend normales Leben führen und im Durchschnitt sogar 70 Jahre alt werden. Das ist den Forschungserfolgen pharmazeutischer Unternehmen zu verdanken: Heute können die Ärzte auf mehr als 35 Originalpräparate und viele Generika, die auf 29 verschiedenen Wirkstoffen mit sieben verschiedenen Wirkungsweisen basieren, zurückgreifen (Stand: November 2017).

So sehr man den Errungenschaften der Chemie heute vertrauen kann, liegt der Erfolg einer HIV-Therapie maßgeblich auch in den Händen der Patienten („Compliance“). Um Resistenzentwicklungen der HI-Viren entgegenzuwirken, müssen die Medikamente regelmäßig eingenommen werden – auch wenn sie unangenehme Nebenwirkungen haben (beispielsweise Übelkeit, Durchfall, Benommenheit). Diese Nebenwirkungen weiter zu senken ist tägliches Bestreben der Pharmaforschung.

### Aufgaben für die Zukunft

Die Therapien von heute verhindern, dass die Krankheit AIDS ausbricht – trotz bestehender Infektion. Sie bewirken keine Heilung. Zukünftige Therapien sollen und müssen entweder das Eindringen der Viren in die Immunzellen gänzlich verhindern oder ruhende Proviren\* bzw. deren Wirtszellen aufspüren und vernichten.

### Beispiel

#### Die „glorreichen Sieben“ im Kampf gegen HIV

Sieben Wirkstrategien stehen der modernen Medizin heute bereits zur Verfügung, um die Virusvermehrung im Organismus des Patienten zu unterdrücken und eventuell entstandene Resistenzen zu durchbrechen (siehe Abbildung 13).

##### 1. Angriffspunkt: Andockprozess

Sogenannte CCR5-Antagonisten hemmen die Wechselwirkung zwischen dem Virushüllprotein gp120 und dem Rezeptor CCR5 auf der T-Helferzelle. Dadurch kann das Virus nicht erfolgreich an der Wirtszelle andocken und in sie eindringen.

##### 2. Angriffspunkt: Verschmelzung von Virus und Zielzelle

Fusionshemmer sind kurze Polypeptide\*, die die Wechselwirkung der Oberflächenproteine des Virus mit den T-Helferzellen-Rezeptoren derart stören, dass es nicht zur Verschmelzung der Membranen kommt.

##### 3. Angriffspunkt: Reverse Transkriptase (I)

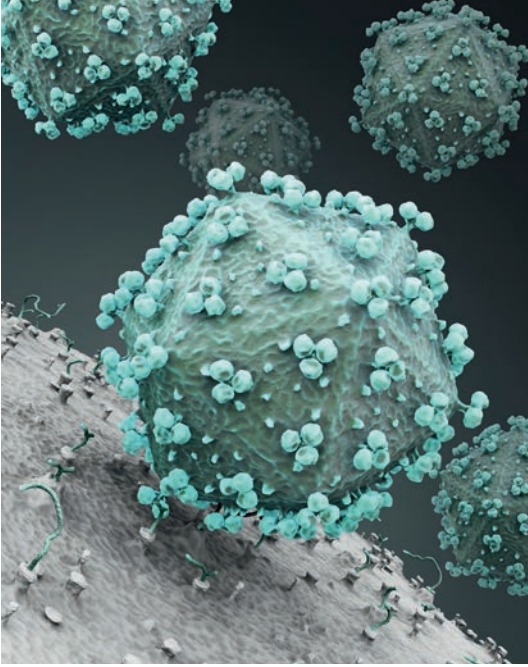
Nukleosidische Wirkstoffe\* ähneln den DNA-Bausteinen, die dem Enzym Reverse Transkriptase als Substrate\* dienen. Anstelle der 3'OH-Gruppe befindet sich an der Desoxyribosestruktur aber eine andere chemische Gruppe, die zum Kettenabbruch führt. Somit kann das Enzym keine vollständige Virus-DNA synthetisieren.

##### 4. Angriffspunkt: Reverse Transkriptase (II)

Nichtnukleosidische Wirkstoffe ähneln den nukleosidischen überhaupt nicht. Sie binden in Nachbarschaft zum aktiven Zentrum des Enzyms Reverse Transkriptase und blockieren die funktionelle Veränderung der Proteinstruktur (allosterische Hemmung).

##### 5. Angriffspunkt: Einbau der Virus-DNA in das Genom der Wirtszelle

Integrasehemmer beispielsweise verhindern sowohl die Bindung der HIV-Integrase an das Genom der Wirtszelle als auch, dass zwischen Virus-DNA und Wirts-DNA ein stabiler Kontakt hergestellt werden kann.



HINWEIS

### HIV-Therapien: Wann kommt die Impfung?

Gegen Kinderlähmung, Hirnhautentzündung und Grippe können wir uns impfen lassen. Warum nicht gegen HIV? Wieder ist die Wandelbarkeit des Erregers schuld. Bis das menschliche Immunsystem gegen eine biologische Struktur des Virus „scharfgemacht“ ist, kommt diese in der Viruspopulation wegen ihrer hohen Mutationsrate und ihrer genetischen Vielfalt kaum bis gar nicht mehr vor. Aufgrund der Bildung von „Reservoirs“ mit schlummernden Viren im Körper sind nie alle Erreger für die Immunantwort erreichbar.

Die forschenden Pharmaunternehmen haben in den vergangenen Jahrzehnten immense Anstrengungen unternommen, damit ihnen ein Durchbruch gelingt. Im Jahr 2015 befanden sich gleich 25 neue, experimentelle HIV-Impfstoffe in der Erprobung. Solange diese Arbeiten nicht von Erfolg gekrönt sind, können sich die meisten Menschen vor einer Ansteckung nur auf eine Weise wirkungsvoll schützen: Safer Sex.

#### 6. Angriffspunkt: HIV-Protease (I)

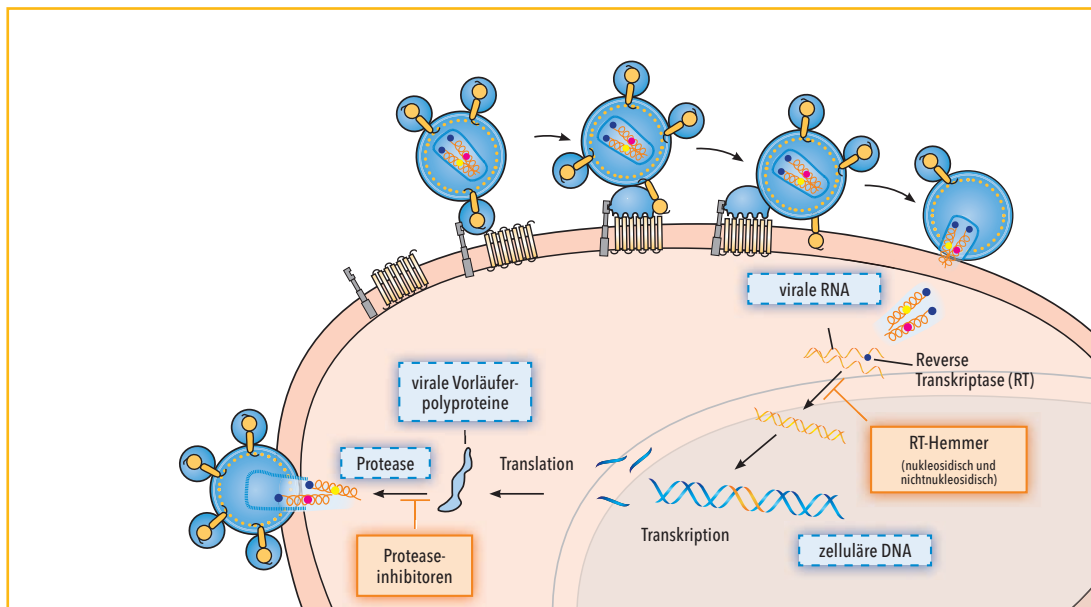
HIV-Protease-Inhibitoren sind kurze, modifizierte Peptide. Sie ähneln stark den Proteinsequenzen an den Schnittstellen der Virusprotease im Vorläuferpolypeptid der Hüllproteine. Aufgrund kleiner chemischer Strukturunterschiede werden sie aber nicht gespalten, sondern bleiben an das aktive Zentrum des Enzyms gebunden und blockieren es. Deswegen kann kein infektiöses Viruskapsid mehr entstehen.

#### 7. Angriffspunkt: HIV-Protease (II)

CYP-Hemmer („Booster“) verstärken die Wirksamkeit von HIV-Protease-Hemmern, indem sie das Enzym Cytochrom P450 blockieren, das die HIV-Protease-Hemmer in der Leber abbaut.

ABBILDUNG 13

### Zielorte und Wirkstrategien der HIV-Therapie



## Personalisierte Medizin – die Zukunft hat schon begonnen

Langsam aber stetig etabliert sich im modernen Gesundheitswesen ein neues Konzept: die sogenannte personalisierte Medizin. Ihr Grundgedanke: für jeden Patienten das bestmögliche Medikament auszuwählen. Ihre Besonderheit: Diagnose und Therapie sind optimal miteinander verzahnt (siehe Abbildung 14).

### Biomarker geben den Ausschlag

Natürlich hat der Arzt in der Vergangenheit bei der Wahl der richtigen Behandlung auch meist mehr als nur den diagnostischen Befund zugrunde gelegt: Er hat zusätzlich Faktoren wie beispielsweise das Lebensalter des Patienten oder die familiäre Vorgeschichte in seine Entscheidung einfließen lassen. Heute aber macht es die fortgeschrittene Diagnostik möglich, genetische, molekulare und zelluläre Besonderheiten des Patienten einzubeziehen. Diese bezeichnet man als „Biomarker“. Durch Analyse der Biomarker im Rahmen eines Vortests kann der Mediziner erkennen, ob ein bestimmtes Medikament bei einem Patienten überhaupt wirkt beziehungsweise ob er es verträgt.

### Wie individuell ist „personalisiert“?

Der Begriff „personalisiert“ kann dazu verleiten zu glauben, Medikamente würden nun für einzelne Individuen entwickelt. In der Praxis findet dies aber nur äußerst selten statt, denn abgesehen davon, dass solche Medikamente sehr kostenintensiv sein müssten, ist eine absolut individuelle Therapie meist auch gar nicht notwendig. Die genetischen Variationen, die bei Menschen Einfluss auf Verträglichkeit und Wirksamkeit von Pharmawirkstoffen haben, kommen in ganzen Bevölkerungsgruppen vor. Die personalisierte Medizin unterteilt (stratifiziert) also den Kreis aller Patienten mit einer bestimmten Erkrankung entsprechend der verschiedenen Biomarker in Untergruppen. Synonym verwendet die Fachwelt deshalb auch den Begriff „stratifizierte Medizin“.

### Neues Konzept auf Wachstumskurs

Für spezielle Biomarker werden eigene molekular-diagnostische Nachweissysteme angeboten und gemeinsam mit dem optimal geeigneten Präparat empfohlen. Diese Paarung aus Diagnostik und Therapeutikum nennt man fachsprachlich „Companion Diagnostics“. Anfang 2018 waren in Deutschland 51 verschiedene Wirkstoffe für Anwendungen der personalisierten Medizin erhältlich, hauptsächlich zur Behandlung von Krebsleiden. Für 46 davon ist ein diagnostischer Vortest vorgeschrieben, für fünf weitere wird er empfohlen. Da führende Pharmafirmen die stratifizierte Medizin in ihre Zukunftsstrategien integriert haben, dürfte das Angebot entsprechender Medikamente jährlich wachsen (siehe Tabelle 2).



## Beispiel

### Hautkrebs gezielter behandeln

Sich regelmäßig der Sonne oder auch UV-Strahlung im Solarium auszusetzen birgt erhebliche gesundheitliche Risiken, denn die energiereiche ultraviolette Strahlung kann das Erbgut in den Pigmentzellen so schädigen, dass diese zu Krebszellen entarten und einen wuchernden Tumor (Melanom) bilden. Wird ein Melanom früh genug erkannt, ist es operativ gut zu entfernen. Gefährlich wird es erst, wenn sich Krebszellen aus dem Tumor lösen und über den Blutstrom in andere Organe gelangen. Dann bilden sie dort Tochtergeschwüre (Metastasen).

Forscher haben herausgefunden, dass über 90 Prozent aller Patienten mit metastasierendem Melanom in den Krebszellen eine ganz bestimmte genetische Veränderung (Mutation) im Bauplan für ein wichtiges „Schalter-eiweiß“ tragen. Diese bewirkt, dass das Eiweiß quasi die Kontrolle verliert und grünes Licht für ungehemmtes Zellwachstum gibt. Die Wissenschaftler haben daraufhin einen Hemmstoff identifiziert, der diesen Kontrollverlust

wieder rückgängig macht und obendrein dazu führt, dass die Krebszellen ein Selbstzerstörungsprogramm einleiten.

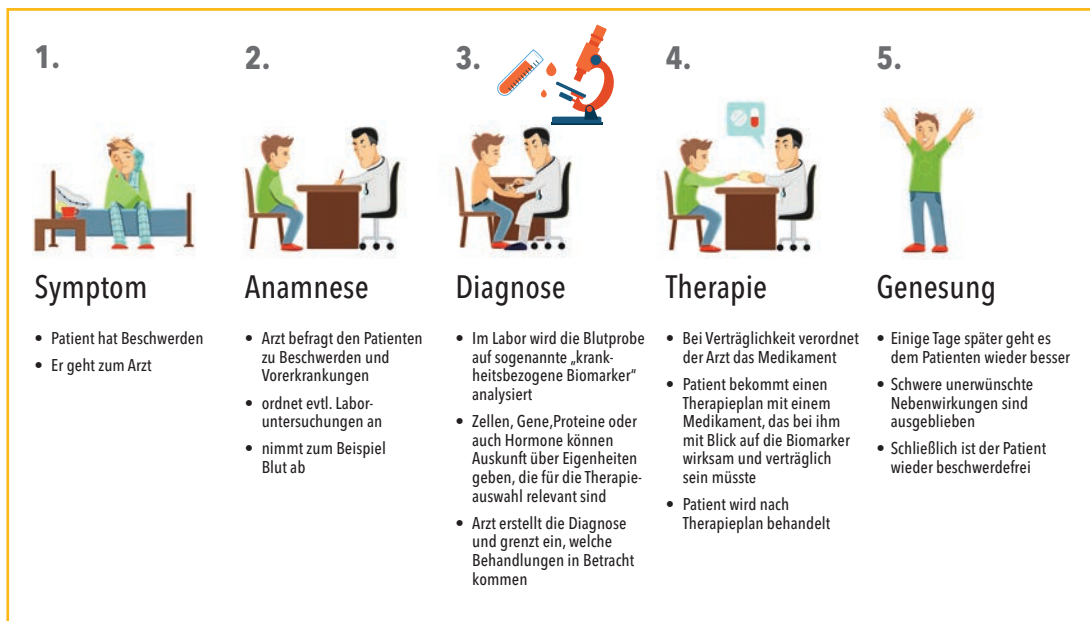
Ein Fall für die personalisierte Medizin: Patienten mit der besagten Tumorerkrankung werden von ihrem Arzt anhand einer kleinen Gewebeprobe des Tumors einem Gentest unterzogen. Weist der Test die spezielle Mutation\* nach, wird ihnen der Hemmstoff, der seit 2012 zugelassen ist, als Tablette verschrieben. Diese neue Behandlung steigert nachweislich die Überlebensrate der Krebspatienten.



4

ABBILDUNG 14

### Personalisierte Medizin in der täglichen Praxis



Erkrankungen mit etablierten Ansätzen der personalisierten Medizin (Beispiele)

Der Einsatz eines Diagnostiktests hilft bei der Entscheidung, welche Therapie für den Patienten die beste ist.

| Krankheitsgebiet            | Wirkstoff   | gekoppelter Diagnostiktest                | Pflichttest seit |
|-----------------------------|-------------|---|------------------|
| HIV-Infektion               | Abacavir    | Bluttest auf medikamentöse Nebenwirkungen | 2008             |
| Lungenkrebs                 | Afatinib    | Gewebetest auf Wirksamkeit                | 2013             |
| Darmkrebs                   | Cetuximab   | Gewebetest auf Wirksamkeit                | 2008             |
| Hautkrebs (Melanom)         | Cobimetinib | Gewebetest auf Wirksamkeit                | 2015             |
| Akute lymphatische Leukämie | Dasatinib   | Bluttest auf Wirksamkeit                  | 2006             |
| Brustkrebs                  | Everolimus  | Gewebetest auf Wirksamkeit                | 2012             |

### Polymere: Türöffner für innovatives Wirkstoffmanagement

Laut Weltgesundheitsorganisation nimmt die Hälfte aller Menschen ihre Medikamente entweder in der falschen Menge oder zu einem falschen Zeitpunkt ein. Nur eine Tablette pro Tag nehmen zu müssen und trotzdem die gleiche Wirkung zu erzielen wie bei mehreren über den Tag verteilten Einnahmen kommt den Patienten da sehr entgegen.

#### Spezielle Filmbeschichtungen

Copolymere aus der Klasse der Polymethacrylate sowie Polymere der Milch- und der Glykolsäure in verschiedenen Mischungen und Seitengruppenmodifikationen machen das möglich. Führende deutsche Chemieunternehmen haben bereits in den Fünfzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts aus solchen Stoffen spezielle Filmüberzüge für Tabletten entwickelt.

Manche Wirkstoffe werden im Körper sehr schnell abgebaut. Dann muss ihre Abgabe aus der Tablette kontinuierlich, aber in kleinen Mengen erfolgen. Damit das gelingt, werden die Mischung und die Modifikation der

Polymere so gewählt, dass der Schutzfilm um die Tablette im Dünndarm pH-abhängig durch das umgebende Wasser aufquillt und durchlässig wird. Nun wird der Wirkstoff im Inneren der Tablette langsam und stetig aufgelöst. Er gelangt durch die aufgequollene Polymerschicht in kleiner Dosierung nach außen und wird über die Darmwand in den Blutstrom aufgenommen.

Die Polymerfilme bewirken je nach chemischer Zusammensetzung, dass sich die Tablette erst auflöst, wenn der pH-Wert der Umgebung stimmt. Das kann im Magen bei einem pH-Wert zwischen 1 bis 5 sein, im Dünndarm bei 5,5 oder im Dickdarm bei 7.

Viele Wirkstoffe werden entweder von der Magensäure zerstört oder aber sie greifen die Magenschleimhaut an. Dann muss die Tablettenbeschichtung magensaftresistent sein und darf sich erst im Darm auflösen. Und noch etwas Gutes haben die cleveren Beschichtungen: Sie maskieren einen unangenehmen Geschmack oder Geruch der Wirkstoffe und machen so die Einnahme nicht zur „bitteren Pille“.

## Polymere: weitere Anwendungen

Wirkstoffe können aus kleinen chemischen Molekülen, aber auch aus DNA, RNA, Peptiden oder Proteinen bestehen. Diese verschiedenen Substanzen stellen die Pharmaforscher bei der Verabreichung als Medikament vor zum Teil große Herausforderungen; beispielsweise, weil sie bei der Injektion in den Blutstrom das Immunsystem aktivieren, für eine Wirkung zu schnell abgebaut werden oder einfach schwer löslich sind. In diesen Fällen helfen Polymersysteme verschiedenster Konstruktionen dabei, die Wirkstoffe zu transportieren, zu schützen, ihre Wirkung zu verstärken, sie an den Zielort zu bringen und kontrolliert abzugeben.



### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 4: Gesundheit

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 4 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 4.1: AIDS – ein weltweites Problem (SI/SII)

Aufgabe 4.2: Behandlung von Darmkrebs – ein Beispiel für personalisierte Medizin (SII)

Experiment 4.1: Zielgerichteter Wirkstofftransport durch spezielle Tablettenüberzüge (SII)

Aufgabe 4.3: Kontrollierte Wirkstofffreisetzung durch „intelligente Polymere“ (SI/SII)

„Wasserstoff und Sauerstoff werden für sich oder zusammen  
zu einer unerschöpflichen Quelle von Wärme und Licht werden,  
von einer Intensität,  
die die Kohle überhaupt nicht haben könnte;  
das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“

Jules Verne, „Die geheimnisvolle Insel“, 1875

## 5. Energie: Innovative Materialien für eine nachhaltige Energienutzung

Die Energiewende bedeutet eine grundlegende Abkehr von einer ressourcenverbrauchenden, nichtnachhaltigen Energiewirtschaft und hin zu einer Energiegewinnung, die sich weitgehend auf erneuerbare Energieträger stützt. Dabei kommen Materialinnovationen auf allen Ebenen eine entscheidende Bedeutung zu. Durch den Einsatz von Photovoltaik beispielsweise wurden allein im Jahr 2014 in Deutschland 25 Millionen Tonnen Kohlenstoffdioxid-Emissionen eingespart. Der Anteil des Solarstroms soll weiter steigen, vor allem durch eine kontinuierliche Effizienzsteigerung und Kostensenkung bei der Produktion von Solarzellen und beim Betrieb von Solaranlagen. Potential hierfür bieten auch die sogenannten „organischen Solarzellen“, die auf halbleitenden Polymeren basieren. Bei ihrer Herstellung kann auf den Einsatz seltener und teilweise toxischer Metalle verzichtet werden und sie eröffnen neue Möglichkeiten bei der Form- und Farbgebung von Solarzellen. Allerdings gilt es hier noch, den Wirkungsgrad zu steigern und die Lebensdauer zu verlängern. Viele Experten betrachten die Energiespeicherung als einen Schlüsselfaktor für das Gelingen der Energiewende, insbesondere vor dem Hintergrund der sowohl jahres- als auch tageszeitlich stark schwankenden Verfügbarkeit von Wind und Sonne. Daher wird die Zwischenspeicherung von elektrischer Energie mit Hilfe stationärer elektrochemischer Speicher eine zunehmende Rolle spielen, vor allem zum schnellen Ausgleich lokaler Lastschwankungen.

Bereits seit Jahrzehnten in Nischenanwendungen wie der Raumfahrt eingesetzt, kommen Brennstoffzellen zunehmend auch im Alltag an, sei es in Blockheizkraftwerken, in Nahverkehrsbussen oder in der Notstromversorgung für Krankenhäuser. Ein auf der Brennstoffzellentechnologie basierender Ansatz, der intensiv erforscht wird, ist das sogenannte Power-to-Gas-Verfahren\*.

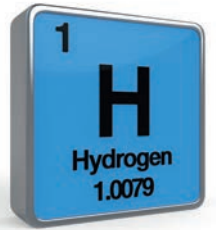
### Wasserstoff als Energieträger

Viele der Technologien, die heute für uns alltäglich sind, hat der französische Autor Jules Verne schon im 19. Jahrhundert vorweggenommen. Seine Vision dessen, was man heute als Wasserstoffwirtschaft (siehe Tabelle 3 und Abbildung 15) bezeichnen würde, ist zwar 140 Jahre später in weiten Teilen immer noch Zukunftsmusik, doch die Chancen stehen gut, dass wir sie in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zumindest teilweise Wirklichkeit werden lassen. Allerdings hat Wasserstoff nicht als Energiequelle, sondern vielmehr als Energieträger ein großes Potential. Zugute kommt ihm dabei seine Vielseitigkeit: mit Hilfe von (stationären) Brennstoffzellen lässt er sich zur Stromerzeugung verwenden, er kann mit Kohlenstoffdioxid zu Wasser und Methan, dem Hauptbestandteil von Erdgas, umgesetzt werden, und nicht zuletzt dient er in der chemischen Industrie als wertvoller Rohstoff – tatsächlich ist dies heute noch das dominierende Einsatzgebiet. Allerdings stammt der größte Teil der jährlich in Deutschland produzierten Wasserstoffmenge von etwa 20 Milliarden Kubikmetern nach wie vor aus fossilen Quellen, vor allem Erdgas.

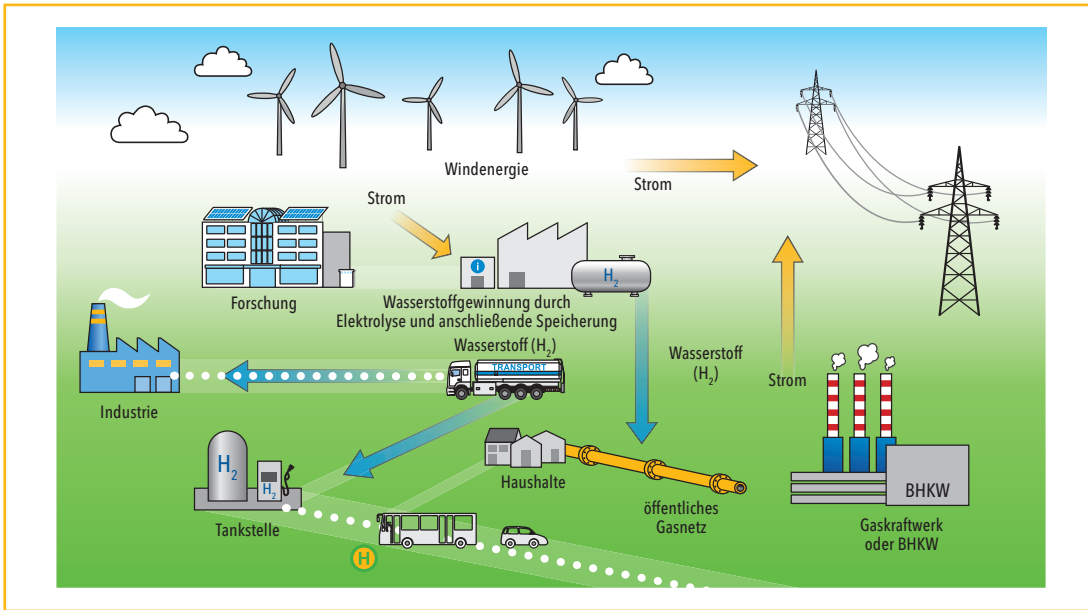
TABELLE 3

### Die wichtigsten Wasserstoffquellen in Deutschland

| Wasserstoffquelle        | Normvolumen                    |   |
|--------------------------|--------------------------------|---|
| Reformierung von Erdgas  | (6 Mrd. Nm <sup>3</sup> /a):   | $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$ ; $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$ |
| Benzinreformierung       | (2,5 Mrd. Nm <sup>3</sup> /a): | $\text{C}_8\text{H}_{18} \longrightarrow 3 \text{H}_2 + \text{C}_2\text{H}_6 + \text{C}_6\text{H}_6$  |
| Ethenherstellung         | (3,6 Mrd. Nm <sup>3</sup> /a): | $\text{C}_2\text{H}_6 \longrightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2$  |
| Chlor-Alkali-Elektrolyse | (0,9 Mrd. Nm <sup>3</sup> /a): | $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + \text{NaOH} + \frac{1}{2} \text{H}_2$                                       |



Nutzungspfade der Wasserstofftechnologie



Wasserstoff als Energiespeicher für Strom aus Windenergie

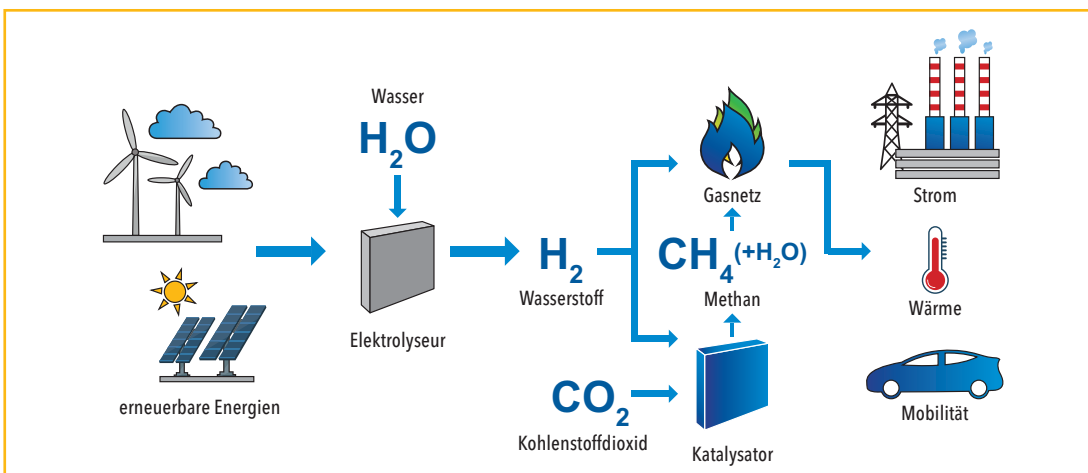
Die Nordseeküste ist eine ausgesprochen windreiche Region. Dennoch kommt es derzeit vor, dass Windkraftanlagen in bis zu 20 Prozent der nutzbaren Zeit stillstehen – aber nicht etwa, weil es zu wenig Wind gäbe, sondern weil die Aufnahmekapazität des deutschen Stromnetzes begrenzt ist.

Das könnte man ändern, indem bei Vollbetrieb der Anlagen überschüssiger Strom einfach zwischengespeichert würde, beispielsweise in Form von Gas. Ein Schlüssel zur Nutzung dieser Energie könnte zum Beispiel das „Power-to-Gas“-Verfahren sein (siehe Abbildung 16), also die elektro-

lytische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff durch Strom aus erneuerbaren Energien. Wasserstoff kann direkt in die bereits vorhandene weitverzweigte Infrastruktur des deutschen Erdgasnetzes eingespeist werden. Wasserstoff zu speichern ist aber schwierig, denn er kann nur zu maximal fünf Prozent dem Erdgas beigemischt werden. Außerdem sind ein hoher Druck von mindestens 700 bar oder aber sehr niedrige Temperaturen nötig, um sein Volumen, etwa für Autotanks, zu verringern. Man könnte den Wasserstoff vor seiner Einspeisung durch Reaktion mit Kohlenstoffdioxid oder Kohlenstoffmonooxid in Methan umwandeln (Methanisierung); In dieser Form ließe er sich vollständig und mit geringerem Druck ins Erdgasnetz einspeisen.



„Power-to-Gas“ – Strom als Gas speichern



## Beispiel Mehr Power für die Elektrolyse

Die großtechnische Wasserstoffelektrolyse wird heute von etablierten, alkalischen Elektrolyseuren geleistet (siehe Abbildung 17). In diesen Anlagen dient Kalilauge mit einer Konzentration zwischen 20 und 40 Prozent als Elektrolyt. Die Anoden- und Kathodenräume sind durch eine gasdichte Membran, die für Hydroxidionen selektiv durchlässig ist, voneinander getrennt. Problematisch bei diesen Anlagen ist ihr relativ träges Ansprechverhalten (in der Größenordnung von mehreren Minuten). Dies ist viel zu langsam für die oft wesentlich kurzfristigeren Schwankungen bei der Verfügbarkeit von Windstrom.

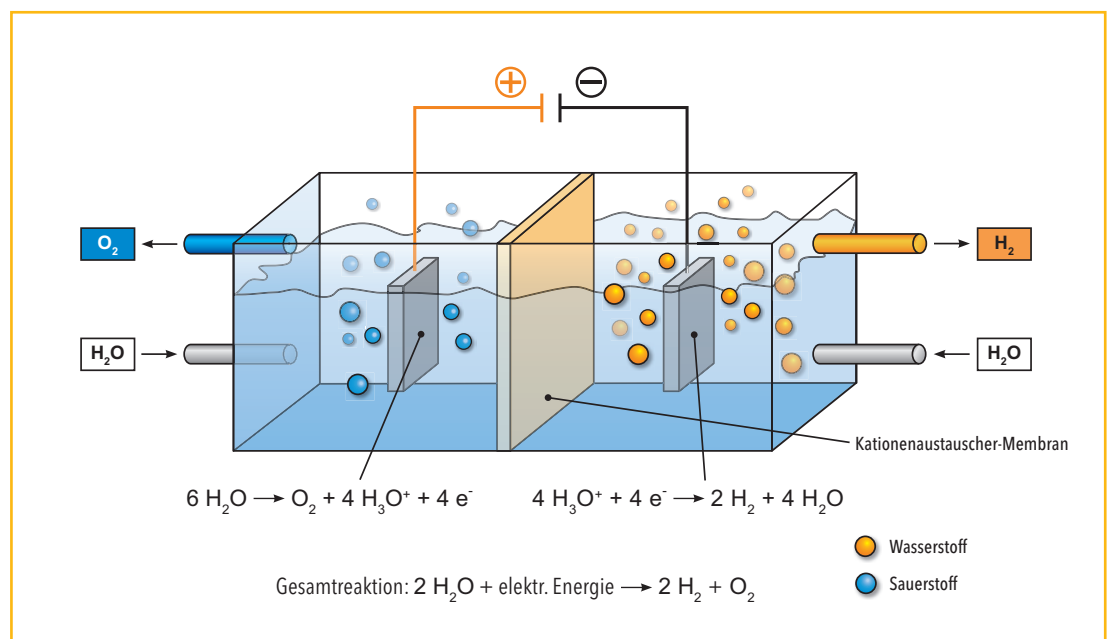
Diese Probleme hat ein deutsches Technologieunternehmen durch ein weiterentwickeltes Verfahren gelöst, die „saure Elektrolyse“. Dabei erfolgt die elektrolytische Wasserspaltung mit Hilfe von Platinmetall-Katalysatoren. Anoden- und Kathodenraum sind durch eine selektiv protonendurchlässige Membran voneinander getrennt (PEM-Membran, von engl. proton exchange membrane). Der auf Basis dieses Funktionsprinzips entwickelte PEM-Elektrolyseur reagiert nicht nur innerhalb von Milli-

sekunden, sondern er kann auch sehr variabel belastet werden – ideal, um plötzlich auftretende Lastspitzen aufzunehmen. Das Verfahren ist mittlerweile auf eine technisch einsetzbare Größe skaliert worden, auf Einheiten mit einer Nennleistung von 1,25 Megawatt und einer Spitzenleistung von 2,1 Megawatt.

Im Juli 2015 hat in Mainz eine Pilotanlage den Betrieb aufgenommen, die drei solcher Einheiten umfasst und mit Strom aus erneuerbaren Quellen gespeist wird. Der hier erzeugte Wasserstoff wird ins Gasnetz eingespeist, für industrielle Zwecke genutzt und für die Belieferung einer Wasserstofftankstelle bereitgestellt. Jede Einheit kann pro Stunde 245 Kubikmeter, bei Spitzenlast sogar 345 Kubikmeter Wasserstoff produzieren. Wird ein Dauerbetrieb bei Nennleistung angenommen, können pro Jahr etwa 270.000 Kubikmeter produziert werden. Angesichts einer Jahresproduktion von Wasserstoff in Deutschland aus konventionellen Quellen (vor allem Petrochemie) von 20 Milliarden Kubikmetern ist diese Menge noch gering. Sie könnte aber in großen Schritten wachsen, denn die für die Zukunft geplanten Elektrolyseure mit Spitzenleistungen von bis zu 100 Megawatt könnten problemlos den Stromüberschuss eines großen Windparks aufnehmen.

ABBILDUNG 17

### Ein großtechnischer Elektrolyseur

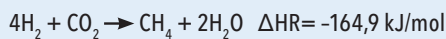




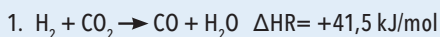
## Methanisierung: der Sabatier-Prozess

Zur Gewinnung von Methan aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid dient der nach dem französischen Chemie-Nobelpreisträger Paul Sabatier benannte, im Jahr 1902 entwickelte Prozess. Das so gewonnene Methan wird auch mit dem Kürzel SNG bezeichnet (von engl. substitute natural gas).

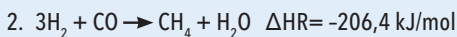
In der Summe lässt sich der Prozess durch die folgende Reaktionsgleichung beschreiben:



Man kann die Reaktion in zwei Teilreaktionen aufspalten:



Bei dieser endothermen Teilreaktion handelt es sich um eine Umkehrung der Wassergas-Shift-Reaktion, die großtechnisch eingesetzt wird, um Synthesegas von Kohlenmonoxid zu befreien.



Diese zweite, stark exotherme Reaktion treibt den Gesamtprozess. Um die in diesem Prozess freiwerdende Abwärme zu nutzen, bietet sich eine Verdampfung von Wasser und die Einspeisung des Wasserdampfs in eine Hochtemperatur-Dampfelektrolyse an.

Betrachtet man den Energiegehalt von Edukten und Produkten, so erhalten wir aus den eingesetzten 4 Mol Wasserstoff mit einer Verbrennungsenthalpie von  $-1.143,2$  Kilojoule 1 Mol Methan mit einer Verbrennungsenthalpie von  $-802,4$  Kilojoule. Der formale Wirkungsgrad des Prozesses beträgt also 70 Prozent.

Aktuelle Herausforderungen bei der weiteren Optimierung des Verfahrens betreffen unter anderem die eingesetzten Katalysatoren, hier vor allem deren Selektivität, Stabilität und die Umsetzungsgeschwindigkeiten. Im Allgemeinen basieren die verwendeten Katalysatoren auf Metallen der Gruppen acht bis zehn, hier vor allem Nickel, Ruthenium und Rhodium, wobei der weltweit am häufigsten eingesetzte Katalysator aus Nickel auf dem Trägermaterial Aluminiumoxid besteht. Problematisch an diesen Katalysatoren ist allerdings, dass es bei höheren Temperaturen zu Aktivitätsverlusten durch Zusammensintern der Nickelpartikel und

Verkockung kommt, während bei niedrigeren Temperaturen das Zwischenprodukt Kohlenstoffmonoxid mit Nickel zu Nickeltetra-carbonyl reagiert ( $[\text{Ni}(\text{CO})_4]$ ). Letzteres ist flüchtig und so wird dem Katalysator Nickel entzogen.

Mögliche Ansätze zur Unterdrückung dieser Prozesse sind zum Beispiel, den Katalysator mit geringen Mengen anderer Metalle zu dotieren: Neben den bereits erwähnten Vertretern der Platingruppe können hier auch Platin selbst, Eisen, Magnesium, Lanthan, Cer, Samarium oder Yttrium zum Einsatz kommen. Allein oder in Kombination mit dieser Maßnahme führt auch die Verwendung eines nanoporösen Trägermaterials, beispielsweise von Zeolithen, zu einer Verbesserung der Katalysatoreigenschaften. Auch kann die Dotierung des Trägermaterials (also Aluminiumoxid oder Siliziumdioxid) mit Ceroxid zu einer Erhöhung der Katalysatoraktivität führen.

Ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist auch die Herkunft des Kohlenstoffdioxids. Es ist zwar in der Atmosphäre allgegenwärtig, aber eine Abscheidung aus Luft ist sehr energieaufwendig und kostet bis zu 500 Euro pro Tonne. Es bietet sich daher an, die Methanisierung von Wasserstoff an Kohlenstoffdioxidquellen wie konventionelle Kraftwerke oder auch Biogasanlagen zu koppeln.

Eine industrielle Pilotanlage zur Gewinnung von Wasserstoff mit überschüssigem Strom aus erneuerbaren Quellen und anschließender Methanisierung ist seit 2013 in Werlte in Betrieb; sie wurde im Auftrag eines deutschen Automobilkonzerns errichtet. Die Anlage hat eine elektrische Anschlussleistung von 6 Megawatt und eine Produktionskapazität von 1,4 Millionen Kubikmeter SNG pro Jahr, wobei eine benachbarte Biogasanlage als  $\text{CO}_2$ -Quelle dient. Das hier erzeugte Methan wird zur Betankung von erdgasbetriebenen Fahrzeugen verwendet.

## Alles im Fluss: Redox-Flow-Batterien für die Energielandschaft von morgen

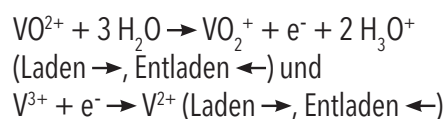
Bei einer Redox-Flow- oder Redox-Flussbatterie handelt es sich, ähnlich wie bei der Brennstoffzelle, um einen elektrochemischen Wandler, bei dem Energiespeicher und galvanische Zelle voneinander getrennt sind. Dabei wird die Energie in zwei Elektrolyten mit unterschiedlichem Redoxpotential gespeichert. Diese zirkulieren unabhängig voneinander durch Halbzellen, die durch eine selektiv durchlässige Membran voneinander getrennt sind, einer speziell konstruierten galvanischen Zelle. Dort werden sie oxidiert beziehungsweise reduziert und geben elektrische Energie ab (siehe Abbildung 18).

Es wurden Redoxfluss-Batterien auf der Basis unterschiedlicher Redoxpaare entwickelt, zum Beispiel Zink-Brom, Natrium-Brom oder in jüngster Zeit auch Eisen-Zink. Am besten erforscht und am weitesten entwickelt sind allerdings Redoxfluss-Systeme auf der Basis von Vanadium. Die Verwendung dieses Metalls bietet den Vorteil, dass es in acht verschiedenen Oxidationsstufen vorkommt. Davon sind vier chemisch leicht zugänglich, sodass ein Redoxpaar auf der Basis eines einzigen chemischen Elements realisiert werden kann. Dadurch wird auch das Problem einer Verunreinigung des Elektrolyten aufgrund von Diffusion durch die Membran vermieden.

### Farbenspiel der Oxidationsstufen

Üblicherweise werden als Elektrolyt zweimolare Vanadiumlösungen in dreimolarer Schwefelsäure eingesetzt, wobei die folgenden Varianten auftreten: das blassgelbe Vanadyl(V)-Ion  $\text{VO}^{2+}$ , das blaue Oxovanadium(VI)-Ion  $\text{VO}_2^{+}$ , das grüne Vanadium(III)-Ion  $\text{V}^{3+}$  und das violette Vanadium(II)-Ion  $\text{V}^{2+}$ .

Dementsprechend treten in einer Vanadium-Redox-Flussbatterie die folgenden Redoxpaare auf:



Die Nennspannung der Zelle beträgt etwa 1,4 Volt, und die Energiedichte des Systems kann mit der von Bleiakkumulatoren verglichen werden. Da aber die Elektroden selbst, die typischerweise aus Graphit bestehen, im Betrieb keiner

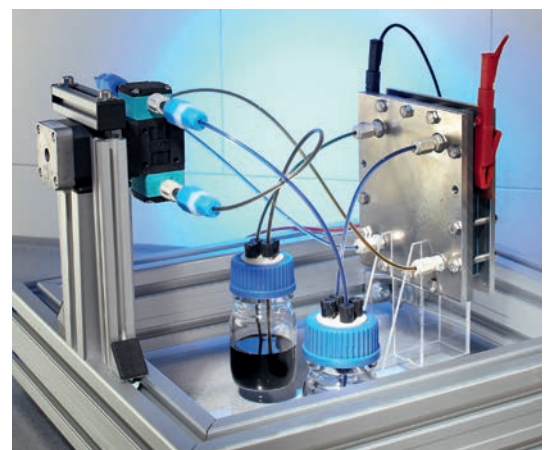
chemischen Veränderung unterliegen, beträgt die Lebensdauer das Zehnfache derer eines Bleiakkus. (Stand: Juli 2010)

### Beispiel

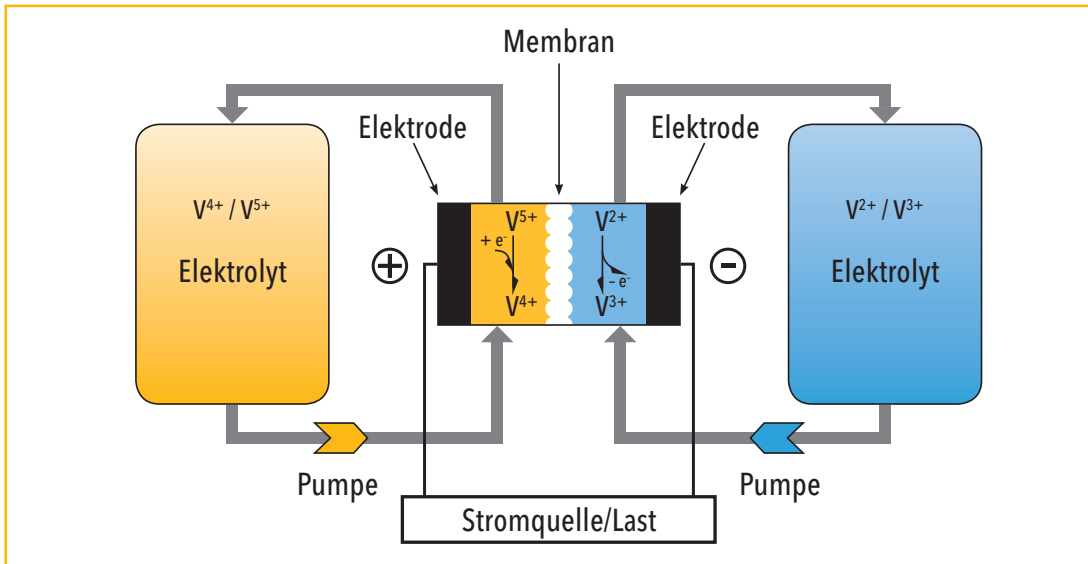
#### Modularer Redox-Flow-Speicher

Wissenschaftler am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal haben für eine neuartige Redox-Flow-Batterie einen Prototyp entwickelt, der umfangreiche Tests und Optimierungen verschiedener Komponenten unter realistischen Bedingungen ermöglicht. Dieser Prototyp mit einer Speicherkapazität von 20 Megawattstunden ist das Herzstück des Projekts „RedoxWind“. Er wird direkt an den Gleichspannungszwischenkreis einer Windkraftanlage gekoppelt. Interessant könnte ein solcher Verbund aus Windkraftanlage und Redox-Flussspeicher zukünftig vor allem für die autarke Stromversorgung von sogenannten Energiedörfern oder auch von Unternehmen sein.

Der Prototyp hat einen modularen Aufbau: Je 100 einzelne Zellen sind zu einem sogenannten Stack (Stapel) mit einer Leistung von je 35 Kilowatt zusammengefasst. Jeweils sieben Stacks sind zu einem Block gebündelt. Der gesamte Speicher mit insgesamt 2 Megawatt besteht aus acht Blöcken. Jeder Stack besitzt eine Elektrodenoberfläche von 3.600 Quadratzentimeter. Bei einer Stromdichte von 80 mA/cm<sup>2</sup> können somit Stromstärken von nahezu 300 Ampere erreicht werden. Das ist die Voraussetzung für eine hohe Flexibilität der Anlage. Eine empfindliche Leistungselektronik\* ermöglicht es, in wenigen Mikro- bis Millisekunden zwischen Lade- und Entladebetrieb zu wechseln. Durch den modularen Aufbau mit mehreren Regelventilen und Pumpen wird nicht nur eine angepasste, ökonomische Betriebsführung ermöglicht, sondern auch die Wartung einzelner Stacks erleichtert. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems beträgt dabei über 70 Prozent.



Aufbau und Funktionsweise einer Redox-Flow-Batterie



**Superkapazität, superschnell, superhaltbar: Supercaps**

Je mehr der Energiemix auf den volatilen, erneuerbaren Energien aufbaut, desto mehr Bedeutung wird die Zwischen- und Vorratsspeicherung von Strom mit hohen Kapazitäten erlangen. Pumpspeicherkraftwerke und zukünftig auch das „Power-to-Gas“-Verfahren stellen also wichtige Faktoren für das Gelingen der Energiewende dar. Beide eignen sich jedoch nicht zum Ausgleich kurzfristiger Lastschwankungen, bei denen es darauf ankommt, sehr große Energiemengen nahezu augenblicklich zur Verfügung zu stellen.

Dann könnte die Stunde der besonders leistungsfähigen Superkondensatoren schlagen, auch „Supercaps“ (von engl. supercapacitors) genannt. Zwar besitzen sie, bezogen auf ihr Gewicht, nur ein Zehntel der Speicherkapazität von Lithium-Ionen-Akkus, aber ihre kurzfristig verfügbare Leistungsdichte ist mehr als hundertmal so groß. Ein weiteres Plus ist ihre Langlebigkeit mit bis zu einer Million Lade-/Entladezyklen.

Wegen dieser Eigenschaften haben Supercaps mittlerweile einen festen Platz in unserer technischen Umwelt, wie zum Beispiel in öffentlichen Nahverkehrsmitteln, die die beim Bremsen vernichtete kinetische Energie zurück-

gewinnen. Gefördert von Bund und Ländern arbeiten deutsche Batteriehersteller gemeinsam mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen daran, Supercaps für den Einsatz in der Elektromobilität, aber auch im Haushalt zu besseren „Powercaps“ umzukonstruieren.

**Der winzige Grund für die Superlative**

Der Plattenkondensator ist Schülern aus dem Physikunterricht bestens bekannt. Hier greift das Prinzip der rein statischen Ladungstrennung. Auch beim Supercap ist es verwirklicht, allerdings in kleinsten Dimensionen und in Form einer sogenannten Helmholtz-Doppelschicht (siehe Abbildung 19). Die beiden Elektroden des Kondensators befinden sich dabei in einer Elektrolytlösung mit mobilen Ionen und sind durch einen porösen, nichtleitenden Separator, der die Ionen hindurchlässt, voneinander getrennt. Diese Komponente der Ladungstrennung bezeichnet man als Doppelschichtkapazität.

Bei der zweiten Komponente der Ladungstrennung findet hingegen eine elektrochemische Ladungstrennung durch Redoxreaktionen statt – hier spricht man von Pseudokapazität. Die drei Grundtypen von Supercaps unterscheiden sich vor allem dahingehend, ob die beiden Kapazitätsformen gleichberechtigt zur Gesamtkapazität beitragen oder ob einer der beiden Typen überwiegt.



### Mittendrin: Chemie und Physik der Supercaps im Detail

Wird an die Elektroden eine Spannung angelegt (Laden des Supercaps), so bilden sich an der Phasengrenze zwischen Elektrode und Elektrolyt an beiden Elektroden zwei ionisierte Schichten, die sog. Helmholtz-Doppelschichten (siehe Abbildung 19). Auf der geladenen Elektrodenoberfläche lagert sich eine monomolekulare Schicht des polaren Lösemittels an, an die sich eine Schicht entgegengesetzt geladener, solvatisierter Ionen anschließt. Diese Doppelschicht hat die Eigenschaften eines Kondensators, wobei die geladene Elektrode und die solvatisierte Ionenschicht als Kondensatorplatten und die zwischen den beiden Schichten befindlichen Lösemittelmoleküle als Dielektrikum betrachtet werden können. Die elektrische Energie wird mittels statischer Ladungstrennung in Helmholtz-Doppelschichten gespeichert.

Da die Kapazität  $C$  gemäß

$$C = \epsilon \cdot A/d$$

(mit  $\epsilon$  = Dielektrizitätskonstante,  $A$  = Kondensatorfläche,  $d$  = Plattenabstand) umso höher ausfällt, je geringer der „Plattenabstand“ ist, ergeben sich für die in Helmholtz-Doppelschichten auftretenden Abstände im Nanometerbereich sehr hohe Werte für  $C$ . Wichtig für die Größe der Kapazität ist außerdem die Konzentration an Ionen im Elektrolyten sowie die zur Verfügung stehende Elektrodenoberfläche.

Der zweite Effekt, die elektrochemische Pseudokapazität, tritt dann auf, wenn einige Ionen aus dem Elektrolyten die trennende Lösemittelschicht durchbrechen, mit der Elektrodenoberfläche in Verbindung treten und Elektronen an diese abgeben. Ein derart gebundenes, desolvatisiertes Ion geht dabei jedoch keine chemische Verbindung mit der Elektrodenoberfläche ein. Eine solche Pseudokapazität tritt immer in Verbindung mit einer Doppelschichtkapazität auf. Ob sie allerdings in nennenswertem Ausmaß auftritt, hängt sehr stark von der chemischen Zusammensetzung und der Struktur des Elektrodenmaterials ab.

Elektroden können beispielsweise mit Übergangsmetall-oxiden dotiert werden oder aber aus Kohlenstoff bestehen, der mit leitfähigen Polymeren wie Polythiophenen beschichtet ist. Insbesondere bei Kohlenstoffelektroden kann der Anteil der pseudokapazitiven Reaktionen durch maßgeschneiderte Porengrößen erhöht werden. In diesem Zusammenhang testen Wissenschaftler unter anderem seltene Kohlenstoffmaterialien wie Fullerene\*, Kohlenstoffnanoröhren\* oder auch Graphen\*. Diese haben aufgrund ihres strukturellen Aufbaus sechseckige „Poren“. Die Pseudokapazität einer Elektrode aus diesen Materialien kann hundertmal größer sein als die Doppelschichtkapazität. Das ist möglich, weil die desolvatisierten, an die Elektrode gebundenen Ionen wesentlich kleiner sind als die solvatisierten Ionen, aus denen die Doppelschicht aufgebaut ist. Dadurch ist die erreichbare Ladungsdichte pro Flächeneinheit wesentlich höher.

#### HINWEIS

### Ganz Kanada in einem Kondensator

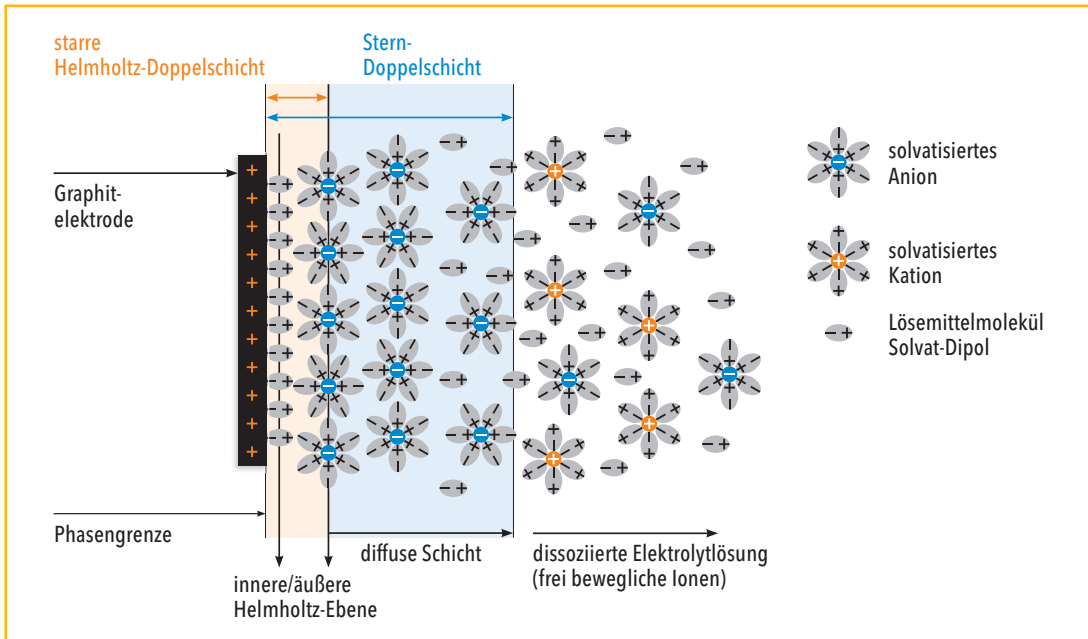
Die Kapazitätswerte von Supercaps übertreffen diejenigen von Elektrolytkondensatoren bis um den Faktor 10.000, sie erreichen 10.000 Farad. Wie groß müsste ein gewöhnlicher Plattenkondensator bemessen sein, wenn man diesen Wert in Luft mit einem Plattenabstand von einem Zentimeter erreichen wollte?

Die Kapazität eines Kondensators ergibt sich aus der Formel  $C = \epsilon \cdot A/d$ .

(die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  von Luft entspricht etwa der des Vakuums, also  $8,854 \times 10^{-12} \text{ C/Vm}$ ).

Nach Einsetzen der Werte und Auflösen der Gleichung errechnet sich ein gewaltiger Wert, nämlich 11,3 Millionen Quadratkilometer. Zum Vergleich: Das flächenmäßig zweitgrößte Land der Erde, Kanada, hat eine Fläche von knapp zehn Millionen Quadratkilometern.

Aufbau und Funktionsweise eines Supercaps



Arbeitsmaterialien zu Kapitel 5: Energie

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 5 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 5.1: Wasserstofftechnologie – ein Quiz (SI)

Aufgabe 5.2 „Power-to-Gas“ – Strom als Gas speichern (SII)

Experiment 5.1: Großtechnische Wasserstoffherzeugung (SII)

Stationenarbeit mit Aufgaben und Experimenten: Funktionsweise eines PEM-Elektrolyseurs (Lernzirkel) (SII)

Station 1: Funktionsweise eines PEM-Elektrolyseurs

Station 2: Funktionsweise einer Polymermembran

Station 3: Herstellung von Wasserstoff

Station 4: Energetischer Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

Station 5: Strom-Spannungs-Kennlinie des PEM-Elektrolyseurs

Station 6: Neue Membranmaterialien für den PEM-Wasserelektrolyseur

Aufgabe 5.3: Wasserstoffwirtschaft – die Lösung für unsere Energieprobleme? (Pro/Contra „Fishbowl“) (SI/SII)

Aufgabe 5.4: „Redox-Flow-Batterie“ und „Supercaps“ – Energiespeicher der Zukunft („Kugellager“-Methode) (SII)

## 6. Mobilität: Nachhaltig unterwegs

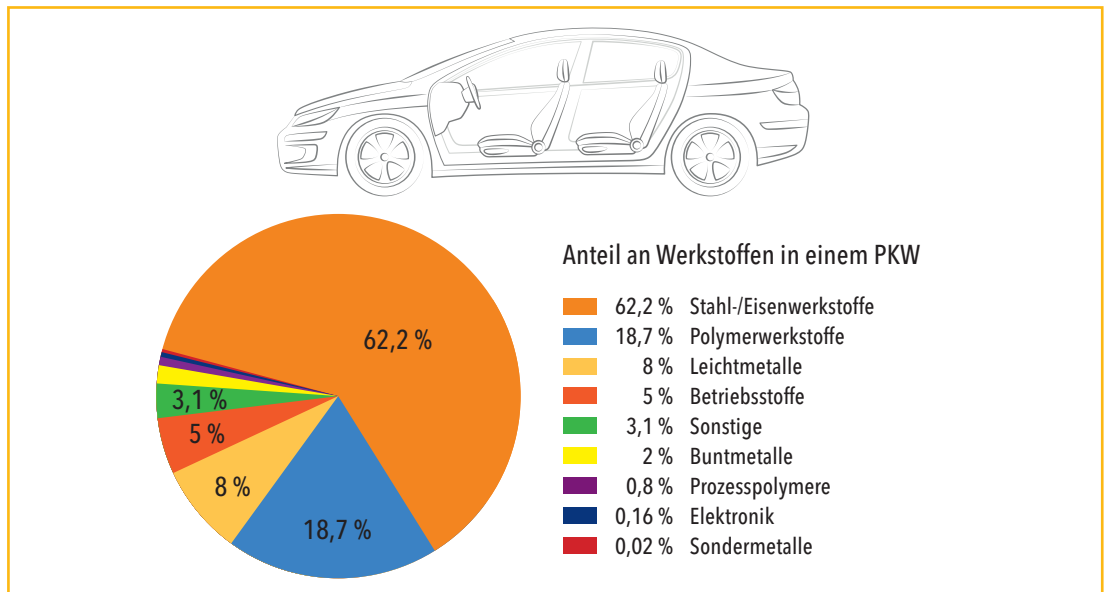
Die Geschichte des modernen Automobils ist seit seiner Erfindung im Jahre 1886 untrennbar mit der Chemie verbunden (siehe Abbildung 20). Gummireifen beispielsweise wären ohne den Prozess der Vulkanisation nicht denkbar, und den Betrieb mit Benzin und Diesel machte erst deren petrochemische Herstellung möglich. Innovative Materialien optimieren die ökologische Bilanz von PKWs, Bussen, Nutzfahrzeugen, Bahnen und Flugzeugen; denn häufig sind die neu eingeführten Werkstoffe leistungsfähiger, korrosionsbeständiger, langlebiger und leichter als die bisher verwendeten Materialien. Für die Konstruktion von Elektrofahrzeugen haben solche leichten, sehr leistungsfähigen Werkstoffe eben-

falls große Bedeutung: um möglichst hohe Reichweiten zu erzielen. 2015 wog die aus carbonfaserverstärktem Kunststoff gefertigte Fahrgastzelle im Elektrofahrzeug eines führenden deutschen Automobilherstellers weniger als 150 Kilogramm. Es ist davon auszugehen, dass das Potential der Verbundwerkstoffe im Fahrzeugbau noch längst nicht ausgeschöpft ist.

Ebenfalls noch längst nicht ausgereizt sind die Möglichkeiten der Batterien für Elektrofahrzeuge. Lithium-Ionen-Akkumulatoren stellen gegenwärtig das Optimum in puncto Sicherheit und Wirtschaftlichkeit dar. Es ist ein erklärtes Ziel laufender Forschungsanstrengungen, die Reichweiten von Elektromobilen durch Leistungssteigerung der Akkus auf über 500 Kilometer zu steigern und serienfertig zu etablieren.

ABBILDUNG 20

### Anwendungen der Chemie im Auto

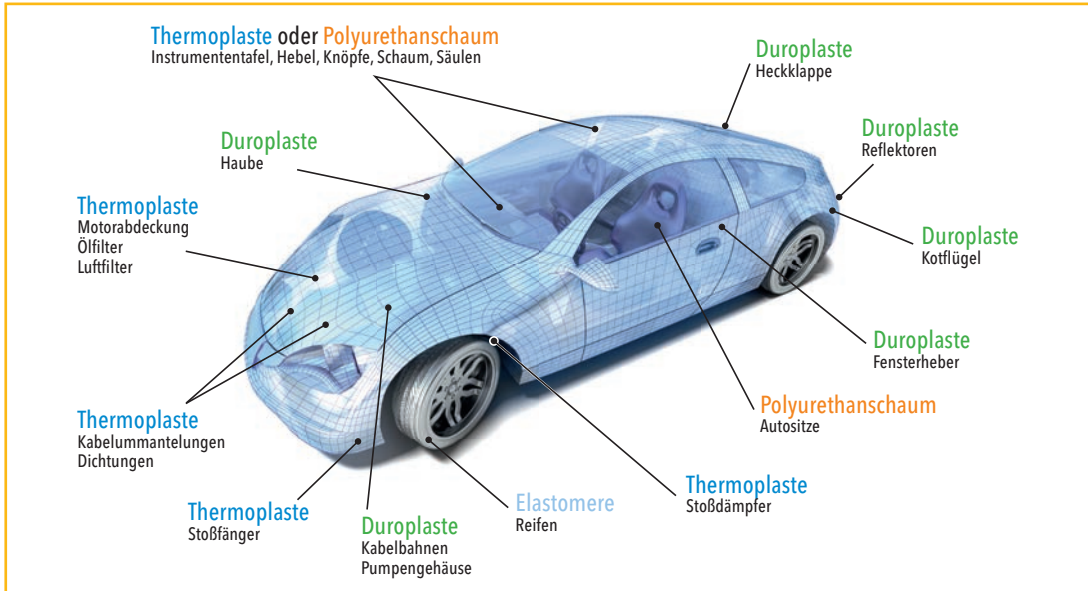


### Neue Funktionalitäten durch Polymere

Neuartige Polymere machen im Schnitt fast ein Fünftel des Gesamtgewichts eines modernen Autos aus (siehe Abbildung 21). Weil man ihre Eigenschaften bedarfsgerecht für verschiedenste Anwendungen anpassen kann, sind sie vielseitig einsetzbar; zum Beispiel erhöhen hauch-

dünne Keramiküberzüge die Kratzfestigkeit von Kunststoffteilen. Auch metallische Oberflächengestaltungen sind mittlerweile möglich: so kann durch Beigabe leitfähiger Formen von Kohlenstoff wie Graphit oder auch Kohlenstoffnanoröhren ein Kunststoffbauteil einer Oberflächenveredelung durch Galvanisierung zugänglich gemacht werden.

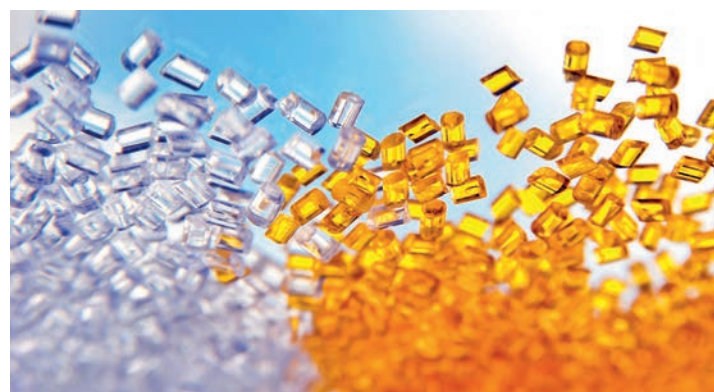
Bauteile aus Polymeren



Leichtbau für klimafreundliche und energieeffiziente Mobilität

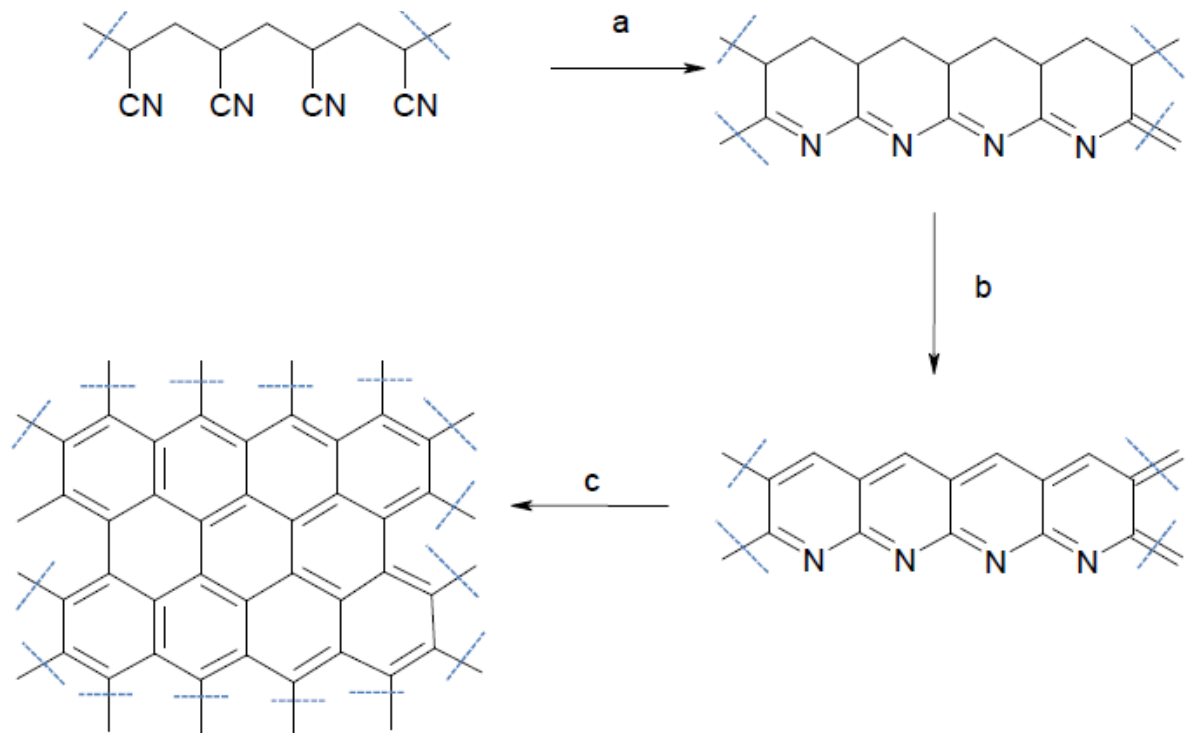
Der Verkehrssektor war nach Schätzungen des Umweltbundesamtes im Jahr 2015 in Deutschland für etwa ein Fünftel (18 Prozent) aller Treibhausgasemissionen verantwortlich. Anhand dieser Tatsache wird deutlich, wie wichtig es ist, den Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen Kohlenstoffdioxidemission weiter zu senken. Neben der weiteren Steigerung der Effizienz des Antriebsstrangs selbst ist eine Verringerung des Fahrzeuggewichts eine der entscheidenden Stellschrauben. Obwohl zum Beispiel Faserverbundwerkstoffe teilweise nur 40 Prozent der Dichte von Stahl aufweisen, besitzen sie eine bis zu sechsmal so große Festigkeit. So lässt sich also bei gleicher mechanischer Belastbarkeit viel Gewicht einsparen, was sich bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor in geringerem Treibstoffverbrauch und damit einhergehend geringerem Schadstoffausstoß auswirkt. Doch nicht nur in Form von Faserverbundwerkstoffen können moderne Kunststoffe dazu beitragen, Autos leichter und umweltfreundlicher zu machen. Mechanisch weniger belastete Karosseriebestandteile wie Motorhauben oder Spoiler werden deutlich leichter, wenn sie

nicht aus massivem Material, sondern aus Sandwich-Kompositen mit geschäumten Kunststoffen gefertigt werden. Bei Motorhauben konnte man so bereits eine Gewichtsreduktion von 60 Prozent erreichen. In der gleichen Größenordnung liegt die Gewichtsersparnis, die durch die Ersetzung einer herkömmlichen, gläsernen Heckscheibe durch eine Acrylglasscheibe erreicht werden kann. Nicht zu vernachlässigen ist auch, dass die Umstellung von Konstruktionsprinzipien deutlich Gewicht einspart. Hier gilt unter anderem: kleben statt schweißen. Denn die Verwendung eines Kilogramms Epoxidharz-Klebstoff reduziert das Fahrzeuggewicht im Vergleich zum Schweißverfahren um 25 Kilogramm – bei mindestens ebenso steifer Karosserie. Da im Durchschnitt pro Neuwagen bereits 15 bis 18 Kilogramm Klebstoff zum Einsatz kommen, befindet sich die Gewichtsersparnis bereits auf einem guten Niveau.



Auf Seite 46 ist die Abbildung leider fehlerhaft.

Hier die korrekte Formel



### Beispiel

## Mehr Power für die Elektrolyse

Bis vor wenigen Jahren war die Materialklasse hochleistungsfaserverstärkter Composites eher Nischenanwendungen vorbehalten, was vor allem auf ihre nach wie vor hohen Herstellungskosten zurückzuführen ist. Neben ihrer Rolle im Flugzeugbau fand sie nur in einigen Supersportwagen Verwendung. Mittlerweile hat sie jedoch den Sprung in die Großserie geschafft und bietet nach Einschätzung von Experten großes Potential für den Leichtbau.

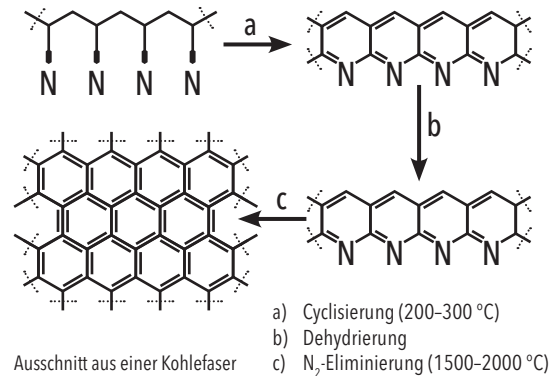
Für die Herstellung von kohlefaserverstärktem Kunststoff, kurz CFK, werden Kohlenstofffasern in eine Matrix aus Kunstharz (meist Epoxidharz) eingebettet. Die Matrix verbindet die Fasern miteinander und verhindert, dass sie sich bei Belastung gegeneinander verschieben. Für die besonders interessanten Eigenschaften von CFKs sind überwiegend die Kohlenstofffasern verantwortlich. Man stellt sie typischerweise durch Pyrolyse kohlenstoffhaltiger Ausgangsmaterialien her, wodurch Strukturen aus graphitartig angeordnetem Kohlenstoff entstehen.

Ein typisches Herstellungsverfahren geht von Polyacrylnitril aus. Nach einer Cyclisierung und Dehydrierung erhält man hochungesättigte sogenannte Leiterpolymere. Die eigentliche Carbonisierung\* erfolgt dann je nach Verfahren zwischen 1.200 und 3.000 Grad Celsius unter Schutzgasatmosphäre.

Mit diesem Verfahren gewinnt man anisotrope Kohlenstofffasern, also Fasern, deren Materialeigenschaften von ihrer Ausrichtung abhängig sind. Diese Fasern besitzen sehr hohe Festigkeiten und Steifigkeiten. Ihre herausragendste Eigenschaft für die Verwendung in Verbundwerkstoffen ist jedoch ihre hohe Elastizität.

Am Ende der chemischen Umsetzung hat eine Kohlenstofffaser (Filament) einen Durchmesser von etwa fünf bis neun Mikrometer. Diese Filamente werden anschließend zu einem Garn versponnen, das dann je nach Anwendung zu unterschiedlichen Geweben verarbeitet wird. Üblicherweise werden Gewebe mit unterschiedlicher Faserausrichtung in einer bestimmten Weise übereinandergelegt, um die optimalen Festigkeitswerte für das fertige Bauteil zu erzielen.

## Formel-Fehler – siehe vorherige Seite



## Auch leicht: Magnesium, Aluminium, Stahl

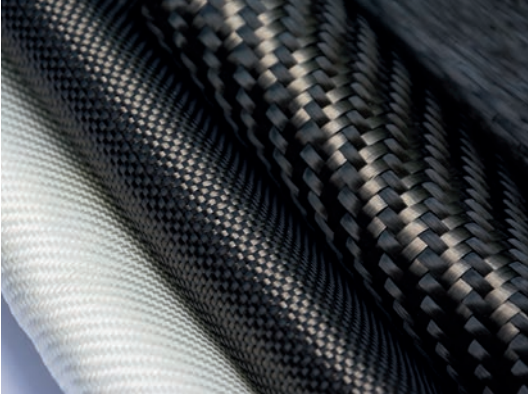
### Magnesium – seit Jahrzehnten bewährt

Magnesium ist eines der leichtesten konstruktiv nutzbaren Metalle. Seine Dichte beträgt lediglich 1,74 g/cm<sup>3</sup>. Als Bestandteil spezieller Aluminiumlegierungen findet es bereits seit vielen Jahrzehnten im Flugzeug- und im Autobau Verwendung. So wird das Getriebegehäuse eines bekannten deutschen Kleinwagenmodells aus einer Magnesium-Silizium-Legierung gefertigt. Auch in Motorgehäusen wird es seit längerem als Legierungsbestandteil verwendet. Weitere Anwendungen im Automobilbereich, zum Beispiel zur Herstellung filigraner Gussteile, geraten allerdings erst in den letzten Jahren wieder in den Fokus.

### Aluminium und Stahl – das perfekte Duo für leichtere Karosserien

Aluminium hat sich mittlerweile fest in der Großserie im Kfz-Bereich etabliert. Vorreiter war hier ein deutsches Automobil der gehobenen Klasse, dessen Karosserie komplett aus Aluminium gefertigt wurde. Wichtig bei der Verwendung von Aluminium als Karosseriewerkstoff ist allerdings der Umstand, dass sein Elastizitätsmodul\* nur etwa ein Drittel desjenigen von Stahl beträgt, sodass die Karosserie konstruktiv anders ausgelegt werden musste. Dennoch gelang es, eine Gewichtsreduktion von über 45 Prozent gegenüber einer vergleichbaren Stahlkarosserie zu erreichen.

Bis vor kurzem waren reine Aluminiumkarosserien noch der Oberklasse vorbehalten. Den Schritt in die Fertigung von Aluminiumkarosserien für einen breiteren Markt wagte ein amerikanischer Automobilhersteller im Jahr 2014: Das meist verkaufte Auto der USA hat nun eine



Fahrgastzelle aus Aluminium. Dadurch und durch die Verwendung höchstfester Stähle ist das Fahrzeug nun 350 Kilogramm leichter als das Vorgängermodell. Dieses Beispiel zeigt auch, dass der bewährte Werkstoff Stahl bei weitem noch nicht zum „alten Eisen“ gehört, wenn es darum geht, Fahrzeuge besonders leicht und sparsam zu konstruieren. Neue Fertigungskonzepte setzen darauf, in ein und demselben Bauteil unterschiedliche Materialstärken und auch Härtegrade zu realisieren, sodass die einwirkenden Lasten mit einem Minimum an Materialaufwand optimal verteilt werden können.

Besonders eng wird das Zusammenwirken zwischen diesen beiden bewährten Metallen in einer besonderen Klasse von Verbundmaterialien, sogenannten Sandwiches aus Aluminiumschaum und Stahlblech. So weist ein Sandwich mit einem Aluminiumschaumkern von 14 Millimetern Dicke und jeweils einen Millimeter dicken Stahlblechdecken die Biegesteifigkeit einer zehn Millimeter starken Stahlplatte auf, besitzt dabei aber nur ein Drittel der Masse.

Neben sehr leichten, gleichzeitig stabilen und schwingungsdämpfenden Trägerkonstruktionen für Maschinen eröffnet dieses Material auch ein großes Potential für den Verkehrssektor. So wurde unter Leitung des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) der Prototyp der Triebkopfkabine eines Hochgeschwindigkeitszugs aus Aluminiumschaum-Stahlblech-Sandwiches entwickelt. Wegen der hohen Eigensteifigkeit der Sandwiches konnte auf eine Unterkonstruktion, wie sie bei der konventionellen Bauweise mit massiven Aluminiumblechen notwendig ist, verzichtet werden, wodurch eine Gewichtsreduktion um circa 20 Prozent bei gleichzeitig geringerem Montageaufwand erreicht wird.

## Triebkräfte der Elektromobilität

Die Batterietechnologie spielt eine Schlüsselrolle, wenn sich Elektromobilität durchsetzen soll. Zwar zeigt sich in der Praxis, dass 95 Prozent aller Autofahrten kürzer als 100 Kilometer sind. Dennoch möchten viele Autofahrer nicht auf die Möglichkeit verzichten, längere Strecken ohne Ladestops zurückzulegen. Hier bieten Hybridfahrzeuge heute schon eine gute Alternative, kürzere Strecken rein elektrisch angetrieben zurückzulegen und erst bei längeren Strecken auf den Verbrennungsmotor zurückzugreifen.

## Bewährte Akkutechnologie: zukunftsfähig durch neueste Materialien

Der Lithium-Ionen-Akkumulator ist heute der Akkumulatortyp der Wahl für elektrisch angetriebene Fahrzeuge. Das wird er (beziehungsweise seine verschiedenen Varianten und Weiterentwicklungen) auf absehbare Zeit auch bleiben, denn sein entscheidender Vorteil liegt in einer verhältnismäßig hohen Energiedichte.

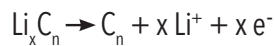
Seinen Namen erhielt er, weil in allen drei Komponenten der galvanischen Zelle – in beiden Elektroden sowie im Elektrolyten – Lithium-Ionen eingesetzt werden. Der Aufbau im Detail und die jeweils verwendeten Elektrodenmaterialien können dabei stark variieren (siehe Abbildung 22).

Die grundlegende Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle ergibt sich aus ihrem Aufbau: Zunächst setzen sich die negative Anode und die positive Kathode aus einem Stromableiter und einem darauf aufgetragenen Aktivmaterial zusammen (bei der Betrachtung von Batterien wird konventionsgemäß der Entladevorgang für die Definition von Anode und Kathode herangezogen). Dazwischen befindet sich der Elektrolyt mit Lithium-Ionen und ein Separator, der dazu dient, die elektronische Trennung der beiden Elektroden zu gewährleisten und der selektiv nur für Lithium-Ionen durchlässig ist. Im Gegensatz zu einem Bleiakкумуляator, in dem elementares Blei eingesetzt wird, kann in einem Lithium-basierten Akku metallisches Lithium nicht direkt eingesetzt werden, da beim Aufladeprozess baumartige Strukturen aus Lithium (sogenannte Dendriten) entstehen würden, die den Separator durchbohren und damit zu einem Kurzschluss der Zelle führen könnten.

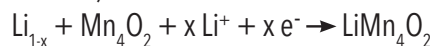
Die negative Elektrode der Zelle besteht typischerweise aus Graphit oder einem Material, das mit Lithium legiert ist. Während des Ladevorgangs wird metallisches Lithium in die Struktur der Elektrode eingebaut. Man spricht hier von einer Interkalationsverbindung.

Die positive Elektrode besteht üblicherweise aus Aluminium, auf dem Übergangsmetalloxide aufgebracht sind (typischerweise werden Oxide von Kobalt, Mangan oder Nickel verwendet). Beim Laden werden aus dieser Oxidschicht Lithium-Ionen freigesetzt.

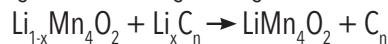
Die Umkehrung dieser Prozesse beim Entladen wird durch die folgenden Gleichungen beschrieben:  
negative Elektrode:



positive Elektrode (Verwendung von Manganoxid als Elektrodenmaterial):



Zusammengefasst als Redoxgleichung:



Wegen des Vorhandenseins metallischen Lithiums in den Elektroden müssen die verwendeten Elektrolyte absolut wasserfrei sein. Es lassen sich drei verschiedene Typen unterscheiden:

1. Flüssige Elektrolyte enthalten ein Lithiumsalz, beispielsweise Lithiumhexafluorophosphat (LiPF<sub>6</sub>), in einem polaren, aprotischen Lösemittel wie Ethylencarbonat.

2. Polymere Elektrolyte können beispielsweise aus Polyvinylidenfluorid bestehen und ermöglichen eine leichtere Bauweise.

3. Feste Elektrolyte sind in puncto Leitfähigkeit und Verarbeitung bisher problematisch, weshalb sie kaum verwendet werden.

#### HINWEIS

### Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Weitere Informationen finden sich auf den Seiten 58/59 der FCI-Publikation „Chemie – Schlüssel zur Energie von morgen“ ([www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/](http://www.vci.de/fonds/schulpartnerschaft/unterrichtsmaterialien/)).

Gegenwärtige Anstrengungen von Batterieherstellern setzen auf eine weitere Erhöhung von Energiedichte, Sicherheit und Langlebigkeit von Lithium-Ionen-Batterien (siehe Abbildung 22), beispielsweise durch Innovationen im Bereich der Elektroden und des verwendeten Elektrolyt-systems.

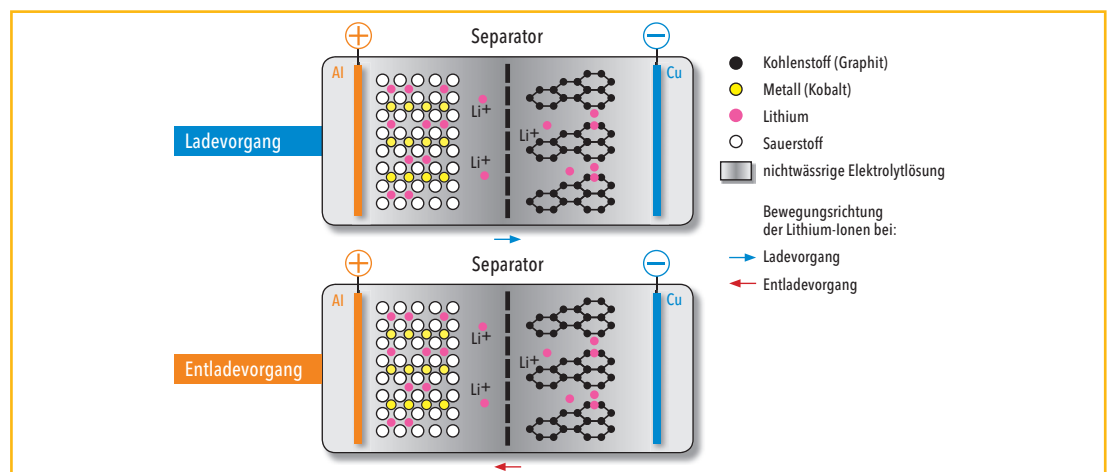
#### Beispiel

### Leistungsfähigere Elektroden für die Batterie der Zukunft

Ein neues Material, das interessante Eigenschaften für die Optimierung von Graphit-basierten Anoden bietet, ist Graphen. Bei Graphen handelt es sich um eine Modifikation

ABBILDUNG 22

#### Funktionsweise einer Lithium-Ionen-Zelle





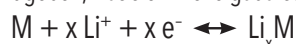
von Kohlenstoff mit zweidimensionaler Struktur. Man kann es einerseits als eine einzelne Schicht aus der gestapelten Struktur von Graphit auffassen, andererseits auch als sehr ausgedehnten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoff (PAK).

Graphen galt wegen seiner thermodynamischen Instabilität lange Zeit als nicht isolierbar. Genau dies gelang jedoch 2004 dem Forscherteam um Konstantin Novoselov und Andre Geim, wofür sie 2010 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet wurden.

Graphen verfügt über zahlreiche besondere Eigenschaften, darunter eine ausgezeichnete elektrische Leitfähigkeit.

Typischerweise enthält die aus Graphit bestehende Elektrode Additive aus Ruß, um ihre Leitfähigkeit zu verbessern. Durch die Ersetzung von Ruß durch Graphen lässt sich eine gesteigerte Entladekapazität erzielen. Wesentlich ausgeprägter ist der Effekt allerdings, wenn als Anodenbeschichtung ausschließlich Graphen verwendet wird. So gelang es italienischen Wissenschaftlern 2014, den Prototyp eines Lithium-Ionen-Akkus zu konstruieren, der eine bewährte Eisenphosphat-Kathode und eine neuartige Anode besitzt, die aus Kupfer mit einer speziellen Graphenbeschichtung besteht. Mit dieser neuartigen Kombination lässt sich die Speicherkapazität handelsüblicher Akkus mit Graphit-Anoden von 100 auf 190 Wh/kg nahezu verdoppeln.

Ein besonders interessanter Ansatz für die Verbesserung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist, als Anodenmaterial anstelle von Graphit eines der zahlreichen Metalle zu verwenden die mit Lithium Legierungen bilden. Hier können Aluminium, Blei, Silizium oder Zinn zum Einsatz kommen. Diese Legierungen sind auch bei Raumtemperatur in der Lage, Lithium-Ionen aufzunehmen und wieder abzugeben, was sich wie folgt darstellen lässt:



Lithium als ein sehr stark elektropositives Erdalkalimetall bildet mit mäßig elektronegativen Elementen aus den Gruppen 11 bis 16 sogenannte Zintl-Phasen. In diesen haben bereits die Legierungspartner einen deutlich ionischen Charakter, wodurch die Packungsdichte der Lithium-Ionen teilweise höher ist als in metallischem Lithium. Auch verschiebt sich das Elektrodenpotential des legierten Metalls stark in den negativen Bereich, teilweise bis nahe an das Potential reinen metallischen Lithiums.

Die zu erzielenden Stöchiometrien, also der erreichbare „Lithierungsgrad“, liegt deutlich höher als bei Graphit ( $LiC_6$ ); so lassen sich die Lithium-Legierungen von Zinn bzw. Silizium formal als  $SnLi_4$  bzw.  $SiLi_4$  darstellen. Dadurch erscheint, sowohl auf das Volumen, als auch auf das Gewicht bezogen, eine Energiedichte erreichbar, die diejenigen heutiger kommerziell eingesetzter Systeme bis um das Zehnfache übertrifft.

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

##### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 6: Mobilität

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 6 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 6.1: Anwendungsgebiete der Materialforschung – Autos mit Zukunft (SI/SII)

Aufgabe 6.2: Kunststoffe im Auto (SI/SII)

Stationenarbeit mit Aufgaben und Experimenten: Eigenschaften der Kunststoffe im Auto (SI/SII)

Station 1: Verhalten beim Erwärmen

Station 2: Elastizität, Härte und Bruchfestigkeit

Station 3: Brennbarkeit

Station 4: Dichte

Aufgabe 6.3: Kohlefaserverstärkte Kunststoffe (SII)

Aufgabe 6.4: Bewährte Akkutechnologie (SII)

Aufgabe 6.5: Innovationen im und am Auto als Beitrag zum Klimaschutz (SI/SII)

## 7. Bauwesen: Neue Materialien für neue Herausforderungen

Kaum eine Branche ist so innovativ wie die deutsche Bauchemie, in kaum einem anderen Bereich kommen derart viele verschiedene Materialien und Verfahren zum Einsatz. Diese Innovationskraft wird auch benötigt, denn neue Herausforderungen ergeben sich heutzutage vor allem durch die zunehmende Verstädterung (Urbanisierung) und den Klimawandel.

Innovative Baustoffe tragen in Ballungsräumen bereits heute zur Verringerung von Lärmemissionen bei. Ein neues Konzept sind auch selbstreinigende Fassaden, die die Umgebungsluft katalytisch von Schadstoffen befreien. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel wird es mittelfristig vermehrt zu Extremwetterlagen mit starken Temperaturschwankungen kommen. Die Baustoffe und Baumaterialien der Zukunft müssen also gleichzeitig robust sein und klimaregulierend wirken können. Nicht zuletzt werden sie (durch Dämmung, Dichtung oder schaltbare Materialeigenschaften) auch dazu beitragen, in Gebäuden besser mit Energie zu hauszuhalten.

In den kontinuierlich wachsenden Großstädten müssen Bauwerke und Verkehrswege auf die stärkere Nutzung und Belastung ausgelegt und somit entsprechend langlebig sein. Nur so kann für alle Bewohner ein hohes Maß an Sicherheit und Lebensqualität bei gleichzeitig bezahlbarem Wohnraum gewährleistet werden. Im Sinne der Nachhaltigkeit sollen die eingesetzten Baumaterialien darüber hinaus auch immer leichter, klimafreundlicher und vermehrt recyclingfähig sein, um wertvolle Rohstoffe nicht länger verbrauchen zu müssen, sondern um sie sparsam einsetzen und wiedergewinnen zu können.

### Beton und mehr: der Mix macht's

Moderner Beton ist nicht nur ein überaus robuster, sondern auch ein extrem vielfältiger Baustoff (siehe hierzu auch FCI-Unterrichtsmaterial „Bauchemie“, Seite 10 und Seite 26). Je nach Porenstruktur macht er Straßen eisfrei, überschwemmungssicher oder geräuscharm. Und durch beigemengte Nanoteilchen wird er ultrahochfest oder spaltet Luftschadstoffe katalytisch in ungefährliche Substanzen auf (siehe Abbildung 23).

ABBILDUNG 23

#### Materialinnovationen bei Beton

**UHPC**  
(Ultra High Performance Concrete)

**ultrahochfester  
Beton**

(1)



**schalldämpfender  
Beton**

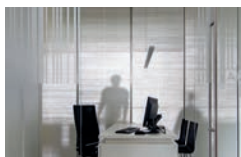
Faserbeton (mit Abstandhaltern als Schallabsorber)  
© www.maxfrank.com

(2)



**lichtdurchlässiger  
Beton**

(3)



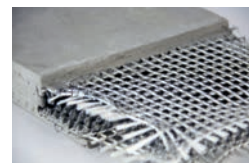
**selbstreinigender  
Beton**

(4)



**textilbewehrter  
Beton**

(5)



etc.

Carbonbeton in der Gebäudesanierung

Beton - Carbonbewehrung



Erdbebenriss vor dem Aufbringen eines Klammerpflasters aus Mörtel und Carbonbewehrung



Carbonbewehrung im Detail

Um höchsten Anforderungen zu genügen, kommt Beton aber nicht nur als spezialisiertes Gemisch, sondern auch im Verbund mit anderen Materialien zum Einsatz. Als klassisches Beispiel ist der Stahlbeton zu nennen. Die Stahlbewehrung verleiht ihm die notwendige Zugfestigkeit, um bei Konstruktionen mit besonderer Zugbelastung (beispielsweise Brücken) eingesetzt zu werden. Die Sache hat nur einen Haken: Der Stahl korrodiert, und der Beton wird nach 40 bis spätestens 80 Jahren durch starke Belastungen mürbe.

Das spart wertvolles Material und senkt auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen über den ganzen Herstellungsprozess hinweg. Weil Carbonfasern bei gleichem Gewicht die fünffache Zugfestigkeit von Stahl aufweisen, freuen sich Architekten bereits heute auf die Aussicht, in Zukunft wesentlich leichtere und filigranere Betonkonstruktionen planen zu können.

Deutsche Forscher und Unternehmer haben im Jahr 2014 ein Konsortium gegründet, das dieses Problem durch Materialinnovationen lösen will. Der Kompetenzverbund plant, in den kommenden 20 Jahren bei Neubauten in 20 Prozent aller Fälle anstelle von Stahlbetonkonstruktionen „Carbonbeton“ zu verwenden. Diese Art von Textilbeton enthält, wie der Name schon sagt, Carbonfasern, und bietet gleich eine ganze Reihe von Vorteilen:

Carbon korrodiert nicht und wird vom alkalischen Milieu des Betons nicht angegriffen. Anders als beim Stahlbeton muss die Bewehrung nicht mit einer dicken, schützenden Betonschicht umgeben werden (siehe Abbildung 24).



Salginatobelbrücke

## Von Pflanzen und Physikern

### Mechanische Metamaterialien: Baumaterial der Zukunft?

Die Natur hat in Jahrmilliarden der Evolution besondere Materialien geschaffen, die leicht sind und gleichzeitig hochgradig stabil. Holz gehört dazu, ebenso Knochensubstanz. Diese Biomaterialien sind bei geringer Dichte deswegen extrem stabil, weil sie zelluläre Mikro- und Nanostrukturen aufweisen: Waben im Holz oder Bälkchen in besonders stark beanspruchten Bereichen von Knochen wie etwa dem Oberschenkelhals (siehe Abbildung 25). Es ist bis heute technisch nicht möglich, derart fein strukturierte Materialien in größeren Mengen herzustellen. Dabei wären sie als innovative Baustoffe mit ihrem äußerst günstigen Verhältnis von Rohstoffeinsatz zu Materialqualität enorm attraktiv!

Einen Schritt auf dem Weg dorthin haben Forscher mit Hilfe der Laserlithografie, einem additiven Fertigungsverfahren, geschafft. Durch mikrometerfeine, Laserblitz-induzierte Polymerisation von UV-härtenden Polymeren stellen sie Materialien her, die unter dem Mikroskop kom-

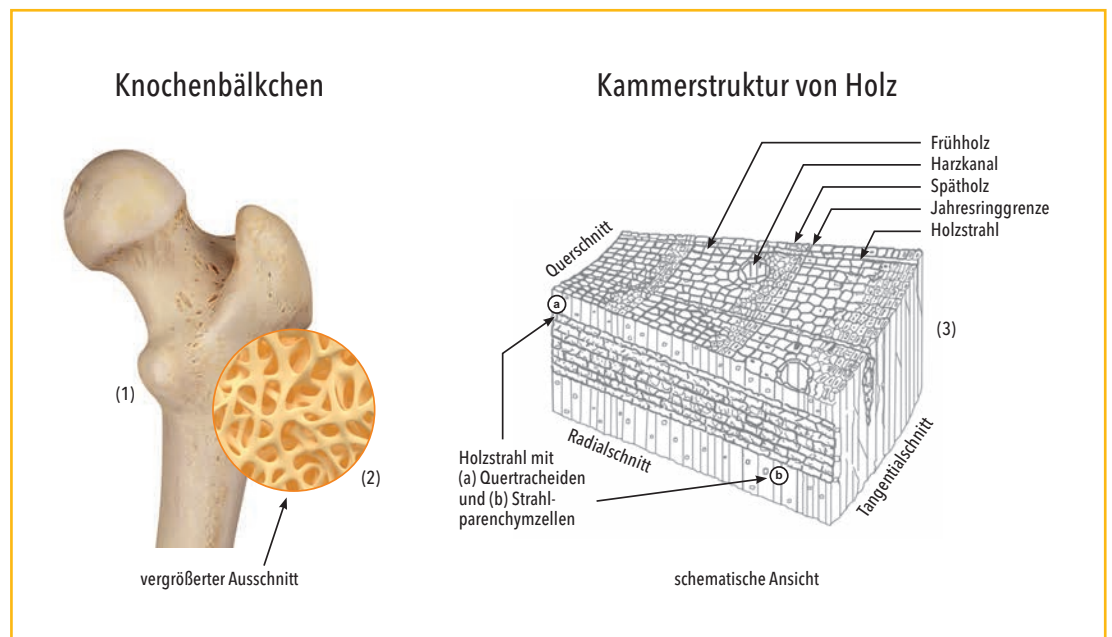
plizierte und hochgradig regelmäßige Gerüstkonstruktionen offenbaren (siehe Abbildung 26). Werden deren Verstrebungen mit anderen Substanzen, etwa Silizium, beschichtet und wird anschließend das Trägermaterial abgebaut, bleiben noch filigranere Strukturen übrig.

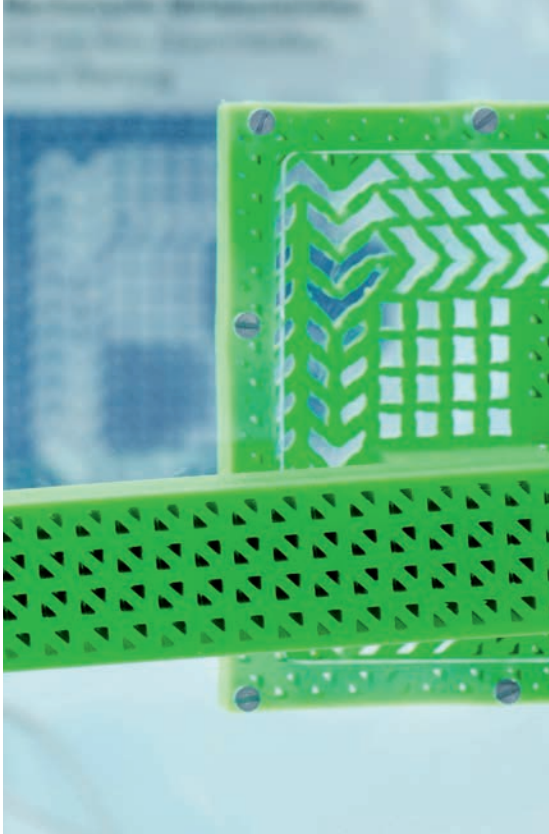
Diese winzigen Architekturen haben faszinierende, teils sogar verrückt anmutende Eigenschaften: Keramik wird federleicht, ohne an Härte einzubüßen. Würfel nehmen, nachdem man sie plattgedrückt hat, von selbst wieder ihre ursprüngliche Form an. Oder sie ziehen ihre Seitenflächen nach innen ein, anstatt sich nach außen zu wölben, wenn man auf ihre Oberseite Druck ausübt.

Bis aus diesen Materialien Häuser gebaut werden, dürfte noch einige Zeit ins Land gehen. Denn was Wissenschaftler heute schon im Labor begeistert, kann erst in Mengen von wenigen Mikrogramm hergestellt werden.

### ABBILDUNG 25

#### Zelluläre Strukturen von Biomaterialien





HINWEIS

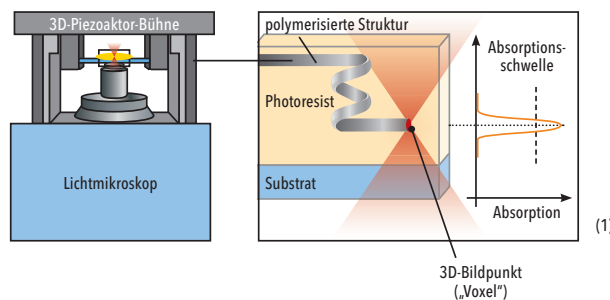
### Was sind Metamaterialien?

Metamaterialien besitzen Eigenschaften, die in der Natur nicht vorkommen. Sie bestehen aus mikroskopischen Struktureinheiten herkömmlicher Materialien (etwa Metallen oder Kunststoffen), die periodisch in geeigneter Weise angeordnet sind. Die Eigenschaften dieser Metamaterialien werden nicht durch ihre Zusammensetzung, sondern durch die Form, die Größe, die Geometrie und die Anordnung ihrer Strukturen bestimmt.

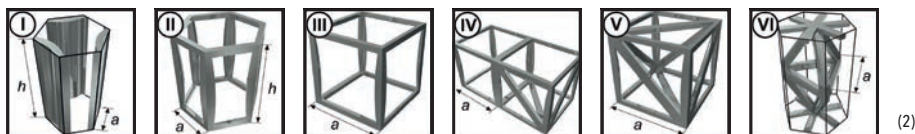
ABBILDUNG 26

### Mechanische Metamaterialien

Funktionsprinzip der Herstellung mittels „3D Direct Laser Writing“ (3D-DLW)



mechanische Metamaterialien mit Mikroarchitektur (Beispiele)



INFO FÜR LEHRKRÄFTE

### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 7: Bauwesen

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 7 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 7.1: Materialinnovationen bei Beton (SI/SII)

Aufgabe 7.2: Beton wird hightech (Gruppenpuzzle) (SI/SII)

Experiment 7.1: Die Wirkung von Zusatzmitteln auf Beton (SII)

Experiment 7.2: Modellexperiment Verbundstoffe (SII)

## 8. Ressourcenschonung: Von der Wegwerf- zur Kreislaufwirtschaft

### Knappe Rohstoffe – optimal genutzt

Mehr denn je ist unsere Volkswirtschaft auf eine Vielzahl an materiellen Ressourcen angewiesen. Dabei ist es unbestreitbar, dass wir mit unserer heutigen Lebens- und Wirtschaftsweise diese Ressourcen übermäßig beanspruchen. Es drängt sich die Frage auf, wie lange zum Beispiel die globalen Erdölreserven noch reichen werden – vor dem Hintergrund, dass einerseits der Verkehrssektor ganz wesentlich auf Erdöl angewiesen ist und dass andererseits die heute verwendeten Polymere nahezu ausschließlich auf Erdöl basieren. Doch weitete man den Blick etwas, stellt man fest, dass unsere moderne Industriegesellschaft mittlerweile in der Lage ist, alle natürlich vorkommenden Elemente des Periodensystems technisch zu nutzen.

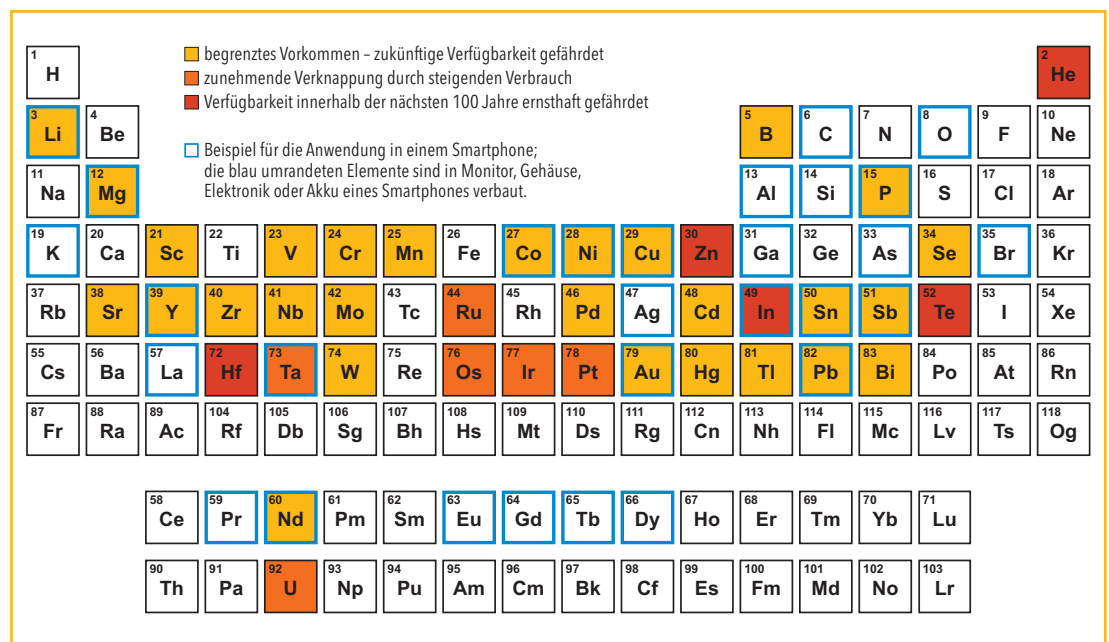
Während die Vorkommen von in der Erdkruste sehr häufig anzutreffenden Elementen wie Silizium, Aluminium oder Eisen nach menschlichem Ermessen unerschöpflich sind,

gilt dies für viele Hightech-Metalle nicht: Wegen ihrer Seltenheit und der hohen Kosten werden weltweit nur geringe Mengen gefördert (siehe Abbildung 27). Beispielsweise werden jährlich nur wenige hundert Tonnen des Metalls Indium gewonnen. Experten gehen davon aus, dass die nutzbaren Lagerstätten mancher seltener Metalle in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein werden. Selbst bei einem Basismetall wie Kupfer werden teilweise verbleibende Vorkommen in der Größenordnung von nur noch 30 Jahren genannt.

Ein weiteres Problem vieler dieser Rohstoffe stellt ihre für den Menschen und die Umwelt schädliche Herstellungsweise dar. So ist die Gewinnung von Aluminium aus Bauxit äußerst energieaufwendig, denn zur Herstellung einer Tonne Aluminium werden fast 16.000 Kilowattstunden Strom verbraucht. Weiterhin fallen pro Tonne Aluminium zwischen 1,6 und 3,7 Tonnen sogenannter Rotschlamm an. Er muss deponiert werden und enthält oft große Mengen giftiger Schwermetalle.

ABBILDUNG 27

### Verwendung seltener Elemente





## Drei Ansätze für eine bessere Ressourcennutzung

Wie kann man also knapper werdende Ressourcen so nutzen, dass sie optimal in Produkten und Prozessen eingesetzt werden können, gleichzeitig aber Menschen und Umwelt möglichst wenig belastet werden? Hier stehen drei übergreifende Ansätze zur Wahl:

- Eine immer weiter gehende Verfeinerung von Produktionsprozessen kann dazu beitragen, seltene Metalle besser zu nutzen, also mit wesentlich kleineren Mengen den gleichen Effekt zu erzielen. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung von Dünnschichttechnologien bei der Produktion besonders leistungsfähiger Solarzellen.
- Die Ersetzung (Substitution) bisher verwendeter Stoffe ist oft ein möglicher Weg. So sind Forschungsanstrengungen weltweit darauf gerichtet, neuartige Modifikationen von Kohlenstoff (Graphen oder Kohlenstoffnanoröhren) in elektronischen Bauteilen zu verwenden und dadurch den Einsatz seltener Metalle zu reduzieren oder überflüssig zu machen. Auch die Substitution erdölbasierter Produkte wie Benzin oder Kunststoffe durch qualitativ gleichwertige oder sogar überlegene Produkte auf Basis nachwachsender Rohstoffe ist hierzu zu zählen.
- Das Recycling, also die stoffliche Wiederverwertung derjenigen Metalle, auf deren Nutzung nicht verzichtet werden kann, ist ein entscheidender Beitrag zur Schonung unserer Ressourcen. Wo immer technisch, ökologisch und ökonomisch sinnvoll, sollten geschlossene Stoffkreisläufe mit einem möglichst hohen Prozentsatz an Wiederverwertung angestrebt werden.

Bei allen drei Ansätzen spielen Chemie und Biotechnologie einschließlich der Prozess- und der Verfahrenstechnik eine Schlüsselrolle. Sie alle tragen damit zu einer nachhaltigen und innovativen Produktion in allen Industrie-sektoren bei.

### Nachhaltige Kraftstoffe aus Biomasse

Fast ein Drittel des heute in Deutschland verbrauchten Erdöls wird zu Kraftstoffen für den Verkehr verarbeitet. Zwar sind mittlerweile Beimischungen von Ethanol und Rapsölmethylester aus nachwachsenden Quellen gesetzlich vorgeschrieben, doch sind diese sogenannten Biokraftstoffe der ersten Generation ökologisch und ökonomisch nicht unproblematisch. In der Kritik stehen unter anderem die Flächenkonkurrenz zwischen dem Anbau von Energiepflanzen und Nahrungsmittelpflanzen sowie die teilweise energieaufwendigen Prozessketten.

### Beispiel

#### Biokraftstoffe der zweiten Generation mit dem bioliq®-Verfahren

Einen möglichen Ausweg bieten hier Biokraftstoffe der zweiten Generation, also solche Kraftstoffe, die nicht aus eigens angebauten „Energiepflanzen“, sondern aus überschüssiger Biomasse gewonnen werden.

Wissenschaftler am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) haben in Zusammenarbeit mit mehreren Partnern aus der Industrie ein innovatives Herstellungsverfahren für solche Kraftstoffe entwickelt (siehe Abbildung 28). Dieses sogenannte bioliq®-Verfahren (von engl. „biomass-to-liquid“) ermöglicht es, aus trockener Biomasse\* wie Stroh oder Holzhackschnitzeln synthetische Kraftstoffe und auch verschiedene Grundchemikalien zu produzieren. Da die genannten Materialien eine relativ niedrige Energiedichte haben, ist der erste Schritt des Prozesses dezentral gestaltet: In kleinen Reaktoren\*, die beispielsweise auf Bauernhöfen installiert werden können, wird zunächst aus der Biomasse ein flüssiges Pyrolysat hergestellt, wobei der ebenfalls anfallende Koks zur Deckung des Energiebedarfs des Verfahrens dient. Dieses als bioliq®-Syn crude bezeichnete Pyrolysat verfügt über etwa 90 Prozent der Energie der verwendeten Biomasse und hat eine Energiedichte, die

mehr als eine Größenordnung höher ist als die des Ausgangsmaterials, was insgesamt zur Wirtschaftlichkeit des Verfahrens beiträgt.

Im nächsten Schritt wird im Herzstück der eigentlichen Raffinerie, einem Flugstromvergaser, das Syncrude mit heißem Sauerstoff zerstäubt. Bei etwa 1.200 Grad Celsius entsteht dadurch ein teerfreies, methanarmes Synthesegas\*. Der Druck, bei dem diese Umsetzung erfolgt, richtet sich danach, ob das Synthesegas anschließend in eine Fischer-Tropsch- (30 bar) oder in eine Methanol- bzw. Dimethylether-Synthese (80 bar) eingespeist wird. Da das Synthesegas für die nachfolgenden Schritte sehr rein sein muss, entwickelte das Karlsruher Konsortium neue Gasreinigungsverfahren, die bei hohen Temperaturen und unterschiedlichem Druck angewendet werden können. Die eigentliche Kraftstoffsynthese erfolgt in zwei Stufen, wobei Dimethylether (DME) als Zwischenprodukt auftritt. Für die Synthese von DME bei 250 Grad Celsius und 55 bar ist die Zusammensetzung von Synthesegas aus Biomasse besonders vorteilhaft, da es zu gleichen Teilen aus Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid besteht. Das DME wird anschließend bei 350 Grad Celsius und 25 bar an einem zeolithbasierten Katalysator umgesetzt. Bei der dabei

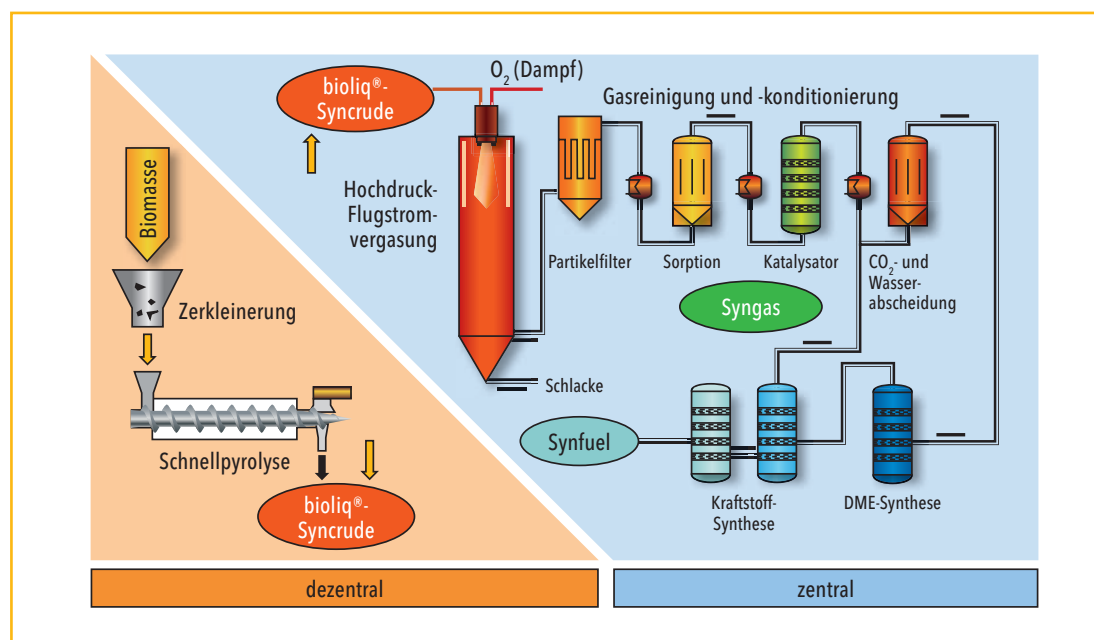
ablaufenden Dehydratisierung, Oligomerisierung und Isomerisierung erhält man ein hochoktaniges Motorenbenzin. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die verwendeten Katalysatoren so zu optimieren und weiterzuentwickeln, dass die so synthetisierten Kraftstoffe für die steigenden Anforderungen moderner Motoren maßgeschneidert werden können. Über diesen Prozess können auch (mit der Zwischenstufe DME) Grundchemikalien wie Ethen, Propen oder Acrylsäure hergestellt werden.

### Kunststoffkollektoren – höchste Materialeffizienz für Solarthermie und Geothermie

Im Vergleich zur Photovoltaik\* wird die Solarthermie als Nutzungsmöglichkeit der Sonnenenergie oft unterschätzt. Diese kann in Wohngebäuden beispielsweise zur Bereitstellung von warmem Brauchwasser verwendet werden, wobei üblicherweise sogenannte Flachbettkollektoren aus Aluminium und Kupfer zum Einsatz kommen. Wissenschaftler des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg haben in einer 2014 abgeschlossenen Studie die Eignung verschiedener Kunststoffe als Konstruktionsmaterialien für solarthermische Kollektoren untersucht. Dabei wurde eine vollständige Lebenszyklus-

ABBILDUNG 28

### Prozessschritte des bioliq®-Verfahrens





Geothermie

analyse unter Berücksichtigung aller ökonomischen und ökologischen Aspekte durchgeführt. Es zeigte sich, dass eine Fertigung von Sonnenkollektorsystemen aus Kunststoffen verschiedene Vorteile bietet: Die Umweltbelastung bei der Fertigung aus Kunststoff fällt bis zu 65 Prozent geringer aus als bei der aus Aluminium und Kupfer. Auch die Produktionskosten von Kunststoffkollektoren wären bis zu 50 Prozent geringer.

Auch die Nutzung der im Erdreich gespeicherten von der Sonne stammenden Wärmeenergie einen wertvollen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten. Bei dieser sogenannten oberflächennahen Geothermie bewähren sich Sonden und Rohre aus speziellen Kunststoffen. So hat ein deutscher Hersteller ein Geothermiekollektoren- und sondensystem entwickelt, das aus vernetztem Polyethylen besteht. Dieses Material zeichnet sich durch seine Langlebigkeit und Robustheit aus. Damit kann es kostensparend direkt im Erdreich verlegt werden, ohne dass vorher ein schützendes Sandbett eingebracht werden muss.

### Bedeutung von Seltene-Erden-Metallen

Galten sie lange Zeit als Exoten mit nur wenigen Anwendungsmöglichkeiten, sind die Metalle der Seltenen Erden (die Lanthanoide) heute allgegenwärtig, zum Beispiel als Leuchtstoffbestandteile in den Bildschirmen von Computern und Smartphones, aber auch in Leuchtstoffröhren. Bisher wurden ausgediente, leuchtstoffhaltige Materialien unter Tage deponiert – vor dem Hintergrund sich abzeichnender Verknappung eine große Verschwendung.

### Beispiel

#### Recycling von Seltene-Erden-Metallen in der Lampenproduktion

Chemiker der TU Bergakademie Freiberg in Sachsen haben ein deutlich verbessertes Verfahren zur Rückgewinnung von Seltene-Erden-Metallen entwickelt. Es ermöglicht, die Metalle rein voneinander zu trennen und auf die bisher üblichen zahlreichen Trennstufen zu verzichten.

Das auf den Namen „SepSELSA“ (Separation Seltener Erden aus entsorgungspflichtigen Abfällen in Sachsen) getaufte Verfahren wird bereits bei der Aufarbeitung der Produktionsabfälle eines Leuchtmittelherstellers eingesetzt und ermöglicht es, die zurückgewonnenen Seltene-Erden-Metalle wieder in der Produktion einzusetzen (siehe Abbil-

dung 28). Dazu werden in einem ersten Schritt die Leuchtstoffschichten, die Yttrium, Gadolinium und Europium enthalten, mittels Salzsäure von den Röhrenabfällen abgewaschen. Anschließend werden Calcium und Barium mit Schwefelsäure ausgefällt. Die anschließende Trennung der einzelnen Metalle erfolgt mit Hilfe einer Diffusionsdialyse. Hierbei wird eine Membran eingesetzt, die selektiv für die Ionen von Seltene-Erden-Metallen durchlässig ist. Nun werden die Metalle getrennt, als Oxide gefällt und schließlich reduziert, sodass sie in den Produktionsprozess zurückgeführt werden können.

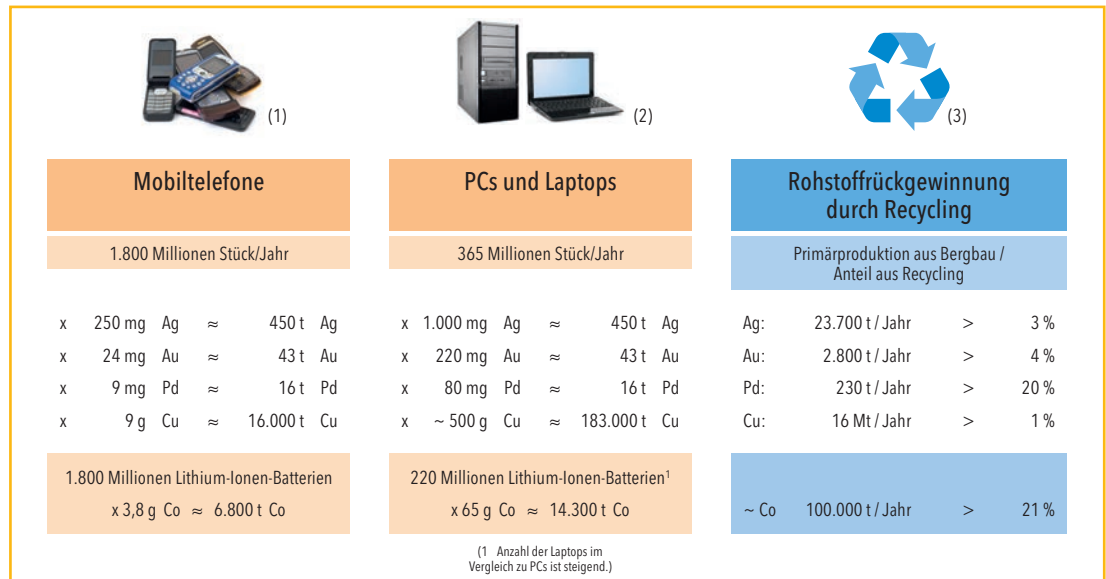
### „Energy Harvesting“ – zukünftig ohne seltene Elemente?

Moderne Technologien und Produkte in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen wären undenkbar ohne die Verwendung zahlreicher Hightech-Metalle. Etwas flapsig werden sie manchmal als „Gewürzmetalle“ bezeichnet, denn: So wie eine schmackhafte Mahlzeit erst durch die Verwendung der richtigen Gewürze gelingt, sind heute zahlreiche Technologien auf kleine, aber entscheidende Mengen dieser Metalle angewiesen. Das gilt zum Beispiel im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (siehe Abbildung 29) sowie bei der Nutzung erneuerbarer Energieträger, wo derzeit noch viele Metalle wie Molybdän, Niob, Tantal, Gallium, die Platinmetalle und viele Elemente der Seltenen Erden zum Einsatz kommen.

### Tellur in Thermoelektrika

Eine vielversprechende Technologie, die bisher auf das seltene Element Tellur angewiesen ist, ist das „Energy Harvesting“. Bei zahlreichen technischen Prozessen fällt Abwärme an, die bisher meist ungenutzt verpufft. Eine Nutzung dieser Abwärme hätte eine bessere Ausnutzung der verwendeten Energieträger und in der Summe eine Reduzierung des Energieverbrauchs zur Folge. Ein geeignetes Prinzip, Wärmeenergie auch in kleineren Mengen und auf niedrigeren Temperaturniveaus in elektrische Energie umzusetzen, sind thermoelektrische Generatoren. Diese machen sich den bereits lange bekannten sogenannten Seebeck-Effekt zunutze: An der Kontaktstelle zweier chemisch unterschiedlicher elektrischer Leiter oder Halbleiter kann über einen Temperaturgradienten eine elektrische Spannung erzeugt werden – ein Effekt, der in der Raumfahrt und in der Medizintechnik bereits seit Jahrzehnten genutzt wird.

### Recyclingpotential von Elektroschrott



Eine breite Anwendung thermoelektrischer Generatoren (TEGs) hat momentan noch mit zwei Problemen zu kämpfen: Erstens ist die thermoelektrische Effizienz, ausgedrückt durch die sogenannte Seebeck-Zahl, zu gering. Mit heutigen Thermoelektrika, also den verwendeten Halbleitermaterialien, liegen diese Werte bei ca. 1, die Schwelle für einen wirtschaftlich interessanten Einsatz wird allerdings bei Werten von 1,5 bis 2 gesehen. Zweitens sind TEGs aus verhältnismäßig seltenen Elementen zusammengesetzt und entsprechend teuer – schließlich betrug die Weltjahresproduktion von Tellur 2011 gerade einmal 96 Tonnen; sie ließe sich bequem in einer kleinen Garage unterbringen.

#### Sparsamere Fertigungsverfahren und Ersatzmaterialien

Dementsprechend richten sich intensive Forschungsanstrengungen darauf, die Energieausbeute und im Idealfall gleichzeitig die Materialeffizienz zu erhöhen sowie thermoelektrische Materialien zu entwickeln, die auf leicht verfügbaren Materialien basieren. So wurden etwa Dünnschichtverfahren entwickelt, die es ermöglichen, mit nur 100 Kilogramm Tellur mehrere Millionen TEG-Einheiten zu realisieren. Auch werden Ansätze erforscht, die organische statt anorganischer Halbleiter verwenden; allerdings haben diese naturgemäß eine niedrige Obergrenze ihrer Betriebstemperatur. Am Helmholtz-Zentrum Berlin arbeitet man zum Beispiel an Thermoelektrika auf der Basis von Silizium, dem dritthäufigsten Element in der Erdkruste. Um das in Reinform normalerweise nicht geeignete Silizium zu einem Thermoelektrikum zu machen, bringen die Berliner Forscher mit Hilfe eines speziellen Ätzverfahrens eine Ober-

flächenstruktur von wenigen milliardstel Metern (Nanometer) auf, was unter anderem dessen thermoelektrische Effizienz erhöht. Dieser Ansatz zur Effizienzsteigerung mittels Nanostrukturierung lässt sich auch bei herkömmlichen Thermoelektrika nutzen. Wenn solche Materialien einmal Marktreife erlangen, ließe sich zum Beispiel im Automobilbau die im Motorabgas enthaltene Wärmeenergie zur Stromversorgung des Fahrzeuges nutzen oder die Energieeffizienz von Hybridfahrzeugen steigern.

#### Kohlenstoffdioxid als Rohstoff von morgen

Wenn von Kohlenstoffdioxid die Rede ist, steht heute meist seine klimaschädliche Wirkung im Fokus. Oft wird dabei übersehen: Mit dem Schwinden der Rohölreserven wächst seine Bedeutung als potentieller wertvoller Rohstoff. Neben einem möglichen Einsatz zur Methangewinnung mittels Strom aus Windenergie (siehe Kapitel 5, Energie) kann das Gas als Ausgangsstoff für die Gewinnung hochwertiger Chemieprodukte dienen.

#### Beispiel

#### Katalytische Fixierung von Kohlenstoffdioxid

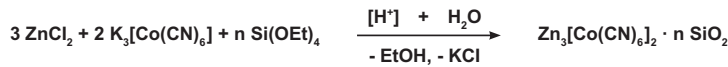
Ein deutsches Chemieunternehmen hat in Zusammenarbeit mit dem Catalytic Center der RWTH Aachen (CAT) ein Verfahren entwickelt, das über die Zwischenstufe Polyole (Polyalkanole) Kohlenstoffdioxid als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Polyurethan nutzt. Entscheidend hierfür war die Entwicklung eines geeigneten Katalysators, der das eigentlich reaktionsträge Gas auf effiziente Weise zur Reaktion bringt (siehe Abbildung 30). Bei dieser Umsetzung von



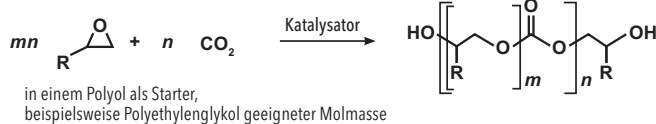
Silizium

### Katalytische Fixierung von Kohlenstoffdioxid

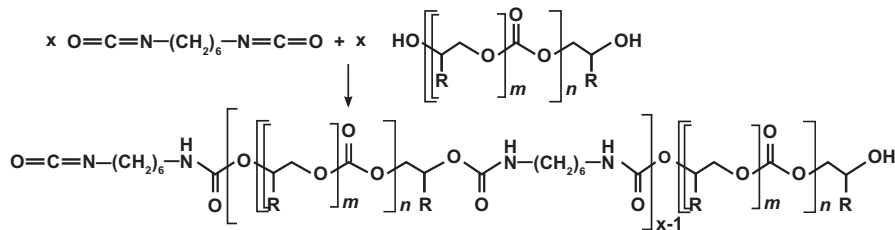
1. Darstellung des Katalysators (Zinkhexacyanokobalt in einer Siliziumdioxid-Gel-Matrix)



2. Kohlenstoffdioxid und Epoxid reagieren zum Polyethercarbonatpolyol



3. Polyurethan-Synthese - beispielhaft aus 1,6-Hexandiisocyanat und einem Polyethercarbonatpolyol



Kohlenstoffdioxid mit Propenoxid entstehen Polyethercarbonatpolyole. Das Molekulargewicht dieser Verbindungen und der Grad ihrer Funktionalisierung können durch die Wahl geeigneter Alkoholmoleküle als Starter gesteuert werden. Eine präzise Beeinflussung des Reaktionsproduktes ist außerdem über die eingesetzte Kohlenstoffdioxidmenge möglich. Die so maßgeschneiderten Polyole werden dann über die klassische Polyadditionsreaktion mit Polyisocyanaten zu Polyurethanen umgesetzt.

nenen Polyurethane den aus konventionellen Rohstoffen gewonnenen qualitativ ebenbürtig oder sogar überlegen sind. Aufgrund dieser hervorragenden Ergebnisse erfolgte im Jahr 2016 der nächste Schritt in Richtung industrieller Nutzung: In Dormagen wurde eine Produktionsanlage für kohlenstoffdioxidbasierte Polyole mit einem Jahresausstoß von 5.000 Tonnen in Betrieb genommen. Die so erzeugten Polyole dienen als Vorstufe zur Herstellung von Weichschaum für Matratzen. Dieses Anwendungsbeispiel könnte ein Vorbild für zukünftige Verfahren sein, die das Rohstoffpotential von Kohlenstoffdioxid weiter erschließen.

#### Überführung in den großindustriellen Einsatz

In intensiven Tests fand man heraus, dass die nach diesem Verfahren hergestellten Polyole und die aus ihnen gewon-

#### INFO FÜR LEHRKRÄFTE

##### Arbeitsmaterialien zu Kapitel 8: Ressourcenschonung

Die Materialien ergänzen und erweitern die Ausführungen in Kapitel 8 unter unterrichtspraktischen Gesichtspunkten. Die Bearbeitung erfordert verschiedene Arbeitsformen.

Aufgabe 8.1: Seltene Metalle - Stoffsteckbriefe mit Museumsgang (SI/SII)

Aufgabe 8.2. Bessere Ressourcennutzung von seltenen Metallen (Gruppenpuzzle) (SII)

Experiment 8.1: Kupferrecycling aus Computerschrott (SII)

Experiment 8.2 Lehrereperiment!: Recycling von Gold aus Computern (SII)

Aufgabe 8.3: Mehr Nachhaltigkeit durch Kraftstoffe aus Biomasse (SII)

Aufgabe 8.4: Herstellung von Polyurethan durch katalytische Fixierung von Kohlenstoffdioxid (SII)

Aufgabe 8.5: Kohlenstoffdioxid - besser als sein Ruf? (Poster-Ausstellung) (SII)

## Glossar

### Antikörper

Eiweißstoffe des Immunsystems von Wirbeltieren, die als Antwort auf Fremdstoffe gebildet werden

### Bioinformatik

interdisziplinäre Wissenschaft, die Probleme aus den Lebenswissenschaften mit theoretischen, computerergänzten Methoden löst

### Biomasse

Stoffmasse von Lebewesen oder deren Bestandteilen

### Biotechnologie

Interdisziplinärer Ansatz, Lebewesen und ihre Bestandteile technisch nutzbar zu machen

### Carbonisierung

Prozess des Einleitens von Kohlenstoffdioxid in eine alkalische Lösung, in dessen Folge es zur Bildung eines Carbonats kommt

### Chemiepark/Industriepark

wird als eigenes Unternehmen geführt; stellt den ansiedelnden Firmen die gesamte erforderliche Infrastruktur für die Produktion vor Ort zur Verfügung: von der Stromversorgung über die Logistik bis zur Abfallentsorgung; Analyselabore sowie auf Forschung und Entwicklung spezialisierte Firmen komplettieren das Angebot am Standort

### Derivat

abgeleitete chemische Verbindung

### DNA

Desoxyribonukleinsäure; Biomolekül und Träger der Erbinformation

### Elastizitätsmodul

Materialkennwert aus der Werkstofftechnik, der den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung bei der Verformung eines festen Körpers bei linear elastischem Verhalten beschreibt

### Enzym

Makromolekül aus der Gruppe der Proteine oder RNA, das biologische Reaktionen katalysiert

### Feinchemie

Fachdisziplin der Chemie, die sich mit chemischen Reinstoffen befasst

### Fullerene

Modifikationen von Kohlenstoff: hohle, geschlossene Moleküle aus Kohlenstoffatomen, die in Fünf- und Sechsecken angeordnet sind

### Genom

Gesamtheit aller Erbinformationen (Gene)

### Graphen

Modifikation von Kohlenstoff: zweidimensionale Struktur aus bienenwabenartig angeordneten Kohlenstoffatomen

### Halbleitermaterialien

Materialien, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der von elektrischen Leitern ( $> 10^4$  S/m) und der von Nichtleitern ( $< 10^{-9}$  S/m) liegt

### inhärent

einer Sache innewohnend

### Kohlenstoffnanoröhren

röhrenförmige Moleküle aus bienenwabenartig angeordneten Kohlenstoffatomen

### Leistungselektronik

dient zur Steuerung elektrischer Energieströme zwischen der Energiequelle und den elektrischen Verbrauchern

### Mutation

dauerhafte Veränderung des Erbmaterials

### nukleosidische Wirkstoffe

Arzneimittelwirkstoffe, die Grundstrukturen der RNA ähnlich sehen

### Nukleinsäuren

biologische Makromoleküle, die aus einer Nukleinbase, Zucker und Phosphat bestehen (siehe auch DNA, RNA)

### Patent

Schutzrecht für neue technische Erfindungen (Erzeugnisse oder Verfahren); verleiht seinem Inhaber das räumlich begrenzte und zeitlich befristete Privileg, die patentierte Erfindung allein zu nutzen und anderen die nichtautorisierte gewerbliche Nutzung zu verbieten

### Petrochemie

Herstellung von chemischen Produkten aus Erdgas und geeigneten Fraktionen von Erdöl

### Photovoltaik

Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen

### Photopolymerisation

durch photochemische Anregung initiierte radikalische oder ionische Oligomerisation oder Polymerisation

### Polymer

Makromolekül, das aus sich wiederholenden Einheiten besteht

### Polymerase-Kettenreaktion

Verfahren zur Vervielfältigung von Erbsubstanz mittels des Enzyms DNA-Polymerase

### Polymerisation

chemische Reaktion, bei der Monomere zu Polymeren umgesetzt werden

### Polypeptid

Polymer, das aus 10 bis 100 Aminosäuren besteht

### „Power-to-Gas“-Verfahren

chemischer Prozess, in dem mittels Wasserelektrolyse mit teilweise nachgeschalteter Methanisierung unter dem Einsatz von Strom aus erneuerbaren Energien ein Brenngas hergestellt wird

### Provirus

Virus-DNA, die in das Genom der Wirtszelle integriert ist

### Quantenphysik

Grundpfeiler der modernen Physik; fasst alle Phänomene und Effekte zusammen, die darauf beruhen, dass bestimmte Größen nicht jeden beliebigen Wert, sondern nur festgelegte Werte annehmen können

### Reaktor

Teil einer Anlage, in der chemische Prozesse ablaufen

### Rezeptor

Molekül, das in der Regel bei Bindung eines anderen Moleküls die Übermittlung eines biochemischen Signals auslöst

### RNA

Ribonukleinsäure; unterscheidet sich von der DNA in der chemischen Modifikation des Zuckers und einer Nucleobase

### Spezialchemie

Bereich der chemischen Industrie, der (oft nach Kundenvorgabe) spezialisierte Chemikalien herstellt; die Produkte werden meist in kleinen Mengen hergestellt, ihre Wirkung steht im Vordergrund, nicht ihre Beschaffenheit

### stöchiometrische Mengen

Mengenverhältnisse der Ausgangsstoffe einer chemischen Reaktion, die sich aus der Reaktionsgleichung ableiten lassen

### Substrat

chemische Verbindung, die in einer von einem Enzym katalysierten Reaktion umgesetzt wird

### Synthesegas

(im engeren Sinn) industriell hergestelltes Gasgemisch, das hauptsächlich aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff sowie verschiedenen weiteren Gasen besteht

### T-Helferzellen

Gruppe von Zellen des Immunsystems (T-Lymphozyten), die Helferfunktion haben

### Toxizität

Ausmaß der Giftwirkung einer Substanz

### Verteilungskoeffizient

Kenngröße, die angibt, wie sich ein Stoff zwischen zwei nicht mischbaren Phasen verteilt

### Zugfestigkeit

Werkstoffeigenschaft; die maximale mechanische Zugspannung, die der Werkstoff aushält, bevor er bricht/reißt

## Websites und Literatur

Aurel Wolf et al.; Bayer Technology Services

Dream Reactions – Stoffliche CO<sub>2</sub>-Verwertung (Abschlussbericht), Leverkusen, 2012

[www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/01RC0901.pdf](http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/01RC0901.pdf)

BAVC, DBG, DECHEMA, GBM, GDCh, VAA, VCI

Positionspapier der Chemieorganisationen aus Wissenschaft und Wirtschaft, 2016

[www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2016-11-01-position-8-chemieorganisationen-bildung-forschung-innovation.pdf](http://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2016-11-01-position-8-chemieorganisationen-bildung-forschung-innovation.pdf)

DBG, DECHEMA, DGM, GDCh, VCI

Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung, Positionspapier, 2012

[www.gdch.de/service-information/nachricht/article/neues-positionspapier-der-chemieorganisationen.html](http://www.gdch.de/service-information/nachricht/article/neues-positionspapier-der-chemieorganisationen.html)

Fraunhofer UMSICHT

Studie zur Circular Economy im Hinblick auf die chemische Industrie, 2017

[www.vci.de/ergaenzende-downloads/170728-vci-circular-economy-final-gesamtstudie.pdf](http://www.vci.de/ergaenzende-downloads/170728-vci-circular-economy-final-gesamtstudie.pdf)

IW Consult und Santiago für den VCI

Innovationen den Weg ebnen, Studie, 2015

[www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-studie-innovationen-den-weg-ebnen-kurzfassung.jsp](http://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-studie-innovationen-den-weg-ebnen-kurzfassung.jsp) (inkl. Begleitmaterialien)

Dr. N. Malanowski, Dr. J. C. Brandt und

VDI Technologiezentrum (Hrsg.)

Innovations- und Effizienzsprünge in der chemischen Industrie? Wirkungen und Herausforderungen von Industrie 4.0 & Co., Studie, 2014

[www.vditz.de/publikation/innovations-und-effizienzspruenge-in-der-chemischen-industrie/](http://www.vditz.de/publikation/innovations-und-effizienzspruenge-in-der-chemischen-industrie/)

VCI

Roadmap – Wie wird Deutschland Innovationsweltmeister?, 2016

[www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-roadmap-12-punkte-plan-innovationsweltmeister-deutschland.jsp](http://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-roadmap-12-punkte-plan-innovationsweltmeister-deutschland.jsp) (inkl. Begleitmaterialien)

VCI, DECHEMA

Positionspapier – Verwertung und Speicherung von CO<sub>2</sub>, 2009

[www.vci.de/langfassungen-pdf/vci-dechema-positionspapier-zur-verwertung-und-speicherung-von-co2.pdf](http://www.vci.de/langfassungen-pdf/vci-dechema-positionspapier-zur-verwertung-und-speicherung-von-co2.pdf)

VCI, Deloitte

Chemie 4.0 – Wachstum durch Innovation in einer Welt im Umbruch, Studie, 2017

[www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-deloitte-studie-chemie-4-punkt-0-langfassung.jsp](http://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/vci-deloitte-studie-chemie-4-punkt-0-langfassung.jsp) (inkl. Begleitmaterialien)

VCI, IG BCE, BAVC

Leitlinien zur Nachhaltigkeit für die Chemische Industrie Deutschland, Initiative „Chemie hoch 3“, 2013

[www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/leitlinien-nachhaltigkeit.pdf](http://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/leitlinien-nachhaltigkeit.pdf)

VCI unter Mitarbeit der PROGNOSE AG

Die deutsche chemische Industrie 2030, Studie, Update 2015/2016

[www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/vci-prognos-studie-die-deutsche-chemische-industrie-2030-update-2015-2016-mit-alternativszenarien.pdf](http://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/vci-prognos-studie-die-deutsche-chemische-industrie-2030-update-2015-2016-mit-alternativszenarien.pdf)

Verband Forschender Arzneimittelhersteller e. V. (vfa)

Medizinische Biotechnologie in Deutschland 2017

[www.vfa-bio.de/embed/bcg2017.pdf](http://www.vfa-bio.de/embed/bcg2017.pdf)

In Deutschland zugelassene Arzneimittel für die Personalisierte Medizin

[www.vfa.de/personalisiert](http://www.vfa.de/personalisiert)

Dr. Dominik von Au, Dr. Volker Fitzner,

Dr. Bernd Schneider und Fabian Stöcker

PwC AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (Hrsg.)

Erfolgsfaktor Innovation: Chancen und Herausforderungen für die chemische Industrie, Studie, 2011

<http://docplayer.org/1741548-Erfolgsfaktor-innovation-chancen-und-herausforderungen-chemische-industrie.html>

Zeitbild Verlag und Agentur für Kommunikation GmbH

Berlin (Hrsg.) in Zusammenarbeit mit dem Verband

Forschender Arzneimittelhersteller e. V. (vfa)

Zeitbild Wissen „Personalisierte Medizin“, 2011

[www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2011/09/ZB\\_Wissen\\_PersonalMedizin.pdf](http://www.zeitbild.de/wp-content/uploads/2011/09/ZB_Wissen_PersonalMedizin.pdf)

ZEW, NIW

Innovationsindikatoren Chemie 2015

Studie im Auftrag des Verbands der Chemischen Industrie e.V., 2015

[www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/kurzstudie-innovationsindikatoren-chemie-2014-von-zew-und-niw.pdf](http://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/kurzstudie-innovationsindikatoren-chemie-2014-von-zew-und-niw.pdf)

## Impressum

### Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie im Verband  
der Chemischen Industrie e. V. (FCI)  
Mainzer Landstraße 55  
60329 Frankfurt am Main  
[www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)  
Tel.: +49 69 25 56-0

### Erstauflage

September 2018  
26.000 Exemplare  
Alle Rechte vorbehalten

Das Unterrichtsmaterial ist über das Internet  
abrufbar: [www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)

Redaktion und Gesamtkoordination  
Birgit Kullmann, FCI, Frankfurt

### Autoren

FLAD & FLAD Communication GmbH  
[www.flad.de](http://www.flad.de)  
Dr. Andreas Jungbluth, Dr. Markus Döring, Dr. Orfeas Dintsis

### Fachliche Beratung

Dr. Rolf Hömke, VFA, Berlin  
Dr. Hans-Jürgen Klockner, VCI, Frankfurt

### Wissenschaftliche und fachdidaktische Beratung

Prof. Dr. Bernd Ralle, Technische Universität Dortmund  
Petra Wlotzka, Zentrum für schulpraktische Lehrerbildung, Dortmund

### Gestaltung

FLAD & FLAD Communication GmbH  
Regine Radina, Melanie Lerzer

### Druck

hofmann druck Nürnberg GmbH & Co. KG – klimaneutral  
gedruckt auf Papier aus nachhaltiger Waldwirtschaft

## Bildnachweise

Westend61 – gettyimages (mod.), Cover; Chris – Fotolia, Cover;  
Creatas Images – Thinkstock, Seite 5/1, 24, Abb. 10/10; Ravitaliy –  
Thinkstock, Seite 5/2, 32; scanrail – Thinkstock, Seite 5/3, 16,  
Abb. 5/2; Totojang – Thinkstock, Seite 5/4, 22; Raeva – Thinkstock,  
Seite 5/5, 45; compoundchem.com (mod.), Seite 5/6, 54; Jonjutabe  
– Thinkstock, Seite 5/7, 23; Tribalium – Thinkstock (mod.), Seite 11,  
Abb. 3; AlinaMD – Thinkstock, Seite 12; Petmal – Thinkstock, Seite 15;  
XXLPhoto – Thinkstock, Seite 16, Abb. 5/1; Safak Oguz – Thinkstock,  
Seite 16, Abb. 5/3; optimarc – shutterstock.com, Seite 16, Abb. 5/4;  
Forance – shutterstock.com, Seite 16, Abb. 5/5; Prof. Dr. rer. nat. Britta  
Nestler – Karlsruher Institut für Technologie, Seite 17, Abb. 6;  
molekuul\_be – shutterstock.com, Seite 19; Evonik Industries AG,  
Seite 23, Abb. 9; Belekekin – Thinkstock, Seite 24; Kirillm – Thinkstock,  
Seite 24, Abb. 10/1; Dynamic Graphics – Thinkstock, Seite 24,  
Abb. 10/2; Chesky\_W – Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/3; Jonjutabe –  
Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/4; CorelPower – Thinkstock, Seite 24,  
Abb. 10/5; Dmytro Pomoshnikov – Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/6;  
Vasily Smirnov – Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/7; Trismile – Thinkstock,  
Seite 24, Abb. 10/8; Photodisc – Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/9;  
Zlikovec – Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/11; Zoonar RF – Thinkstock,  
Seite 24, Abb. 10/12; Ratth – Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/13; Czgur  
– Thinkstock, Seite 24, Abb. 10/14; PragasiLalao – Thinkstock, Seite 24,  
Abb. 10/15; protec3D.de (mod.) Seite 25, Abb.11; science photo –  
stock.adobe.com, Seite 25; jean soong – stock.adobe.com, Seite 26;  
larenenko – Thinkstock, Seite 27; A. Vollmar, Th. Dingermann, WVG,  
Stuttgart (mod.), Seite 29/31, Abb.12/13; martynowi\_cz – Thinkstock,  
Seite 31; juefraphoto – stock.adobe.com, Seite 33; macrovector – Think-  
stock, Seite 33, Abb. 14; Vsanandhakrishna – Thinkstock, Seite 35;  
koya79 – Thinkstock, Seite 39; Fraunhofer ICT, Seite 40; skalapendra –  
Thinkstock, Seite 44, Abb. 20; alex-mit – Thinkstock (mod.), Seite 45,  
Abb. 21; PragasiLalao – Thinkstock, Seite 47; nmcandre – Thinkstock,  
Seite 49; Stephan Sühling – stock.adobe.com, Seite 50. Abb. 23/1;  
maxfrank.com, Seite 50. Abb. 23/2; Lucem Lichtbeton, Seite 50,  
Abb. 23/3; HeidelbergCement AG, Seite 50, Abb. 23/4; R. Thyroff –  
eigenes Werk, Seite 50, Abb. 23/5; RWTH Aachen University, Seite 51,  
Abb. 24; Prof. Dr. rer. nat. Karsten Schubert – Hochschule Karlsruhe,  
Seite 51; Eraxion – Thinkstock, Seite 52, Abb. 25/1; eranicle – Think-  
stock, Seite 52, Abb. 25/2; Dr. Dietger Grosser – Technische Universität  
München (mod.), Seite 52, Abb. 25/3; FLAD & FLAD Communication  
GmbH, Seite 53; 3D-DLW (mod.), Seite 53, Abb. 26/1; Dr.-Ing. Jens  
Bauer – Karlsruher Institut für Technologie, Seite 53, Abb. 26/2;  
Rcfotostock – stock.adobe.com., Seite 55; bioliq.de (mod.) – Seite 56,  
Abb. 28, lavizzara – stock.adobe.com. Seite 57; Zoonar RF – Thinkstock,  
Seite 58, Abb. 29/1; fotos-v – Thinkstock, Seite 58, Abb. 29/2;  
Zoonar/N.Sorokin – Thinkstock, Seite 58, Abb. 29/3; Björn Wylezich –  
stock.adobe.com. Seite 59



**Fonds der Chemischen Industrie im  
Verband der Chemischen Industrie e. V.**

Mainzer Landstraße 55  
60329 Frankfurt am Main  
Telefon: +49 69 25 56-0  
Telefax: +49 69 25 56-14 71  
E-Mail: [fonds@vci.de](mailto:fonds@vci.de)

Weitere Informationen auch im Internet:  
[www.vci.de/fonds](http://www.vci.de/fonds)