



FCI
FONDS DER
CHEMISCHEN
INDUSTRIE



Themengebiet: Schule, Ausbildung, Bildung

Informationsserie
Chemie – Schlüssel zur Energie von morgen





	Seite
Inhalt	3
Vorwort	4
Arbeitsblätter und Versuche	5
1. Einleitung	6
2. Methodisch-didaktische Einführung	8
3. Grundbegriffe der Energie	10
4. Chemie und Energie	16
5. Beleuchtung	22
6. Wohnen und Wärme	34
	41
	45
	50
6.1 Photovoltaik	
6.2 Solarthermie	
6.3 Stationäre Brennstoffzelle	
6.4 Dämmmaterialien	
7. Mobilität	54
	60
	63
7.1 Mobile Kommunikation und Unterhaltung	
7.2 Energiesparen durch Leichtbau	
7.3 Treibstoffe aus Biomasse	
8. Websites und Literatur	65
9. Glossar	66
Impressum	69

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wurde im gesamten Textheft die männliche Sprachform gewählt.

Im Glossar können die mit * markierten Begriffe nachgeschlagen werden.

Energie gilt als das Lebenselixier unserer Zivilisation. Sie ist die treibende Kraft hinter Wachstum und Wohlstand.

Im Umgang mit ihr zeichnet sich international ein Wandel ab, hin zu verantwortungsvollerem, nachhaltigerem Handeln. Die Gründe dafür liegen vor allem im Klimawandel, als dessen Hauptursache die vom Menschen gemachten Kohlenstoffdioxidemissionen gelten.

Ein effizienterer Umgang mit Energie erfordert Innovationen in zahlreichen Branchen und Lebensbereichen. Viele dieser Innovationen stammen aus der chemischen Industrie. Beginnend bei der Möglichkeit, Verbrennungsprozesse in Kraftwerken oder Antriebe von Transportmitteln effizienter zu gestalten, über Konzepte zur Nutzung bisher weitgehend ungenutzter Energieträger wie Wasserstoff, bis hin zu neuen Materialien für eine wirkungsvollere Umwandlung von Sonnen- und Windenergie.

Da Energie einen erheblichen Kostenfaktor in der Produktion darstellt, hat die chemische Industrie bereits aus wirtschaftlichen Gründen ein großes Interesse, in den eigenen Betrieben energieeffizient zu produzieren.

Dazu gehören auch Strategien zur Effizienzverbesserung im Bereich der Prozessführung, zum Beispiel durch verstärkte Nutzung der Katalyse.

Ebenso wichtig wie die fortschreitende Verbesserung von Materialien, Produkten und Verfahren ist die chemische Energieforschung. Sie befasst sich zum Teil mit unkonventionellen, gänzlich neuen Anwendungen. Ihre Forschungsaktivitäten sind eher auf mittel- oder langfristige Zeiträume ausgelegt und werden, realistisch betrachtet, auch nicht alle zu Erfolgen führen. Noch ist zum Beispiel nicht klar, ob eines Tages Wasserstoff für Brennstoffzellenantriebe in Bioreaktoren durch Mikroalgen produziert werden kann. Oder wie schnell foliendünne, transparente und beliebig große Farbstoffsolarzellen mit ausreichendem Wirkungsgrad technisch und wirtschaftlich realisierbar sind.

Die vorliegende Informationsserie behandelt die Wechselbeziehung von Chemie und Energie im Kontext aktueller Anwendungen sowie technischer, ökonomischer und ökologischer Chancen, aber auch Hemmnisse. Wir haben dieses spannende und gesellschaftlich wichtige Thema anschaulich und für den naturwissenschaftlichen Unterricht verwertbar aufbereitet.

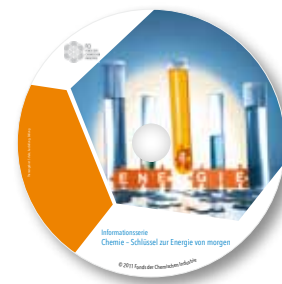
Ebenso wie die anderen Unterrichtsmaterialien des Fonds der Chemischen Industrie wird die Informationsserie „Chemie – Schlüssel zur Energie von morgen“ Schulen und Bildstellen kostenlos zur Verfügung gestellt. Das Textheft wird durch eine beiliegende CD-ROM ergänzt, auf der Vorschläge für Schülerarbeitsblätter und -versuche gemacht werden. Sie enthält zudem die Abbildungen des Textheftes als PowerPoint-Dateien. Das Textheft und die PowerPoint-Dateien stehen auch im Internet unter www.fonds.vci.de zum Download bereit.

Frankfurt am Main, im Juli 2011

Der Herausgeber

Arbeitsblätter Physik – Übersicht

PHY-AB Nr.	Thema	Niveau	Kapitel	Seitenbezug
1	Energieumwandlungsketten	A Basis	3	10
2	Tabelle zur Energieumwandlung	A Basis	3	10
3	Das Wachstum von Algen in Tropfsteinhöhlen	B Mittelstufe	5	24
4	Wie viel Energie steckt in einer Badewanne voll warmem Wasser?	B Mittelstufe	6.2	42
5	Modellrechnung zur Kraftstoffeinsparung	B Mittelstufe	7.2	60



Experimente Physik – Übersicht

PHY-EX Nr.	Thema	Niveau	Kapitel	Seitenbezug
1	Einfache Experimente	A Basis	3	10
2	Erwärmung von Körpern durch Wärmestrahlung	B Mittelstufe	3	11
3	Messung des Wirkungsgrades eines elektrischen Wasserkochers	B Mittelstufe	3	11
4	Vergleich der Beleuchtungsstärke einer Glühlampe und einer Energiesparlampe mithilfe der Fettfleckphotometrie	A Basis B Mittelstufe	5	22
5	Betrachtung der Spektren verschiedener Lampen mit einfachen Spektrometern	B Mittelstufe	5	24
6a	Die Sperrspannung verschiedenfarbiger LEDs [Grundversuch]	C Oberstufe	5	31
6b	Die Sperrspannung verschiedenfarbiger LEDs [fortgeschritten => Planck-Konstante]	C Oberstufe	5	31
7	Experiment mit Solarzellen und einfachen „Verbrauchern“	A Basis	6.1	34
8	Der Wirkungsgrad einer Solarzelle	C Oberstufe	6.1	37
9	Selbstbau eines Solarkocher-Modells	A Basis	6.2	41
10	Wettbewerb zur Wärmedämmung mit verschiedenen Materialien	A Basis B Mittelstufe	6.4	50–51

Experimente und weiterführende Aufgaben Chemie – Übersicht

CH-EX Nr.	Thema	Niveau	Kapitel	Seitenbezug
1	Modellversuch zum Autokatalysator	B Mittelstufe	4	16
2	Kalorimeter und Wärmekapazität	B Mittelstufe	4	19
3	Satz von Hess: Bestimmung der Reaktionsenthalpie	B Mittelstufe	4	21
4	Betrieb einer Brennstoffzelle	B Mittelstufe	6.3	45
5	Volta-Element – Die Idee des Herrn Volta	B Mittelstufe	7.1	55
6	Elektrolyse einer Zinkbromidlösung an Kohlelektroden und deren Umkehrung	B Mittelstufe	7.1	55
7	Wie ist eine Taschenlampenbatterie aufgebaut?	B Mittelstufe	7.1	56
8	Blei-Akkumulator Wieder verwenden statt wegwerfen	B Mittelstufe	7.1	56
9	Recycling von Akkuschrott	B Mittelstufe	7.1	57
10	Lithium-Ionenbatterie Leistungswunder durch Lithium-Ionen	C Oberstufe	7.1	58
11	Nickel/Metallhydrid-Akku(mulator)	C Oberstufe	7.1	59

1. Einleitung



Chemie und Energie sind ein perfektes Paar. Ohne das physikalische Verständnis der Energie und der Umwandlung von Energieformen ineinander ist die wissenschaftliche Erklärung chemischer Reaktionen nicht möglich. Umgekehrt spielen chemische Reaktionen eine entscheidende Rolle dabei, wie wir Energie gewinnen, speichern, umwandeln und nutzen.

In unserem Alltag finden wir hierfür zahlreiche Beispiele. Sie lassen uns über das naturwissenschaftliche Grundverständnis hinaus auf sehr lebensnahe Weise erkennen, wo Nutzen und Perspektiven der Wechselbeziehung von Chemie und Energie liegen. Wir sehen es den Erzeugnissen der chemischen Industrie nicht immer an – aber bereits bei der Herstellung vieler chemischer Produkte spielen moderne Katalysatoren, beispielsweise biotechnologisch gewonnene Enzyme, eine immer wichtigere Rolle. Sie helfen, den Energieaufwand und den Verbrauch an wertvollen Ressourcen im Produktionsprozess deutlich zu senken.

Energieeinsparungen dank Chemie: Dieses Prinzip findet sich in der Lichttechnik ebenso wie im Bauwesen. Es gilt in der Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie genauso wie in der elektronischen Kommunikation und Unterhaltung. Längst haben Kompaktleuchtstofflampen die klassische Glühlampe in fast allen Bereichen abgelöst. Ihnen folgen die sehr kleinen, hellen und noch energieeffizienteren Leuchtdioden (LEDs) auf Basis von Halbleiterkristallen nach. Noch weitestgehend ungenutzte Potenziale sehen Experten auch in den organischen Leuchtdioden (OLEDs), weil diese wenig Strom verbrauchen und für den Display- und Beleuchtungssektor flexibel einsetzbar sind.

Nicht Licht durch Stromfluss, sondern Stromfluss durch Lichteinfall – das ist das Grundprinzip der Photovoltaik. Im Spektrum der erneuerbaren Energien gewinnt die Nutzung der Sonnenenergie immer größere Bedeutung. Und auch hier kann man beobachten, wie technologischer Fortschritt die Wirkungsgrade und Einsatzmöglichkeiten von Solarmodulen verbessert. Dies zeigt sich etwa im Vergleich der starren Solarzellen aus kristallinem Silicium mit den modernen, flexiblen Dünnschichtsolarzellen. Aber die Forschung denkt noch weiter: Foliendünne, transparente Module mit organischen Halbleitermaterialien

könnten – angebracht an der Fassade – in Zukunft ganze Hochhäuser mit Strom versorgen, denn diese Materialien sind photoreaktiv, d. h. in ihnen wird durch Belichtung eine elektrische Spannung erzeugt. Sie wären durch Drucktechniken in der Massenproduktion sehr günstig und umweltverträglich herzustellen.

Neben dem Licht der Sonne ist auch die Wärmegewinnung und -speicherung in modernen Energiekonzepten fest verankert. Ohne wirksame Absorbermaterialien wäre Solarthermie für die Warmwasserbereitung und Heizung lange nicht so effektiv. Die gewonnene Wärme auch im Haus zu halten, ist möglich durch innovative Dämmstoffe, zum Beispiel aus organischen Polymeren wie Polystyrol oder anorganischen Polymeren wie Silikat-Aerogelen sowie Naturfasern.

Energie muss auch bereitgestellt werden, damit wir mobil sein können. Die Verbrennung fossiler Energieträger, vor allem für Fahrzeugantriebe, ist wegen der Endlichkeit dieser Rohstoffe auf lange Sicht ein Auslaufmodell. Eine mögliche Lösung des Problems ist der Umstieg auf Biokraftstoffe aus Pflanzen. Hier befasst sich die Forschung intensiv damit, feste Biomasse zu energiereichen Flüssigtreibstoffen umzuwandeln. Parallel hierzu befinden sich zahlreiche Konzepte der Elektromobilität bereits in der Erprobung. Schon heute gibt es in Deutschland Modellregionen, in denen akkubetriebene Pkw fahren und wo ein ausreichendes Netz an „Stromtankstellen“ aufgebaut wird. Dies wäre nicht möglich ohne die Elektrochemie und neue Materialien, mit denen sich die Leistung von Ionenakkus oder Brennstoffzellen optimieren lässt. Fortschritte auf diesem Gebiet kommen nicht nur dem Verkehrs- und Transportwesen zugute, sondern auch der Leistung und dem Bedienkomfort der vielen kleinen „mobilen Endgeräte“, die uns täglich begleiten – wie Laptop, MP3-Player oder Rasierapparat.

Power aus der Chemie für den Energiesektor – ein Thema, das Spannung garantiert.

Methodisch-didaktische Einführung

Der Begriff »Energie« spielt in allen drei naturwissenschaftlichen Fächern über alle Klassenstufen hinweg eine zentrale Rolle. Fundamentale Größen wie die Energie werden allerdings nur dann begreiflich, wenn man klarmacht, welche verschiedenen Phänomene sie jeweils zusammenfassen und wie sie das tun. Dabei werden Gemeinsamkeiten und Regeln sichtbar. Über die Energie sind Naturerscheinungen miteinander verknüpft, die aus verschiedenen fachlichen Perspektiven betrachtet werden können.

Bei der Gestaltung des Informationspaketes sind die Autoren davon ausgegangen, dass für eine aufbauende, vertikale Entwicklung eines Basiskonzepts in jedem Fach eine Reihe von Inhalten und Begriffsbildungen als verbindliche Anforderungen von den Schülern verstanden werden müssen. Diese werden im vorliegenden Informationspaket auf drei Anspruchsniveaus dargestellt.

Grundlagen – am Phänomen orientierte, exemplarische Begegnung mit dem Thema.

A Basis

Darlegung der wesentlichen konzeptuellen Prinzipien mit ersten quantitativen und formalisierten Zugängen, die inhaltlich auf einem oberen Mittelstufenniveau zu realisieren sind.

B Mittelstufe

Konkretisierung an ausgewählten Beispielen auf Oberstufenniveau mit detaillierten chemisch-physikalischen Erklärungen.

C Oberstufe

Auf dem 1. Niveau erfolgt eine kontextorientierte Begegnung mit dem Thema, und gleichzeitig werden wichtige Begriffe wie Energieformen, Energiewandlung und Energieentwertung propädeutisch thematisiert. An weiteren Beispielen erfolgt auf dem 2. Niveau mit ersten quantitativen Betrachtungen die Einführung wesentlicher Größen und Einheiten für die physikalisch-chemische Beschreibung energetischer Vorgänge, hier unter besonderer Berücksichtigung der Begriffe Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Wirkungsgrad. In der dritten Ebene geht es im Oberstufenunterricht schließlich um die Einführung und inhaltliche Erläuterung/Erklärung von Begriffen wie Enthalpie und freie Enthalpie.

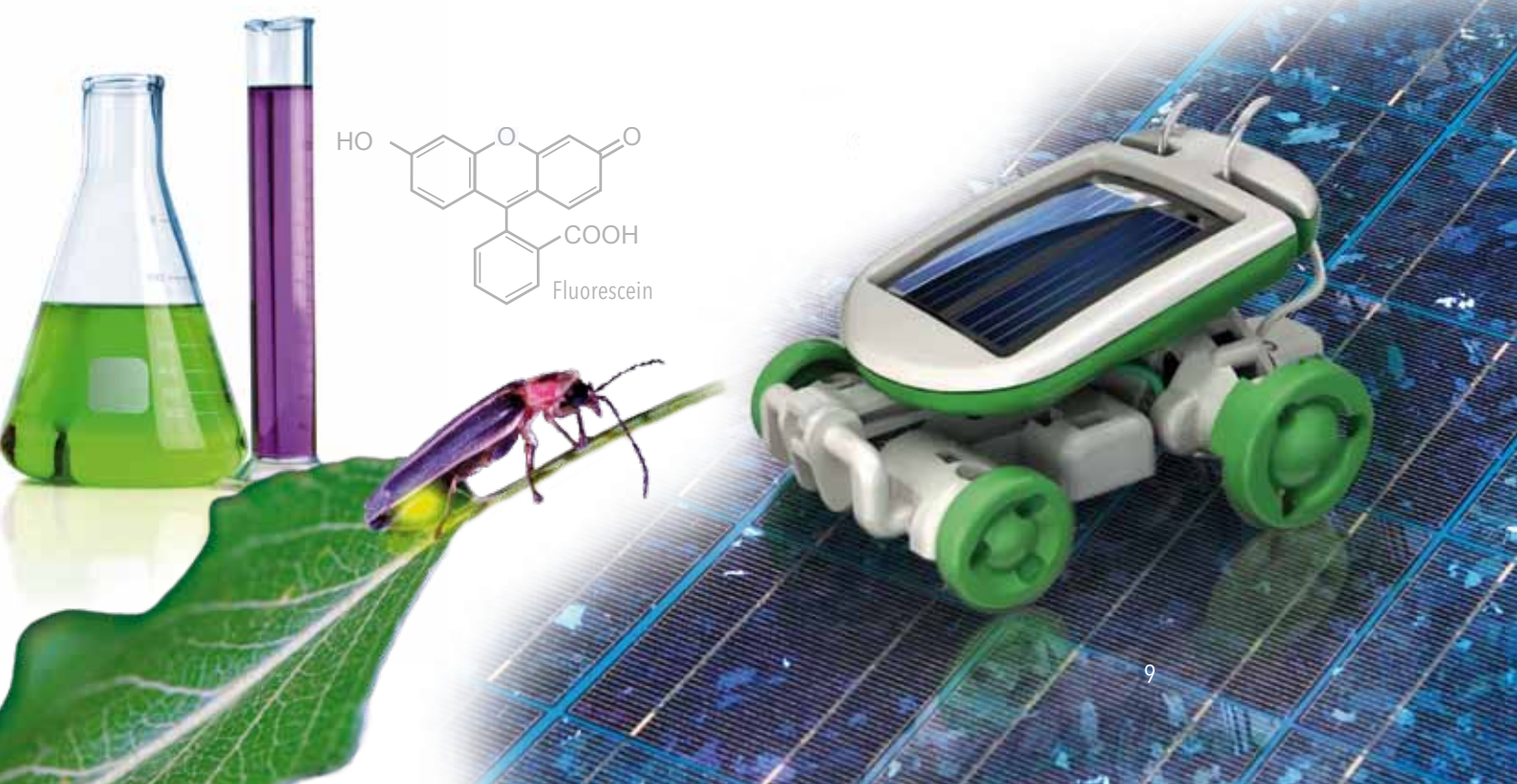
Die Beziehung der Chemie zum Thema Energie wird ebenfalls auf den drei Niveaus dargestellt. Es finden sich Beispiele für einfache Betrachtungen energiereicher Stoffumwandlung über elektrochemische und kalorimetrische Prozesse hin zu quantitativen Beschreibung des Energieumsatzes bei chemischen Reaktionen. Alle Aspekte sind begleitet von Arbeitsblättern der Physik und Chemie sowie einer Reihe erprobter Experimente, die ebenso wie alle Abbildungen auf der CD-ROM zu finden sind. Die Begleitmaterialien sind gezielt auf ihren möglichen Einsatz (Niveau, Altersgruppe) abgestimmt. Die Zuordnungen sind jeweils angegeben, sodass die Unterrichtsplanung erleichtert wird.



Die für dieses Basiskonzept unerlässliche horizontale Verknüpfung zwischen den Nachbardisziplinen Chemie, Biologie und Physik ist jedoch von nicht minderer Bedeutung und ist ein besonderes Anliegen der Autoren. Nachdem die Grundlagen des Themas behandelt und die Beziehung der Chemie zum Thema herausgestellt worden ist, kann die Reihenfolge der Themen Beleuchtung, Wohnen und Wärme und Mobilität frei kombiniert werden. Jedes Teilthema wird im Textteil eingeleitet und in wichtigen Zusammenhängen erläutert. Die den einzelnen Teilaspekten zugeordneten Arbeitsblätter erlauben ein vertieftes Eindringen in die Thematik. Wo möglich und sinnvoll sind erprobte Experimente beschrieben, die eine problemorientierte und motivierende Erarbeitung der Teilaspekte begleiten. Alle Schülermaterialien sind so aufgebaut, dass allein ein „Nachlesen“ und „Nachkochen“ nicht zum Verständnis führen wird. Vielmehr steht die Auseinandersetzung des Schülers mit dem Lerngegenstand im Mittelpunkt.

Die in diesem Informationspaket behandelten Teilthemen sind von den Bildungsstandards Chemie und Physik für den mittleren Schulabschluss prinzipiell abgedeckt, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Für den Oberstufenunterricht bestehen keine Probleme, die genannten Beispiele zu thematisieren; hier wird die Lehrkraft eigene Schwerpunkte setzen. Alle Anwendungen, die in diesem Informationspaket angesprochen werden, spielen nicht nur im Alltag der Schülerinnen und Schüler eine unmittelbare und spürbare Rolle; an ihnen lassen sich zugleich wichtige chemische und physikalische Konzepte veranschaulichen und erarbeiten. Auf diese Weise können sich Kontextorientierung und Konzeptbezug sehr gut ergänzen.

Das Informationspaket hilft, die (häufig unterschätzten) Grade der Vernetzung des Themas Energie innerhalb eines naturwissenschaftlichen Faches und auch zwischen den Fächern für die Schülerinnen und Schüler sichtbar werden zu lassen – eine wichtige Voraussetzung für anschlussfähiges und nachhaltiges Lernen.



A Basis

Energie – Grundlagen und Definition

Energie ist ein grundlegender Begriff der es erlaubt, Vorgänge und Gesetzmäßigkeiten in der Natur und in der Technik zu beschreiben.

Doch Energie ist nicht gleich Energie. Sie kommt in zahlreichen Formen vor, die auf unterschiedliche Weise ineinander umgewandelt werden können:

- Der Mountainbike-Fahrer „arbeitet“ sich den Berg hoch, er erlangt dabei **Lageenergie**. Dabei nutzt er die Energie, die in seiner Nahrung steckt. Sie ermöglicht ihm, Arbeit zu verrichten. In seinen Muskelzellen wird diese **chemische Energie** in **Bewegungsenergie** umgewandelt – allerdings nicht vollständig, denn ein Teil wird zu **thermischer Energie**: Der Radfahrer kommt ins Schwitzen.
- In Solarzellen wird **Strahlungsenergie** direkt in **elektrische Energie** umgewandelt, ein Elektromotor wandelt

diese **elektrische Energie** in **Bewegungsenergie**, ein Tauchsieder in **thermische Energie** um.

So gibt es vielfältige Beispiele für **Energieformen** und **Energiewandler**.

Wärme entsteht übrigens immer, wenn Energieformen gewandelt werden – umgekehrt kann **Wärmeenergie** jedoch nicht vollständig in andere Energieformen umgewandelt werden. Man spricht deshalb in diesem Zusammenhang auch von „**Abwärme**“ oder „**Energieentwertung**“.

METHODISCHE ANMERKUNG

Einfache Experimente (PHY-EX1)

Vorschläge für zahlreiche, einfache Experimente zum Thema „Energieumwandlung“.

ABBILDUNG 3-1

Beispiele für Energiewandlung



METHODISCHE ANMERKUNG

Energieumwandlungsketten (PHY-AB1) und Tabelle zur Energieumwandlung (PHY-AB2)

Die Arbeitsblätter vermitteln ein Verständnis davon, wo im Alltag Energieumwandlung eine Rolle spielt.

Vom Kochfeld zum Schutzanzug:
Wie Wärme übertragen wird

Energie kann auf unterschiedliche Arten übertragen werden.

Eine Möglichkeit ist die Übertragung durch **Wärmestrahlung**, d. h. durch elektromagnetische Wellen, zum Beispiel durch sichtbares Licht oder Infrarotlicht. Letzteres umfasst elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen zwischen 780 nm und 1.000.000 nm (1 mm). Ein Kochfeld aus Glas-keramik überträgt seine Wärmeenergie im Wesentlichen durch Infrarotstrahlung auf Töpfe oder Pfannen.

☞ METHODISCHE ANMERKUNG

Experiment zur Erwärmung von Körpern durch Wärmestrahlung (PHY-EX2)

Messung des Wirkungsgrades eines elektrischen Wasserkochers (PHY-EX3)

Siehe Versuchsvorschriften.

Wärme „steckt“ in der schnellen Schwingung beziehungsweise Bewegung von Atomen und Molekülen eines Stoffes. Man kann **thermische Energie** also als die Bewegungsenergie dieser Teilchen auffassen: Je schneller diese Bewegung, desto mehr **thermische Energie** hat ein Feststoff, eine Flüssigkeit oder ein Gas und desto höher ist die Temperatur. Durch Kontakt zwischen Körpern unterschiedlicher Temperatur fließt **thermische Energie** vom wärmeren zum kälteren Körper. Wie schnell dieser Wärme-**fluss** – die sogenannte **Wärmeleitung** – erfolgt, ist unter anderem abhängig von der Wärmeleitfähigkeit der Materialien. Bei einem Heizkörper soll Wärme möglichst schnell übertragen werden. Deshalb besteht er aus einem Material mit hoher Wärmeleitfähigkeit (heutzutage meist Stahl) und ist gerippt, so dass er eine große Kontaktfläche mit der zu erwärmenden Luft hat.

Wärmeübertragung unerwünscht:

Feuerwehrleute im Einsatz tragen Hitzeschutzanzüge, die aus isolierendem Material bestehen, also einem Material mit schlechter Wärmeleitfähigkeit. Außerdem haben solche Anzüge eine metallisierte Oberfläche, die von Flammen ausgehende Infrarotstrahlung reflektiert.

Wie effektiv geschieht Energieumwandlung?

Bei Heizanwendungen ist es das Ziel, den Energiegehalt beispielsweise von Heizöl möglichst vollständig in nutzbare Wärmeenergie zu überführen. Das Verhältnis von eingesetzter zu nutzbarer Energie wird dabei als **Wirkungsgrad** bezeichnet.

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{nutzbare Energie}}{\text{eingesetzte Energie}} \quad \text{oder} \quad \eta = \frac{W_{\text{aus}}}{W_{\text{ein}}}$$

Bei modernen Gasheizungen liegt dieser zum Beispiel bei etwa 0,9. Das heißt: 90 Prozent der im Gas enthaltenen chemischen Energie wird tatsächlich zum Erwärmen der Wohnung genutzt. Bei einer herkömmlichen Glühlampe hingegen werden nur etwa 5 Prozent der eingesetzten elektrischen Energie in sichtbares Licht umgewandelt; der große Rest „verpufft“ als Wärme. Der erwähnte Mountainbike-Fahrer hat übrigens einen maximalen Wirkungsgrad von 0,3.

☞ TABELLE 3-1

Wärmewirkungsgrade von Verbrennungsprozessen (Umwandlung chemischer in thermische Energie)

Wärmequelle	Wirkungsgrad (%)
Gasherd (Haushalt)	30–40
Kohleofen	30–50
Kohleofen (Industrie)	80–90
Gasheizung	80–90

Bei der Betrachtung des Wirkungsgrades und der quantitativen Verhältnisse bei der Umwandlung von Energieformen stellt sich die Frage nach der Einheit, in welcher wir Energie messen. Schauen wir uns genau um, so begegnet uns diese Einheit täglich, und zwar auf Lebensmittelverpackungen: Das **Kilojoule**. Man kann das **Joule** (nach dem englischen Physiker James Joule) unterschiedlich definieren, je nachdem ob man mechanische Arbeit oder Wärmemengen betrachtet. Doch wir wollen uns hier auf Letzteres beschränken: Um ein Gramm Wasser von 15 °C auf 15,239 °C zu erwärmen benötigt man ein Joule.

C Oberstufe

Energie im Fluss – Emission, Absorption & Co.

Alle Körper emittieren und absorbieren elektromagnetische Strahlung in einem weiten Spektrum. Wenn elektromagnetische Strahlung auf einen Gegenstand trifft, so wird sie teilweise reflektiert und teilweise absorbiert – ein farbiger Körper reflektiert viel sichtbares Licht, während ein dunkler Körper den größten Teil absorbiert. Die von einer Oberfläche emittierte Strahlungsleistung lässt sich mit dem Stefan-Boltzmann'schen Gesetz beschreiben:

$$P_E = e \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

P_E : emittierte Leistung

e : Emissionsgrad, liegt zwischen 0 und 1
abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit

σ : Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

A : Größe der Oberfläche

T : absolute Temperatur* in Kelvin

HINWEIS

Kelvin ist die Einheit der absoluten Temperatur.
Der absolute Nullpunkt (also 0 K) liegt bei $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Emittiert ein Körper mehr Strahlung als er absorbiert, so kühlt er ab und erwärmt dabei seine Umgebung. Absorbiert er hingegen mehr als er emittiert, erwärmt er sich auf Kosten der Umgebung. Somit kann man für die Netto-Strahlungsleistung ΔP eines Körpers mit der Temperatur T_1 in einer Umgebung mit der Temperatur T_2 schreiben:

$$\Delta P = e \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Wenn T_1 und T_2 gleich groß sind, absorbiert der Körper genauso viel Strahlungsleistung wie er emittiert – er befindet sich also mit der Umgebung im thermischen Gleichgewicht.

Betrachtet man die Wellenlänge, bei der das Emissionsmaximum eines Körpers auftritt, so ist diese umgekehrt proportional zu dessen Temperatur. Anders ausgedrückt: Je höher die Temperatur eines Körpers ist, desto geringer ist die Wellenlänge im Emissionsmaximum.

Dieser Zusammenhang ist durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz dargestellt:

$$\lambda_{\text{max}} = 2,898 \text{ mm} \cdot \text{K} / T$$

Neben der geschilderten Übertragung von thermischer Energie durch Strahlung und durch Konvektion, also Strömungsvorgänge, die durch Temperaturunterschiede ausgelöst werden (beispielsweise über einem Heizkörper), ist die dritte Variante die Wärmeleitung in Körpern, also durch direkte Wechselwirkung zwischen ihren Atomen und Molekülen. Betrachtet man etwa einen Metallstab, der ein Reservoir mit Eiswasser mit einem Reservoir mit heißem Wasser verbindet, so wird sich die Temperatur in diesen Reservoiren durch den Wärmestrom, der durch diesen Stab fließt, angleichen. Dieser Wärmestrom ist gegeben durch:

$$I = \Delta Q / \Delta t = k \cdot A \cdot \Delta T / \Delta x$$

I : Wärmestrom

ΔQ : Wärmemenge

Δt : Zeitspanne der Wärmeübertragung

k : Wärmeleitfähigkeit des Wärmeleiters

A : Querschnittsfläche des Wärmeleiters

ΔT : Temperaturdifferenz

Δx : Länge des Wärmeleiters

Der Wärmestrom (in Watt) durch den Wärmeleiter ist also proportional zu dessen Querschnittsfläche A , dem Temperaturgradienten $\Delta T / \Delta x$ und dem Proportionalitätsfaktor k , welcher die Wärmeleitfähigkeit eines Materials angibt. Besonders hohe Wärmeleitfähigkeit haben Metalle wie Silber (429) und Kupfer (401), niedrige Werte weisen dagegen Glas (0,7 bis 0,9) oder Hartholz (0,15) auf (Werte jeweils in $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$).

HINWEIS

Enthalpie und Entropie:

Wir haben gesehen, dass Energieformen ineinander umwandelbar sind. Energie kann weder vernichtet noch erschaffen werden. Diese fundamentale Gesetzmäßigkeit ist die Aussage des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik*. Anders ausgedrückt:

$$\Delta U = Q + W$$

ΔU : Änderung der inneren Energie

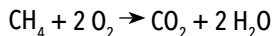
Q: netto zugeführte Wärmemenge

W: netto zugeführte Arbeit

Er beantwortet allerdings entscheidende Fragen noch nicht: Warum können verschiedene Energieformen vollständig in Wärme umgewandelt werden, aber nicht umgekehrt? Oder warum beobachtet man zum Beispiel niemals, dass aus Kohlendioxid und Wasserdampf aus der Luft spontan unter Energieaufnahme aus der Umgebung Methan und Sauerstoff entstehen?

Um diese und ähnliche Fragen zu beantworten, wollen wir im Folgenden einige beispielhafte Reaktionen etwas genauer betrachten und dabei eine zur Beantwortung benötigte, neue Größe einführen:

Verbrennt man ein Mol Methan (Hauptbestandteil des Erdgases), so geschieht das gemäß folgender Reaktionsgleichung:

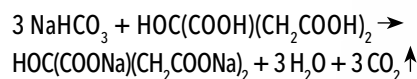


Erfolgt die Verbrennung bei **konstantem Volumen**, so ist die freiwerdende Wärmemenge (man spricht auch von Wärmetönung) gleich der Abnahme der inneren Energie des Systems, in unserem Beispiel beträgt diese Abnahme $890,4 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Bei dieser Reaktion wird Wärme an die Umgebung abgegeben, sie ist also exotherm. Sehr oft erfolgen chemische Reaktionen aber bei **konstantem Druck**, so dass mit der Umsetzung der Reaktionspartner meist eine Ausdehnung oder Kontraktion des Systems verbunden ist. Um diese zu berücksichtigen benötigen wir eine neue Größe, die als **Enthalpie** bezeichnet wird. Ihre Änderung entspricht der Summe der Änderungen der inneren Energie und der zur Ausdehnung oder Kontraktion aufgewendeten Volumenarbeit:

$$\Delta H = \Delta U + P \cdot \Delta V$$

Manchmal macht man die Beobachtung, dass Reaktionen ablaufen und dabei ihrer Umgebung Wärme entziehen, also endotherm sind. Die Betrachtung der Enthalpieänderung alleine reicht also noch nicht aus, um zu einer Aussage darüber zu gelangen, ob eine Reaktion möglich ist oder nicht. Wir benötigen eine weitere Größe, die als **Entropie** (Formelzeichen S) bezeichnet wird und die

man sich vereinfacht anschaulich als ein Maß für die „Unordnung“ eines Systems vorstellen kann. Ungeordnete, entropiereiche Zustände sind wahrscheinlicher als geordnete, entropiearme Zustände. Geordnete Zustände gehen sehr leicht in ungeordnete über, der umgekehrte Weg erfordert Energie. (In der Wärmelehre sprechen wir von einer Entropieerhöhung bei „Energieentwertung“, d. h. wenn die Menge an nicht weiter nutzbarer Energie ansteigt). Ein Beispiel für eine solche endotherme Reaktion ist die Auflösung einer Brausetablette in Wasser. Brausetabletten und auch Brausepulver enthalten üblicherweise ein Carbonat und eine organische Säure. Beispielhaft soll die Reaktion zwischen Natriumhydrogencarbonat und Citronensäure betrachtet werden:



Die Lösung kühlt sich dabei ab, dem Wasser wird Wärme entzogen. Gleichzeitig erhöht sich die Entropie S des Systems.

Anders ausgedrückt: Es läuft ein Vorgang ab, bei dem das System in einen Zustand höherer Realisierungswahrscheinlichkeit (frei bewegliche Gasteilchen im Vergleich zu zuvor am Ort gebundenen Teilchen in der Brausetablette) übergeht. Der umgekehrte Vorgang, nämlich dass Kohlendioxid aus der Umgebung spontan in eine Natriumcitratlösung unter Bildung von Natriumhydrogencarbonat und Citronensäure einströmt, wird nie beobachtet.

Die Änderung der Enthalpie erlaubt eine Aussage darüber, ob eine Reaktion exotherm oder endotherm ist. Die Enthalpie lässt sich mit der Entropie zu einer neuen Größe, der **freien Enthalpie** zusammenfassen. Die Änderung dieser Größe wird in der Gibbs-Helmholtz-Gleichung dargestellt:

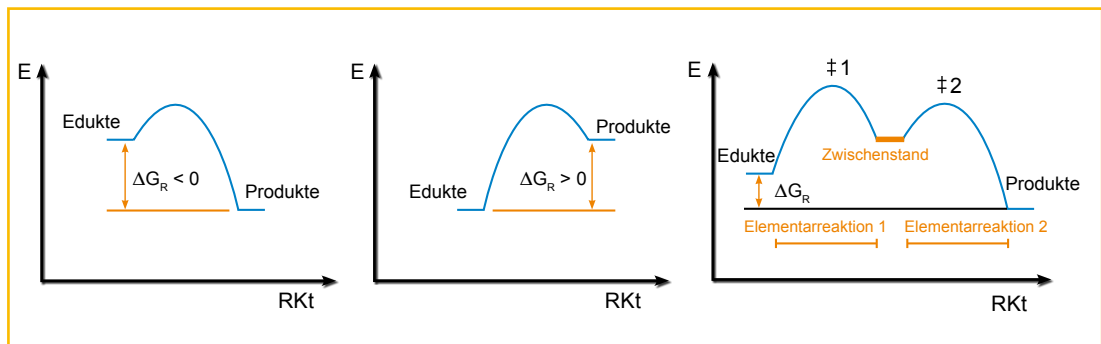
$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \text{ bzw. } \Delta G^0 = \Delta H^0 - T \cdot \Delta S^0$$

(Der Index „0“ bedeutet, dass man die Werte unter Standardbedingungen, also 1.013 hPa und $25 \text{ }^\circ\text{C}$ betrachtet). Ausgehend von dieser Gleichung kann man chemische Reaktionen systematisieren:

Reaktionsbegünstigende Bedingungen

Enthalpie des (Reaktions-)Systems	Entropie des (Reaktions-)Systems	Reaktion läuft spontan ab
Nimmt ab (exotherm) ($\Delta H < 0$)	nimmt zu ($\Delta S > 0$)	ja ($\Delta G < 0$)
Nimmt ab (exotherm) ($\Delta H < 0$)	nimmt ab ($\Delta S < 0$)	wenn $T \cdot \Delta S > \Delta H$
Nimmt zu (endotherm) ($\Delta H > 0$)	nimmt zu ($\Delta S > 0$)	wenn $T \cdot \Delta S > \Delta H$
Nimmt zu (endotherm) ($\Delta H > 0$)	nimmt ab ($\Delta S < 0$)	nein ($\Delta G > 0$)

Schematischer Ablauf ein- und mehrstufiger chemischer Reaktionen



Bei den hier geschilderten Fällen handelt es sich um die Entropieänderung in einem System. Dazu muss bemerkt werden, dass eine Entropieabnahme in einem System mit einer mindestens ebenso großen Entropiezunahme der Umgebung einher geht.

Dieser zentrale Sachverhalt wird in der folgenden Formulierung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik zum Ausdruck gebracht:

Eine spontane Änderung ist immer mit einer Zunahme der Gesamtentropie des Weltalls verbunden.

Der zweite Hauptsatz liefert auch die Begründung dafür, warum Wärme nicht vollständig in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann, denn dies würde zu einer Abnahme der Gesamtentropie des Weltalls führen. Die Betrachtung der Entropie ist sehr nützlich, um den Anteil der Wärmeenergie, welcher in Wärme-Kraft-Maschinen in Bewegungsenergie umgewandelt wird, zu ermitteln. Ein bekanntes Beispiel für eine solche Wärme-Kraft-

Maschine ist die Turbine eines Kraftwerks. Sie entzieht einem Wärmereservoir mit hoher Temperatur (heißer Dampf aus dem Kessel) Wärme und gibt diese an ein Reservoir mit niedrigerer Temperatur (Kühlwasser) ab. Dabei tritt auf der „Hochtemperaturseite“ eine Abnahme der Entropie ein gemäß

$$\Delta S_h = - Q_h / T_h$$

während auf der „Niedrigtemperaturseite“ eine Zunahme der Entropie stattfindet:

$$\Delta S_n = + Q_n / T_n$$

Da die Entropieänderung insgesamt positiv sein muss, gilt:

$$- Q_h / T_h + Q_n / T_n > 0 \text{ oder umgestellt } Q_n > Q_h T_n / T_h$$

Es wird der Anteil in nutzbare Arbeit umgewandelt, der nicht wieder als Wärme abgegeben wird. Diesen **Wirkungsgrad** kann man schreiben als:

$$\eta = (Q_h - Q_n) / Q_h$$

Durch Einsetzen des obigen Terms für Q_n lässt sich Q_n eliminieren und man gelangt zu:

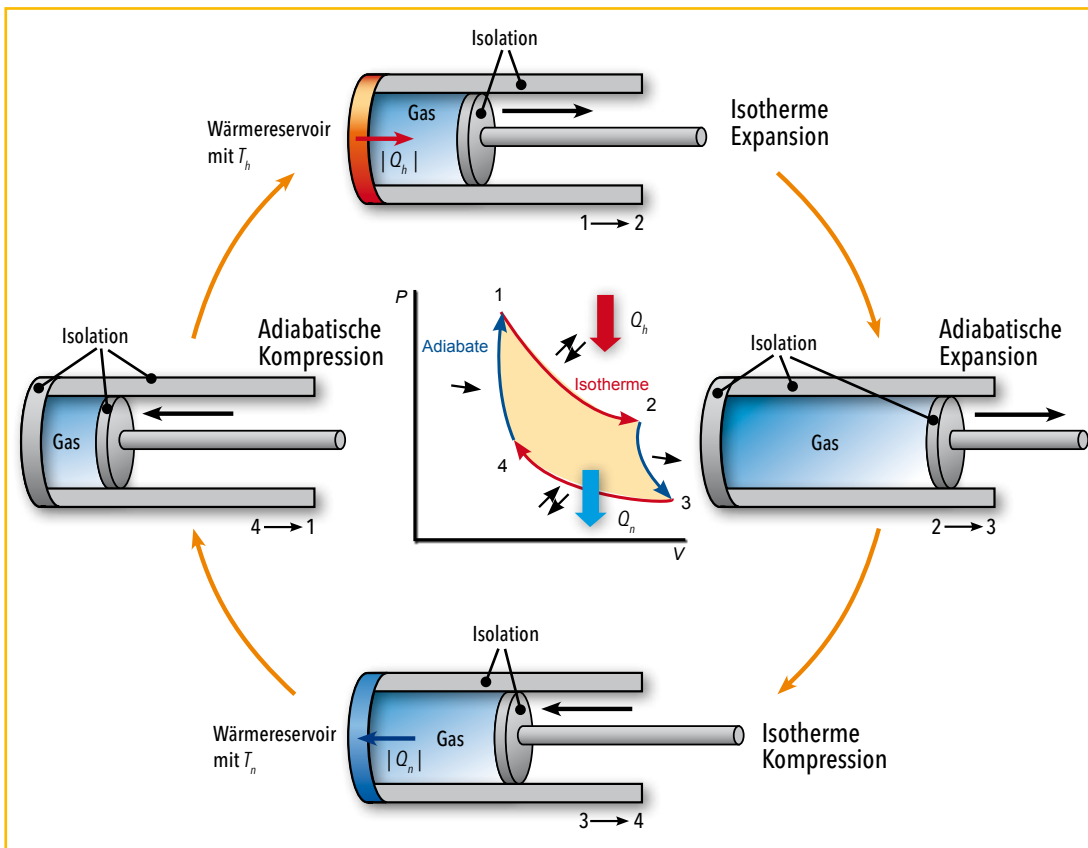
$$\eta = 1 - (T_n/T_h)$$

Der so erhaltene Carnot-Wirkungsgrad gibt den theoretisch maximal erreichbaren Umwandlungsgrad von Wärme in nutzbare Arbeit an. Für ein modernes Dampfkraftwerk mit einer Frischdampf­temperatur von 600 °C ($T_h = 873$ K) und einer Kondensatortemperatur von 18 °C ($T_n = 291$ K) ergibt sich ein Carnot-Wirkungsgrad von 0,67. In der Praxis werden aufgrund unterschiedlichster Faktoren geringere Werte erzielt. Die Umwandlung von Wärme in Bewegungsenergie kann man sich anhand des Beispiels der Dampfturbine verdeutlichen: Wasser wird in einem Verdampfer (bspw. in einem kohlebeheizten Kessel, einem Kernreaktor oder in einer spe-

ziellen Solarthermieanlage) durch Zufuhr von thermischer Energie in Dampf mit hohem Druck und hoher Temperatur umgewandelt. Dieser Dampf treibt die Turbine an (wobei Dampfturbinen oft mehrstufig, angepasst an die auftretenden Drücke, ausgelegt sind). Der abgekühlte Dampf wird nun wieder verflüssigt (die dabei anfallende „Abwärme“ wurde in der Vergangenheit häufig bspw. an einen Fluss abgegeben – heute ist man bemüht, diese thermische Energie sinnvoll zu nutzen, bspw. zu Heizzwecken). Das nun wieder flüssige Wasser wird dem Verdampfer zugeführt und der Kreis ist geschlossen. Zur exakten Beschreibung solcher sogenannter Kreisprozesse existieren zahlreiche theoretische Modelle, deren zentrales Modell der Carnot'sche Kreisprozess* ist, aus dem sich der oben dargestellte Carnot-Wirkungsgrad ergibt.

ABBILDUNG 3-3

Carnot'scher Kreisprozess



Modifiziert nach: Paul A. Tipler, Gene Mosca, „Physik für Wissenschaftler und Ingenieure“, 2. Auflage (2007), Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, S. 596

Energiereiche Stoffumwandlungen

Aus dem Schulunterricht kennen wir die Reaktion von metallischem Natrium mit Wasser zu Wasserstoff und Natriumhydroxid. Bei dieser Reaktion wird Wärmeenergie freigesetzt, es handelt sich also um eine exotherme Reaktion. Im Alltag begegnen uns zahlreiche weitere Beispiele für exotherme Umsetzungen. So zählen alle Verbrennungsvorgänge dazu, beispielsweise die Verbrennung von Haushaltsabfällen in einem Müllheizkraftwerk. Findet eine Reaktion hingegen unter Wärmeaufnahme aus der Umgebung statt, so spricht man von einer endothermen Reaktion. Viele Reaktionen benötigen darüber hinaus einen Katalysator, also einen Stoff, der die Reaktion überhaupt erst ermöglicht oder zumindest beschleunigt und zwar ohne dabei selbst verbraucht zu werden. Beispielsweise ermöglichen erst die Platinmetalle im Abgaskatalysator eines Autos die Reaktion von Kohlenstoffmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen zu Kohlenstoffdioxid und Wasser sowie die Reaktion von Kohlenstoffmonoxid und Stickstoffmonoxid zu Stickstoff und Kohlenstoffdioxid. Diese Reaktionen sind zwar exotherm, würden aber unter den im Abgas herrschenden Bedingungen ohne Katalysator nicht stattfinden. Eine andere Form der Katalyse findet sich bei selbstreinigenden Farben auf Basis von nanostrukturiertem* Titanoxid: Diese nutzen die Energie des Sonnenlichtes, um aus Wasser und Luftsauerstoff in einer endothermen Reaktion Radikale zu bilden, die Schmutz (organische Substanzen) zerstö-

ren und außerdem desinfizierende Wirkung besitzen. Im Zuge der Bemühungen, den Anteil erneuerbarer Energien an unserer Energieversorgung zu steigern, gewinnt die Nutzung von Biomasse als Energieträger zunehmend an Bedeutung. Um aus Biomasse niedermolekulare Verbindungen zu gewinnen, unterzieht man sie der Pyrolyse*, also einer thermischen Spaltung: In einer endothermen Reaktion werden große Moleküle wie Cellulose in ein komplexes Gemisch kleinerer Moleküle gespalten, die teilweise als Energieträger genutzt werden können.

METHODISCHE ANMERKUNG

Modellversuch zum Autokatalysator (CH-EX1)

Der Modellversuch zum Autokatalysator macht die Eigenschaften eines Katalysators beobachtbar: Er liegt nach der Reaktion unverändert vor – am Platindraht direkt sichtbar – und ist in der Lage, die Aktivierungsenergie einer Reaktion beträchtlich herabzusetzen. Im hier gewählten Beispiel entzündet sich das Feuerzeug ohne einen Zündfunken. Im Vergleich zum Autokatalysator kann man auf die Ähnlichkeit des Katalysator-Materials hinweisen, aber auch erwähnen, dass dort nicht ausschließlich die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen stattfindet, sondern auch die von Kohlenstoffmonoxid und die Reduktion von Stickstoffoxiden.

ABBILDUNG 4-1

Exotherme Reaktionen in Schule und Alltag



Reaktion von metallischem Natrium mit Wasser zu Wasserstoff und Natriumhydroxid



Verbrennung von Haushaltsabfällen in einem Müllheizkraftwerk

Energie mit Elektrochemie

Ein Teilgebiet der Chemie, das für den Energiebereich eine große Rolle spielt, ist die Elektrochemie. Von ihr spricht man, wenn im Zusammenhang mit einer chemischen Reaktion ein elektrischer Strom fließt.

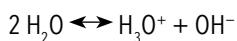
Der Begriff „elektrischer Strom“ bezeichnet hier nicht nur den Elektronenfluss, zum Beispiel in einem Metalldraht, sondern auch den Transport von anderen Ladungsträgern, also positiv oder negativ geladenen Ionen in Lösungen oder Salzschnmelzen. Voraussetzung dafür ist das Vorhandensein von Ladungsträgern, was sich wiederum auf die Leitfähigkeit, beispielsweise einer Salzlösung, auswirkt. Diese Leitfähigkeit σ wird in Siemens pro Meter ($S \cdot m^{-1}$ bzw. $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$) angegeben und hat je nach Substanz sehr unterschiedliche Werte.

📄 TABELLE 4-1

Leitfähigkeiten verschiedener Stoffe

Stoff	Leitfähigkeit in $S \cdot m^{-1}$
n-Hexan	$1 \cdot 10^{-10}$
Reines Wasser	$5,5 \cdot 10^{-6}$
Seewasser	4,8
Kupfer	$58 \cdot 10^6$

n-Hexan ist eine unpolare Substanz, die nicht in Ionen zerfällt und daher eine extrem geringe elektrische Leitfähigkeit aufweist. Reines Wasser unterliegt einer sogenannten Eigendissoziation, das heißt es zerfällt zum Teil in negativ geladene Hydroxidionen und in positiv geladene Oxoniumionen gemäß:



Dennoch ist die Leitfähigkeit verhältnismäßig gering, da bei 25 °C diese beiden Ladungsträger jeweils nur in einer Konzentration von $10^{-7} \text{ mol} \cdot L^{-1}$ vorliegen. Bei Meerwasser ist die Leitfähigkeit sehr viel höher, da durch die gelösten Salze seine Ionen-Konzentration etwa $1,1 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ beträgt. Kupfer wiederum hat als metallischer Leiter eine deutlich höhere Leitfähigkeit. Die be-

sonderen Eigenschaften von Metallen sind im wahrsten Sinne des Wortes augenfällig: Ihre Undurchsichtigkeit und auch ihr metallischer Glanz sind ebenso wie ihre elektrische Leitfähigkeit Folge der leichten Beweglichkeit ihrer Elektronen. Diese kann in der Modellvorstellung des Elektronengases veranschaulicht werden: Die äußeren Elektronen der Metallatome sind nicht an die „Atomrümpfe“ gebunden, sondern zwischen ihnen frei beweglich.

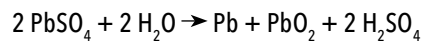
Ein zentraler Vorgang in der Elektrochemie ist die Redoxreaktion: Dabei ist eine Reaktion, welche unter Aufnahme von Elektronen stattfindet (Reduktion), an eine Reaktion unter Abgabe von Elektronen (Oxidation) gekoppelt. Das Prinzip, den bei Redoxreaktionen auftretenden Elektronenfluss zwischen den beteiligten Reaktionspartnern über einen äußeren Stromkreis zu kanalisieren, liegt der Gewinnung und Speicherung elektrischer Energie in einem „galvanischen Element“* zugrunde. Dazu werden die Oxidationsreaktion (im sog. Anodenraum) und die Reduktionsreaktion (im sog. Kathodenraum) räumlich getrennt. Redoxreaktionen können freiwillig ablaufen und dabei Strom liefern oder aber umgekehrt durch elektrischen Strom erzwungen werden. Galvanische Elemente, in denen die Redoxreaktionen freiwillig ablaufen, die nicht durch eine äußere Spannung wieder umgekehrt werden können, werden als Primärelemente (Batterien) bezeichnet; sind die Reaktionen durch äußere Spannung umkehrbar spricht man von Sekundärelementen (Akkumulatoren). Der früher verbreitete, etwas ungenau als Zink-Kohle-Element bezeichnete Batterietyp ist heutzutage weitgehend durch die sogenannte Alkali-Mangan-Batterie verdrängt worden. Diese nutzt zwar auch Zink und Mangandioxid, besitzt aber eine mehr als doppelt so hohe Energiedichte und ist auslaufsicher. Eine wichtige Kenngröße von Batterien und Akkumulatoren ist die Nennspannung, welche durch das Redoxpotenzial der eingesetzten Reaktionspartner, aber auch einige weitere Faktoren gegeben ist.



Chemische Reaktionen in Batterien und Akkumulatoren

Typ	Anodenreaktion	Kathodenreaktion	Nennspannung
„Zink-Kohle“	$Zn + 2 NH_4Cl \rightarrow [Zn(NH_3)_2Cl_2] + 2 H^+ + 2 e^-$	$2 MnO_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow 2 MnO(OH)$	1,5 Volt
„Alkali-Mangan“	$Zn + 2 OH^- \rightarrow ZnO + H_2O + 2 e^-$	$MnO_2 + 2 H_2O + 2 e^- \rightarrow Mn(OH)_2 + 2 OH^-$	1,5 Volt
Blei-Akku	$Pb + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2 e^-$	$PbO_2 + SO_4^{2-} + 4 H^+ + 2 e^- \rightarrow PbSO_4 + 2 H_2O$	2 Volt
Nickel-Metall-hydrid-Akku	$MH + OH^- \rightarrow M + H_2O + e^-$	$NiO(OH) + H_2O + e^- \rightarrow Ni(OH)_2 + OH^-$	1,2 Volt
Lithium-Ionen-Akku	$Li_x C_n \rightarrow C_n + x Li^+ + x e^-$	$Li_{1-x} M_{n2} O_4 + x Li^+ + x e^- \rightarrow LiM_{n2} O_4$	3,6 Volt

Das Aufladen eines Akkumulators, also das Erzwingen einer Redoxreaktion durch Anlegen eines äußeren elektrischen Stroms, ist ein Sonderfall des grundlegenden Verfahrens der Elektrolyse. Damit eine Elektrolyse stattfinden kann, muss eine elektrische Spannung angelegt werden, die mindestens der Zersetzungsspannung des zu elektrolysierenden Stoffes entspricht. Diese ist einerseits gegeben durch die elektrochemische Spannungsreihe, andererseits wird sie durch weitere Faktoren wie pH-Wert, Temperatur oder Beschaffenheit der Elektrodenoberfläche beeinflusst. Bei einem Blei-Akkumulator kann man die Reaktionsgleichungen an Anode und Kathode zusammenfassen zu:



Hierbei stellt die „Hinreaktion“, also das Laden des Akkumulators, eine Elektrolyse dar. Unter Zufuhr elektrischer Energie werden Pb^{2+} -Ionen in elementares Blei und in Pb^{4+} -Ionen überführt. Beim Entladen werden daraus wieder Pb^{2+} -Ionen – zugleich wird elektrische Energie frei. Eines der bekanntesten Beispiele für eine Elektrolyse ist die Zersetzung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Sie spielt bei der Energiegewinnung eine zunehmende Rolle, da die umgekehrte Reaktion in einer geeigneten Anordnung, der Brennstoffzelle, genutzt werden kann, um die bei der Reaktion von Wasserstoff mit

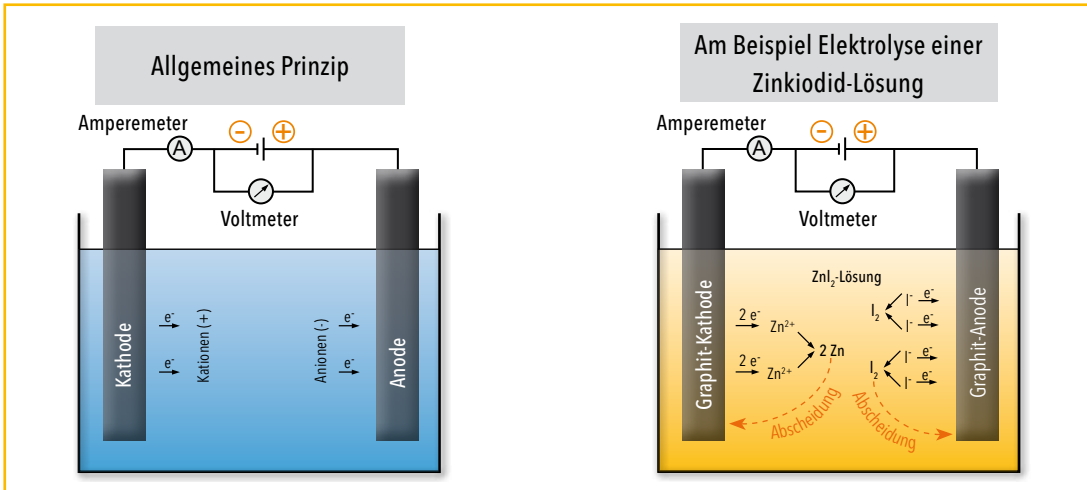
Sauerstoff freiwerdende Energie direkt in elektrischen Strom umzuwandeln.

Wie bei allen Energiewandlungsprozessen treten auch bei der Elektrolyse und ihrer Umkehrung Verluste auf, so dass man einem Akkumulator nie die gleiche Strommenge entnehmen kann, die man zuvor hineingesteckt hat: Der Akku erwärmt sich sowohl beim Laden als auch beim Entladen.

Mit der Messung von Wärmemengen, die bei chemischen Reaktionen aber auch bei biologischen und physikalischen Vorgängen umgesetzt werden, beschäftigt sich die Kalorimetrie. Sie erlaubt Aussagen darüber, ob Vorgänge exotherm oder endotherm sind. Eine Vorrichtung für solche Messungen wird als Kalorimeter bezeichnet. Im einfachsten Fall besteht es aus einem Polystyrol-Becher oder einem entsprechend wärmeisolierten Becherglas mit einem lose aufgesetzten Deckel (um Druckausgleich zu ermöglichen) und einem Thermometer. Gibt man nun Ausgangssubstanzen einer chemischen Reaktion oder zu mischende Flüssigkeiten in diese einfache Vorrichtung, kann die damit einhergehende Temperaturänderung gemessen werden.

ABBILDUNG 4-3

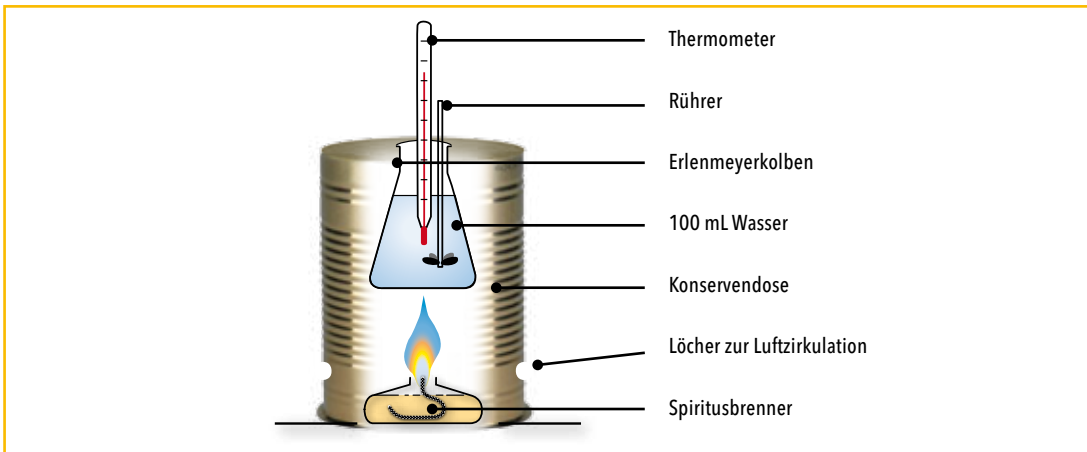
Aufbau einer Elektrolysezelle



4

ABBILDUNG 4-4

Aufbau eines einfachen Kalorimeters

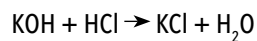


METHODISCHE ANMERKUNG

Kalorimeter und Wärmekapazität (CH-EX2)

Beim Eigenbau, ggf. als Wettbewerb von Schülergruppen, eines Kalorimeters kann man Alltagserfahrungen zu besonders gut isolierenden Materialien aktivieren und verschiedene Materialien und Bauweisen auf ihre spezifischen Vor- und Nachteile hin untersuchen.

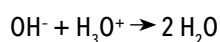
onstypen lässt sich auch im oben geschilderten einfachen Aufbau bestimmen. In ähnlicher Weise kann etwa auch die Neutralisationsenthalpie der Reaktion:



gemessen werden. Hierzu werden je 50 mL einer Kaliumhydroxidlösung ($c = 1 \text{ mol/L}$) und 50 mL einer Salzsäurelösung ($c = 1 \text{ mol/L}$) zusammengegeben. Zuvor wurde das Kalorimeter beispielsweise durch Erwärmung von 100 mL einer Kaliumchloridlösung mit einer definierten Wärmemenge kalibriert.

Verbrennungsreaktionen sind ein Beispiel für Redoxreaktionen. Die Enthalpieänderung bei bestimmten Reakti-

Exakte Messungen ergeben für diese Reaktion den Wert von $57 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, und zwar bei unterschiedlichen Säuren und Basen, da es sich um die Reaktionsenthalpie der folgenden Reaktion handelt:

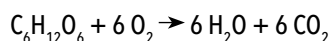


Auch Enthalpieänderungen, die bei rein physikalischen Vorgängen wie dem Mischen zweier Flüssigkeiten ohne Auftreten einer chemischen Reaktion stattfinden, können mit einem solchen einfachen Kalorimeteraufbau bestimmt werden. So tritt beim Vermischen gleicher Stoffmengen Glycerin und Wasser eine negative Enthalpieänderung auf, das heißt der Vorgang ist exotherm.

C Oberstufe

Energieumsatz bei Verbrennungsvorgängen

Die Spannweite der bei chemischen Reaktionen umgesetzten Energiemengen ist sehr groß. Die Neutralisationsreaktion $\text{OH}^- + \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}$ setzt mit $57 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ verhältnismäßig wenig Wärme frei. Die Oxidation von Glukose zu Wasser und Kohlenstoffdioxid hingegen liefert sehr viel mehr Energie, sie ist stark exotherm. Die Frage, wie exotherm oder endotherm eine Reaktion ist, lässt sich entscheiden, wenn man die molaren Standardbildungsenthalpien der Edukte von denen der Produkte abzieht (H_b^0 für $\text{O}_2 = 0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$). Bei Verbrennungsprozessen spricht man dann von der Standardverbrennungsenthalpie ΔH_c^0 (c von engl. „combustion“ = Verbrennung).



$$\Delta H_c^0 = [6 \text{ mol} \cdot (-285,83 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 6 \text{ mol} \cdot (-393,51 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1})] - [1 \text{ mol} \cdot (-1.268 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 6 \text{ mol} \cdot 0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}] = -2.808,04 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

Anders ausgedrückt: Mit der bei der vollständigen Oxidation von einem Gramm Glukose ($M_{\text{Glukose}} = 180,16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$) gebildeten Wärme ließe sich ein Kilogramm Wasser um $3,73 \text{ }^\circ\text{C}$ erwärmen.

Im menschlichen Körper findet in der Summe zwar auch eine Oxidation von Glukose zu Kohlenstoffdioxid und Wasser

HINWEIS

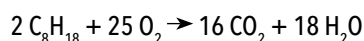
Unter Standardbildungsenthalpie versteht man die Energie, die bei der Bildung eines Mols einer Substanz aus den Elementen aufgenommen oder abgegeben wird. Für Elemente ist sie definitionsgemäß gleich null.

statt, diese läuft jedoch über zahlreiche Zwischenstufen. Die Reaktionsenthalpie der einzelnen beteiligten Reaktionen ist jeweils deutlich kleiner, insgesamt wird allerdings der oben genannte Wert von $2.808,04 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ erreicht. Dies ist ein Beispiel für den 1840 von Germain Henri Hess formulierten und nach ihm benannten „Satz von Hess“:

Die Enthalpieänderung einer Gesamtreaktion entspricht der Summe der Enthalpieänderungen der zugrunde liegenden Einzelreaktionen.

Dabei ist es unerheblich, in welche Einzelreaktionen die Gesamtreaktion zerlegt werden kann. Wäre dies nicht so, könnte man hypothetisch durch Durchlaufen verschiedener Einzelreaktionen netto Energie „erzeugen“ – ein solches Perpetuum mobile* steht aber im Widerspruch zu den Naturgesetzen, insbesondere zum Ersten Hauptsatz der Thermodynamik.

So wie die Oxidation von Glukose in unseren Körperzellen die wesentliche Energiequelle darstellt, so spielt die Oxidation energiereicher Kohlenwasserstoffe noch immer die überragende Rolle bei der Energiegewinnung für industrielle Prozesse, Wärmegewinnung und insbesondere im Bereich der Mobilität. Die Enthalpieänderung bei der Verbrennung von Iso-Octan, einem typischen Inhaltsstoff des Otto-Kraftstoffs, errechnet sich – entsprechend den obigen Ausführungen – aus den Standardbildungsenthalpien der Reaktanden. Die Gleichung der vollständigen Verbrennung lautet:



Damit ergibt sich für diese Reaktion

$$\Delta H_c^0 = 18 \text{ mol} \cdot (-285,83 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 16 \text{ mol} \cdot (-393,51 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) - [2 \text{ mol} \cdot (-259,3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}) + 25 \text{ mol} \cdot (0 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1})] = -10.922,5 \text{ kJ}$$

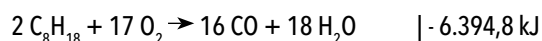
METHODISCHE ANMERKUNG

Satz von Hess

Bestimmung der Reaktionsenthalpie (CH-EX3)

Im Experiment wird der Satz von Hess durch eigene Messungen nachgeprüft. Denkbar ist, Schüler nach anderen geeigneten Reaktionsfolgen zu befragen.

Zerlegt man diese Reaktion in zwei mögliche Teilreaktionen und summiert die mit ihnen einhergehenden Enthalpieänderungen



und



so gelangt man – entsprechend dem Satz von Hess – wieder zu dem Wert von -10.922,5 kJ.

Da in obiger Gleichung 2 mol iso-Octan auftauchen, ist die molare Verbrennungsenthalpie entsprechend 5.461,25 kJ · mol⁻¹. Auf die Masse bezogen heißt das: Bei der Verbrennung von einem Gramm iso-Octan werden 47,81 kJ frei, während die Verbrennung von einem Gramm Glucose 15,59 kJ liefert.

Daraus wird deutlich, warum Kohlenwasserstoffe eine überragende Rolle als Energieträger spielen: Ihre Energiedichte ist im Vergleich zu anderen Stoffen sehr hoch.

TABELLE 4-3

Energiegehalt verschiedener Energieträger

Energieträger	Energiegehalt (kJ · g ⁻¹)
Wasserstoff (Verbrennung)	143
Wasserstoff (Tritium/ Deuterium-Gemisch, Kernfusion)	3,6 · 10 ⁸
Uran-235 (Kernspaltung)	8,2 · 10 ⁷
Dieselmotorkraftstoff	45,4
Ethanol	29,7
Trockenes Holz	19

Ähnliche Betrachtungen zum Thema „Energiegehalt“ wie für Verbrennungsvorgänge lassen sich für galvanische Elemente, zum Beispiel Blei-Akkumulatoren, anstellen. Um die von einem Akku gelieferte, nutzbare Energie möglichst exakt zu erfassen, betrachten wir im Folgenden die freie Reaktionsenthalpie ΔG , die wir im vorherigen Abschnitt kennen gelernt haben: Der Zusammenhang zwischen der Spannung einer galvanischen Zelle, also dem Potenzialunterschied zwischen dem Redoxpaar an der Anode und der Kathode, und ΔG ist dabei durch die folgende Formel gegeben:

$$\Delta G = -n F E$$

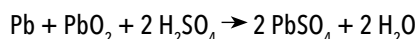
n: Stoffmenge der umgesetzten Elektronen

F: Faradaykonstante 96,485 kC · mol⁻¹

E: elektrisches Potenzial in Volt

Bleiben wir beim Beispiel des Blei-Akkumulators.

Die Gesamtgleichung des Entladevorgangs lautet:



mit $E^0 = 2,04 \text{ Volt}$ oder $2,04 \text{ kJ} \cdot \text{kC}^{-1}$

Setzt man dies in die obige Gleichung ein (wobei man beachten muss, dass 2 mol Elektronen fließen), so erhält man die Änderung der freien Enthalpie in obiger Gleichung zu:

$$\Delta G = -2 \text{ mol} \cdot 96,485 \text{ kC} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 2,04 \text{ kJ} \cdot \text{kC}^{-1} = - 393,66 \text{ kJ}$$

Berechnet man davon und von den molaren Massen von Blei, Bleidioxid und Schwefelsäure ausgehend die Energiedichte dieses Systems, so erhält man einen Wert von 0,613 kJ · g⁻¹. Dies ist allerdings ein theoretischer Wert, da natürlich keine konzentrierte Schwefelsäure zum Einsatz kommt und auch Komponenten wie Akkumulatorgehäuse etc. berücksichtigt werden müssen, so dass in der Praxis eher Werte von 0,11 kJ · g⁻¹ erreicht werden. Das ist eine etwa um den Faktor 435 geringere Energiedichte als die des Iso-Octans. Hieran erkennt man eine der besonderen Herausforderungen auf dem Weg hin zur Elektromobilität: die Entwicklung von elektrochemischen Speichern mit hoher Energiedichte. Natürlich ist der Energiespeicher alleine nicht ausschlaggebend für die Energieeffizienz eines Antriebssystems. Vergleicht man den Wirkungsgrad eines Elektromotors mit dem eines Verbrennungsmotors, so schneidet ersterer deutlich besser ab: Dieser kann bei bis zu 99 Prozent liegen, bei Verbrennungsmotoren liegt er im Bereich von 25 bis 35 Prozent.

A Basis

Lampen gestern und heute

Glühlampen gehören zu unserem Alltag und die klassische „Glühbirne“ – wie sie im Volksmund auch genannt wird – ist bereits über 130 Jahre alt. 1881 meldete Thomas Alva Edison in den USA ein Patent auf eine Glühlampe an, in der ein verkohlter Baumwollfaden von Strom durchflossen wurde. Moderne Glühlampen enthalten einen Glühfaden oder eine Glühwendel aus Wolfram.

Um unsere Umwelt und das Klima zu schützen, müssen wir verantwortungsvoller und sparsamer mit Energie umgehen als bisher. Daher steht die herkömmliche Glühlampe heute in einem vergleichsweise schlechten Licht da, denn: In ihr werden nur maximal fünf Prozent des aufgewendeten elektrischen Stroms in sichtbares Licht umgewandelt. Der Rest geht als Wärme verloren. Deshalb beschloss die Europäische Union im Jahr 2008, nach und nach den

Verkauf besonders energieverwendender Lampen mit 100, 75 und 60 Watt Leistung bis 2011 schrittweise zu verbieten.

Trotzdem müssen wir nicht im Dunkeln sitzen: In vielen Haushalten hat man inzwischen auf sogenannte Energiesparlampen umgestellt. Das können Halogen-Kompaktleuchtstofflampen oder Leuchtdioden (LEDs) sein. Die kleinen, sehr hellen und verbrauchsarmen LEDs gibt es für die Raumbeleuchtung zum Beispiel als Strahlerbündel zu kaufen.

METHODISCHE ANMERKUNG

Vergleich der Beleuchtungsstärke einer Glühlampe und einer Energiesparlampe (PHY-EX4)

Siehe Versuchsvorschrift.

ABBILDUNG 5-1

Verschiedene Leuchtmittel



HINWEIS

Das richtige Licht ist wichtig für unser Wohlbefinden. Scheint im Winter lange nicht die Sonne, fühlen sich manche Menschen bedrückt oder sogar depressiv.

Auch in der Schule und am Arbeitsplatz muss das Licht stimmen. Der Gesetzgeber hat strenge Vorschriften erlassen, damit dort die Lampen die richtige Anbringung, Helligkeit und Farbe haben.

Historie der Lichtquellen seit 1.000 v.Chr.

1.000 v. Chr.	Kerzen
600 v. Chr.	Ölkeramiklampen
280 v. Chr.	Erster Leuchtturm (Alexandria)
1772	Gaslampen
1783	Petroleumlampen
1826	Kalklicht (Calciumoxid-Brenner)
Seit ca. 1820	Glühlampen mit Glühfaden oder Glühwendel
20. Jahrhundert	Lampen mit leuchtenden Gasen (Hg, Na, Ne, Xe)
21. Jahrhundert	Leuchtende Festkörper (Al InGaP, Al InGaN)

B Mittelstufe

Was passiert chemisch und physikalisch, wenn eine Lampe leuchtet?

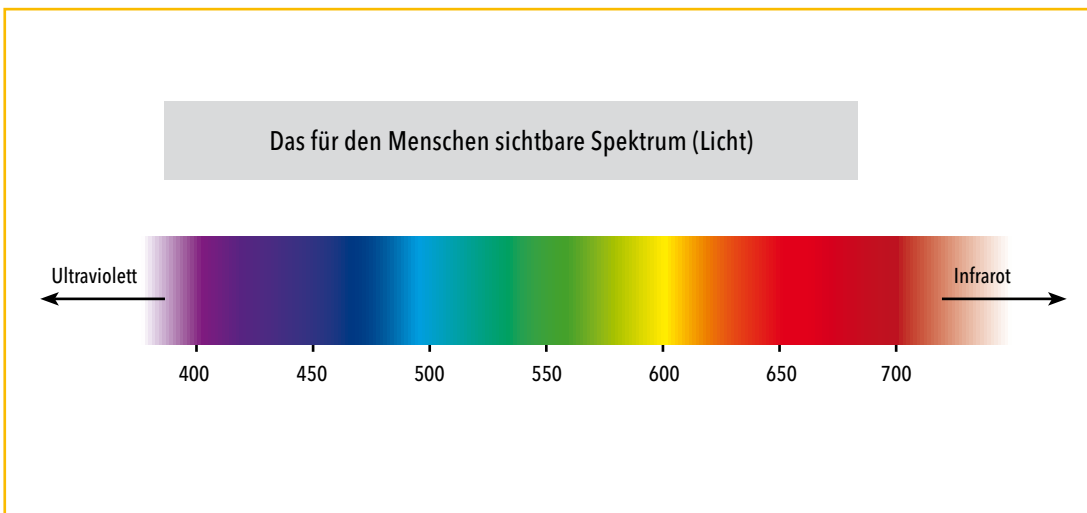
Was ist Licht?

Das für uns sichtbare Licht, ebenso wie die unsichtbare ultraviolette Strahlung und Infrarotstrahlung (Wärme),

sind physikalisch betrachtet elektromagnetische Wellen mit einer bestimmten Wellenlänge λ .

Sichtbares Licht liegt im Bereich der Wellenlängen von 380 bis 700 nm. Kurzwelliger als 380 nm ist der Bereich der ultravioletten Strahlung, langwelliger als 700 nm die Infrarotstrahlung.

Elektromagnetisches Wellenlängenspektrum von Ultraviolett bis Infrarot



METHODISCHE ANMERKUNG

Unterschiedliche Lichtspektren und das Wachstum von Algen in Tropfsteinhöhlen (PHY-AB3)

Herkömmliche Glühlampen geben ein „warmes Licht“ ab. Einige Leuchtstoffröhren und Leuchtdioden (LEDs) sind für ihr bläuliches, „kaltes“ Licht bekannt. In Tropfsteinhöhlen werden die Felsräume damit gerne effektiv beleuchtet.

Die Schüler sollen erklären, warum auf dem feuchten Stein im Licht einer Glühlampe grüne Algen wachsen, nicht aber im Lichtkegel einer LED.

Spaltet man beispielsweise das Licht einer herkömmlichen Glühlampe mit einem Prisma auf, sieht man ein kontinuierliches Spektrum aller Regenbogenfarben.

Dass Objekte bei Zufuhr von Wärmeenergie Licht ausstrahlen, kennt man von vielen Beispielen: von vulkanischer Lava über glühende Kohle im Ofen bis hin zur Herstellung von Industriestahl. Dabei kennt jeder das Phänomen, dass Körper, solange sie noch weniger heiß sind, rot glühen, aber bis zur „Weißglut“ erhitzt werden können. (Der Physiker Max Planck hat dies in seinem berühmten Strahlungsgesetz mathematisch beschrieben.)

Künstliche Lichtquellen

Unter den heute gebräuchlichen Lichtquellen unterscheidet man sogenannte Temperaturstrahler (Glühlampen und Halogenlampen) und Lumineszenzstrahler (Leuchtdioden, Entladungslampen).

In Temperaturstrahlern wird ein Material mit einem elektrischen Widerstand R (z. B. die Glühwendel) von Strom durchflossen, erhitzt sich dadurch und strahlt Licht ab. Der Eindruck angenehm hellen Lichts entsteht für unser Auge ab Temperaturen von 2.000 °C . Je höher die Temperatur wird, desto intensiver ist der Lichteindruck. Höhere Energieersparnis, mehr Leistung, längere Lebensdauer und spezialisierte Anwendungen: Diese Ziele können vor allem durch die Beiträge der Chemie erreicht werden, denn die Entwicklung neuer Materialien und Systeme ist eine entscheidende Triebfeder für Fortschritt im Beleuchtungssektor.

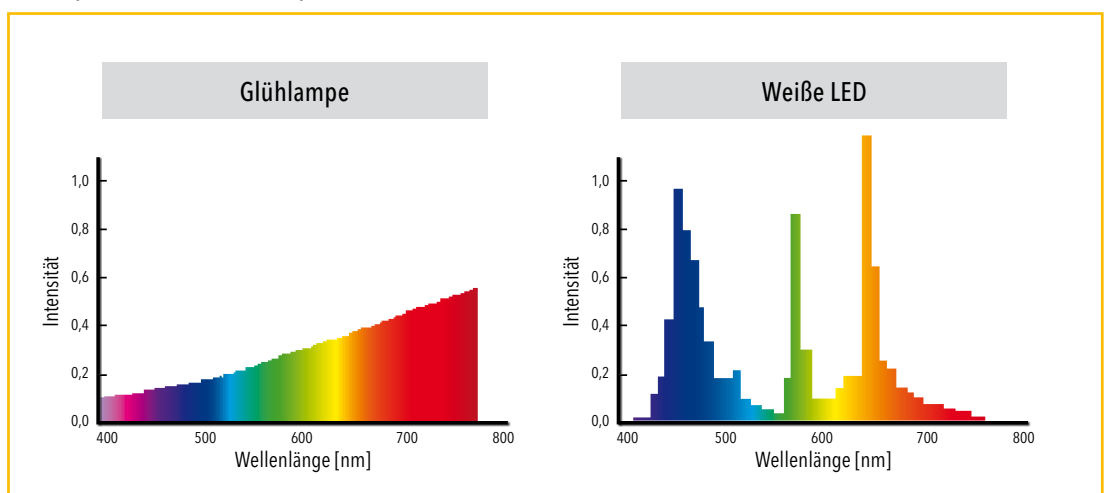
METHODISCHE ANMERKUNG

Betrachtung der Spektren verschiedener Lampen mit einfachen Spektrometern (PHY-EX5)

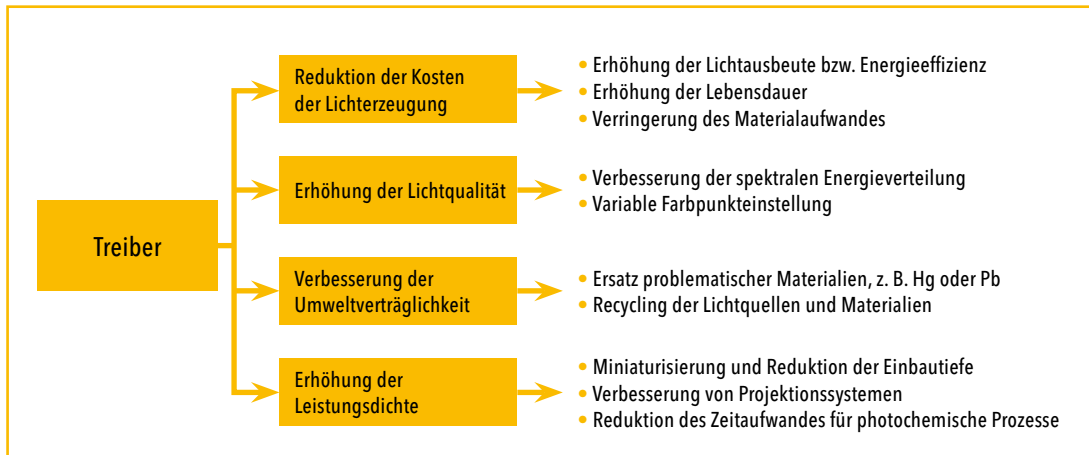
Siehe Versuchsvorschrift.

ABBILDUNG 5-3

Lichtspektren einer Glühlampe und einer weißen LED



Chemie als Treiber der Entwicklung neuer Materialien für Lichtquellen

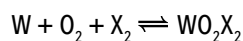


Die ersten Glühlampen enthielten ein Vakuum und wurden mit der Zeit von innen schwarz, weil der Kohlenstoff des verkohlten Baumwollfadens bei der hohen Temperatur verdampfte und sich am Glas niederschlug (Sublimation). Als Material für den Glühdraht Wolfram zu wählen, löste dieses Problem. Denn Wolfram hat unter allen Metallen bei der Betriebstemperatur einer Glühlampe den höchsten Schmelzpunkt (es kann bis zu 3.200 °C erhitzt werden ohne zu schmelzen). Aber auch Wolfram verdampft mit der Zeit, schlägt sich am Glas nieder und begrenzt so die Lebensdauer der Glühlampe.

Um die Brenndauer zu verlängern, wird der Glaskolben der Lampe mit einem Schutzgas gefüllt. Dazu verwenden die Hersteller vor allem schwere Gasgemische aus Stickstoff und Argon, besser noch aus Krypton und Xenon. Das Schutzgas (auch: Inertgas) leitet die Wärme schlecht nach außen und ermöglicht so höhere Betriebstemperaturen und helleres Licht.

Weitere Tricks für längere Lebensdauer

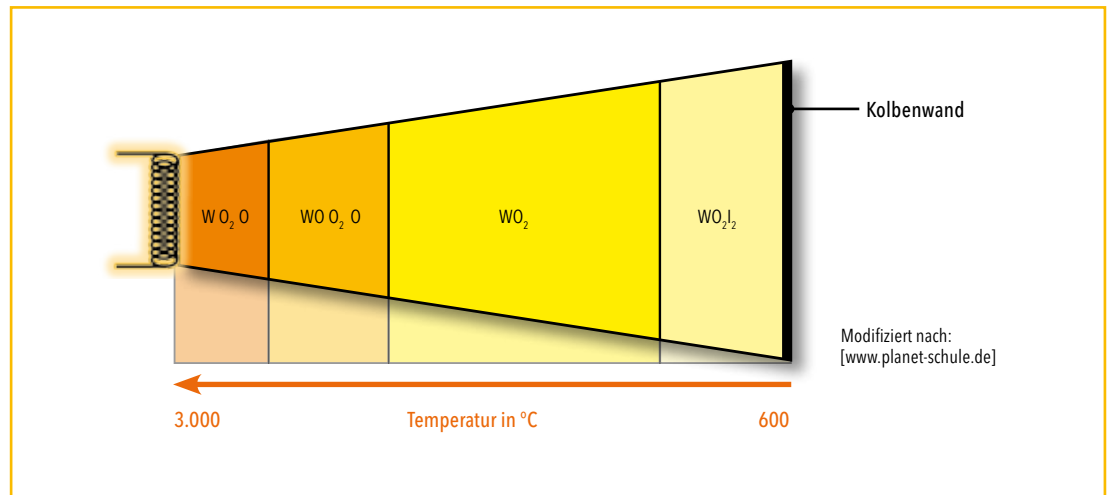
In Halogenlampen hat man einen besonderen Trick verwendet, um die Lebensdauer der Glühlampe zu erhöhen. Dem Schutzgas wird ein Halogen, zum Beispiel Brom (Br₂) oder Jod, beigemischt. Sobald sich Wolframatom an der Glaswand absetzen, werden sie unter Beteiligung von Sauerstoff von den Halogenmolekülen gebunden, zur Glühwendel transportiert und dort wieder abgeschieden. Als Transportmittel dienen Iodmoleküle. Diesem „Wolfram-Halogen-Kreislauf“ liegt folgende Reaktionsgleichung zugrunde:



HINWEIS

Planck'sches Strahlungsgesetz:
Gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz sind die Intensität und die Wellenlänge des abgestrahlten Lichtes stark von der Temperatur des Körpers abhängig.

Aufbau einer Halogenlampe – Temperaturzonen im Glaskolben



Gasentladungslampen

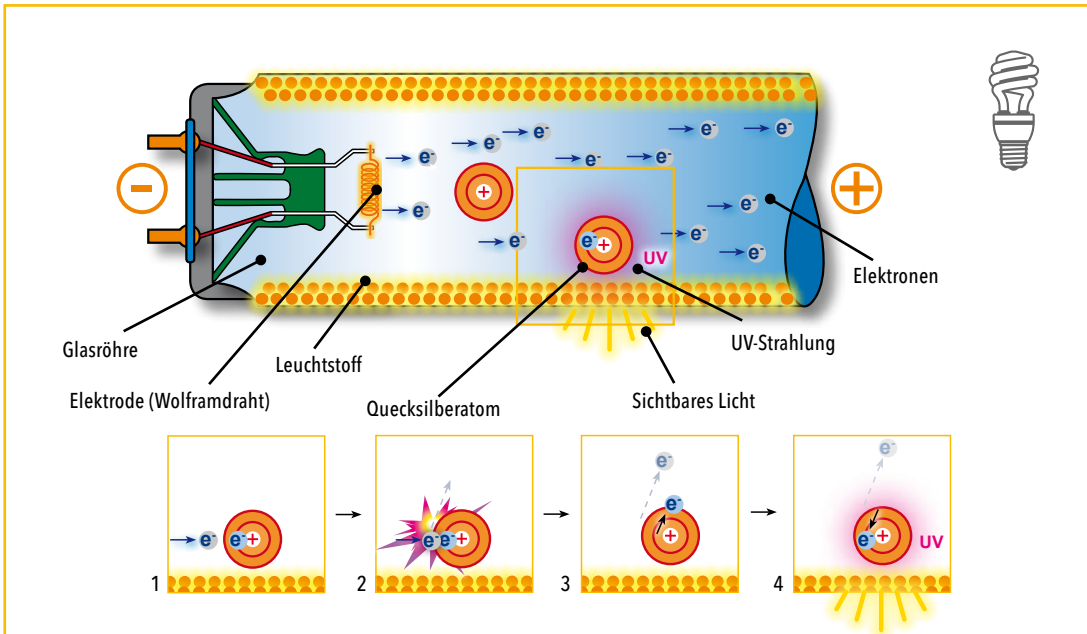
Ganz anders ist das Prinzip bei Gasentladungslampen, also zum Beispiel „Neonröhren“ und Kompaktleuchtstoffröhren (auch als „Energiesparlampen“ bezeichnet) mit niedrigem Gasinnendruck sowie Straßenbeleuchtungen, Beamerlampen oder Xenon-Autoscheinwerfern mit hohem Gasinnendruck.

Jede dieser Lampen ist im Grunde eine mit Leuchtgas (verschiedene Edelgase wie Helium, Neon oder Argon oder Metaldämpfe, z. B. Quecksilberdampf) gefüllte Röhre mit Anode und Kathode an jeweils einem Ende.

Unter Spannung gesetzt, bewegen sich die Elektronen von der Kathode zur Anode, treffen auf die Leuchtgasatome beziehungsweise -moleküle und geben ihre Bewegungsenergie wie beim Billardspiel an deren Elektronen ab. Dadurch werden die Elektronen des Leuchtgases in einen angeregten Zustand (gemäß Atommodell), d. h. in eine höhere „Schale“, angehoben. Beim „Zurückfallen“ in ihren energetischen Ausgangszustand geben sie die Energiedifferenz als elektromagnetische Strahlung ab.



Aufbau einer Energiesparlampe



Kompaktleuchtstoffröhren enthalten Quecksilber, das nach dem Einschalten an den erhitzten Elektroden verdampft. Bei elektrischer Anregung geben die Quecksilberatome Strahlung im ultravioletten Bereich des Spektrums ab. Diese wird von einem Leuchtstoff auf der Innenseite der Glaswand und dem Glas selbst vollständig absorbiert (dringt also nicht nach außen durch). Eine typische, in Leuchtstoffröhren eingesetzte Verbindung ist mit Zinn aktiviertes Strontium-Magnesium-Phosphat ($(\text{Sr, Mg})_3(\text{PO}_4)_2$), welches bei Anregung mit UV-Strahlung eine rosarote Lichtfarbe emittiert. Das Phänomen, dass Stoffe nach Anregung mit kurzwelliger Strahlung langwellige Strahlung emittieren, bezeichnet man als Fluoreszenz. Mit der richtigen Mischung von Leuchtstoffen ist es nun möglich, ein annähernd durchgängiges Lichtspektrum und auch warm- oder kaltweißes Licht zu erzeugen. Hochwertige Leuchtstoffröhren, die allerdings nicht in jedem Baumarkt erhältlich sind, strahlen sogar Licht ab, das dem Sonnenlicht sehr nahe kommt.

HINWEIS

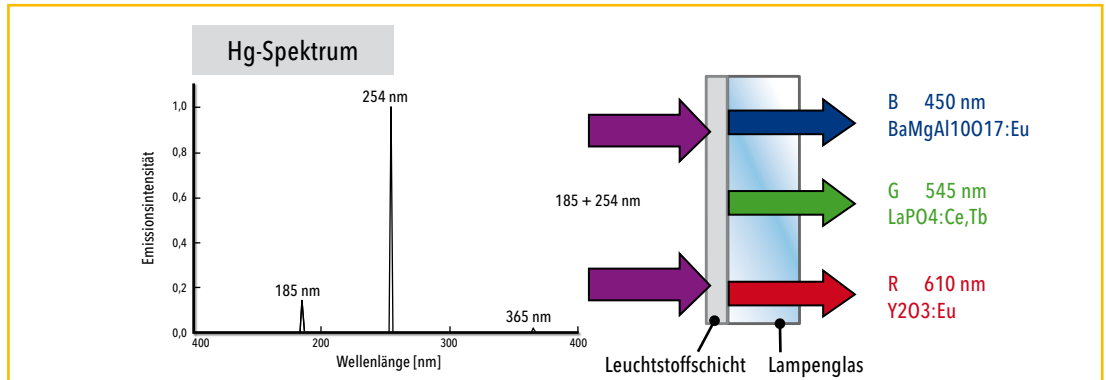
Der Quecksilbergehalt von Energiesparlampen verunsichert viele Verbraucher. In der Lampe selbst ist es hermetisch eingeschlossen, ausgediente Lampen dürfen allerdings nicht im Hausmüll entsorgt werden, sondern müssen als Sondermüll im Wertstoffhof abgegeben werden. Wenn eine Lampe zerbrochen ist empfiehlt es sich, die Bruchstücke vorsichtig und vollständig einzusammeln und in einem Schraubglas ebenfalls zum Wertstoffhof zu bringen. Laut EU-Verordnung dürfen Energiesparlampen maximal 5 Milligramm Quecksilber enthalten, wobei hochqualitative Produkte weniger als die Hälfte dieser Menge enthalten und mit einem Splitterschutz ausgerüstet sind. Seit September 2010 muss auf der Verpackung der Quecksilbergehalt von Energiesparlampen angegeben werden.



Moderne Lichtquellen – ein breites Spektrum

ABBILDUNG 5-7

Chemie der Fluoreszenzlampen



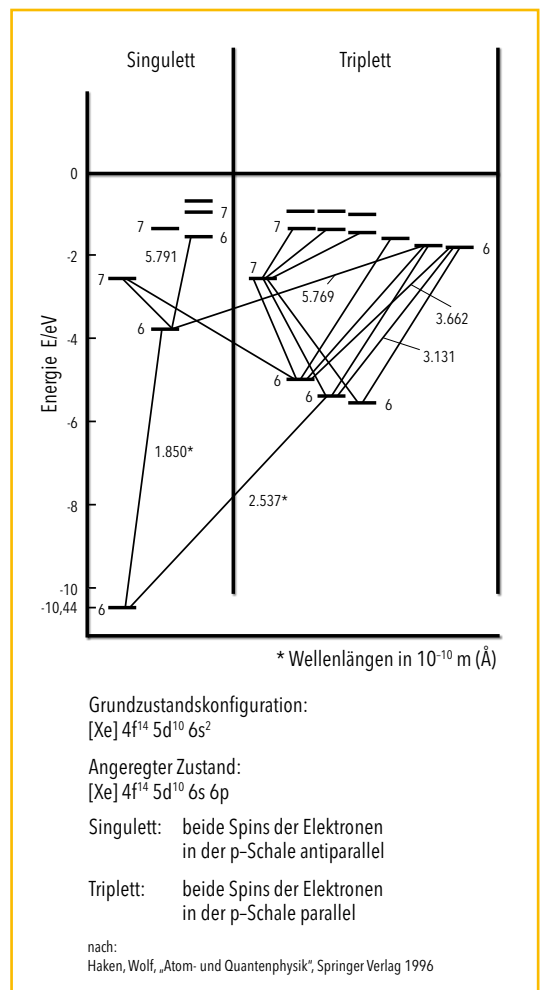
Leuchtstoffröhre: Die Aufgabe von Quecksilber

In einer Leuchtstofflampe liegt während des Betriebes das Füllgas in Form eines heißen Plasmas* vor. Dies bedeutet, dass es ganz oder nahezu vollständig durch Ladungstrennung aus freien Elektronen und ionisierten Atomen besteht.

Trifft nach dem Verdampfen des Quecksilbers nun in der heißen Gasfüllung des Lampenkolbens ein beschleunigtes freies Elektron auf ein Quecksilberatom, überträgt es seine Energie auf ein Elektron in dessen Atomhülle und regt dieses kurzzeitig an. Das Hüllenelektron wird dabei in einen höheren energetischen Zustand angehoben, in dem es jedoch nur kurze Zeit verbleibt. Bei dem „Zurückfallen“ auf sein Ausgangsniveau gibt es einen Teil der aufgenommenen Energie als Lichtquant mit einer Wellenlänge von 254 nm, also im Spektralbereich der ultravioletten Strahlung ab. Diese regt den Leuchtstoff zur Fluoreszenz an, was bedeutet, dass dieser seine Anregungsenergie als Licht niedrigerer, für Menschen sichtbarer Wellenlängen abgibt. Dabei ist die Wellenlänge, also die „Farbe“ des abgegebenen Lichtes, abhängig von der Zusammensetzung des Leuchtstoffes. Die Leuchtstoffbeschichtung an der Innenwand des Lampenkolbens besteht in der Regel aus etwa 1 bis 5 Mikrometer großen Teilchen der Oxide, Sulfide oder Phosphate von Erdalkalimetallen, Yttrium oder Zink. Daneben werden ihnen noch in Spuren andere Elemente, etwa wie Strontium oder Cer, als Aktivatoren und Sensibilisatoren zugesetzt.

ABBILDUNG 5-8

Termschema von Quecksilber



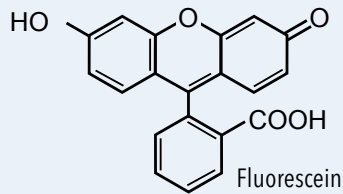
Fluoreszenz: Von Qualle bis Quantenpunkt*

Das physikalische Phänomen der Fluoreszenz begegnet uns im Alltag öfter – morgens zum Beispiel mit dem Textmarker in der Schule, nachmittags bei der Dekoration im Kaufhaus, abends in der Disco.

Es wird auch genutzt, um bestimmte Mineralien im Schaukasten besonders wirkungsvoll in Szene zu setzen. Übrigens stammt der Begriff Fluoreszenz aus der Beobachtung, dass das Mineral Fluorit (Calciumfluorid, CaF₂) bei Anregung mit **ultravioletter Strahlung** grün leuchtet.

Fluoreszenz entsteht bei organischen Farbstoffen mit planaren, delokalisierten pi-Elektronensystemen wie etwa dem Fluorescein (siehe Formel).

In der Natur ist die Fluoreszenz bei bestimmten Lebewesen zu beobachten, die durch Lichtblitze Beute anlocken oder Fressfeinde abschrecken. Zum Beispiel die Qualle *Aequorea victoria*: Ihr grün fluoreszierendes Protein (GFP) enthält ein polyzyklisches Fluorophor, das durch eine spontane chemische Reaktion dreier Aminosäuren während der Faltung



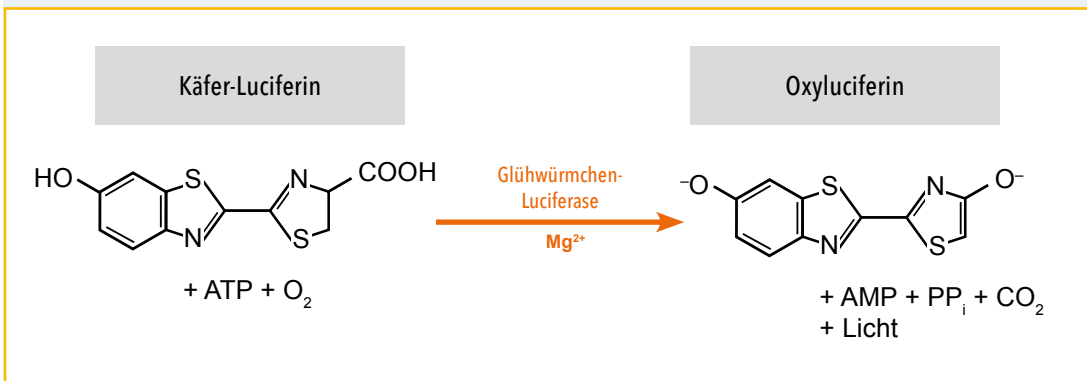
des Eiweißmoleküls entsteht. Um das GFP zum Leuchten anzuregen, sind weitere Eiweißstoffe notwendig, die durch die chemische Spaltung bestimmter Verbindungen kurzwelliges Licht erzeugen: Diesen Vorgang bezeichnet man als Biolumineszenz. Er findet beispielsweise auch infolge der chemischen Spaltung des Farbstoffes Luciferin im Glühwürmchen statt.

Einen Sonderfall stellen fluoreszierende Nanokristalle (Durchmesser max. 20 nm) aus Halbleiterverbindungen wie Cadmiumselenid (CdSe) oder Cadmiumtellurid (CdTe) dar, sogenannte Quantenpunkte. Sie werden in der Displaytechnologie bereits als die Nachfolger der LEDs für die Hintergrundbeleuchtung gehandelt und versprechen noch brillantere Bilder bei gleichzeitig höherer Energieersparnis. Die Fluoreszenzfarbe der Quantenpunkte variiert einzig mit der Veränderung der Partikelgröße. Dieser „Größenquantisierungseffekt“ erlaubt ein breites Spektrum sehr reiner Lichtfarben. Anders als die oben beschriebenen organischen Fluoreszenzfarbstoffe bleichen Quantenpunkte nur sehr langsam aus.



ABBILDUNG 5-9

Oxidation des Luciferins durch das Enzym Luciferase



Leuchtdioden als Beispiel für Festkörperlichtquellen

Sie sind weniger als fünf Millimeter klein, strahlen gleißend hell, verbrauchen weit weniger Energie als eine Glühlampe und haben bei fachgerechtem Betrieb eine Lebensdauer von mehr als 100.000 Stunden: Leuchtdioden oder kurz „LEDs“ (aus dem Englischen für „Light Emitting Diodes“).

Man muss nicht lange suchen, um ihnen im Alltagsleben zu begegnen und findet sie in der Fahrradlampe ebenso wie in Funktionsleuchten elektrischer Geräte zuhause, als Hintergrundbeleuchtung im modernen Flachbildschirm oder in der weit sichtbaren Verkehrsanzeige auf der Autobahn.

ABBILDUNG 5-10

Vorteile von LEDs gegenüber konventionellen Leuchtmitteln

Rund 90 Prozent geringerer Energieverbrauch

Lange Lebensdauer (bis zu 100.000 Stunden gegenüber 500 bis 1.000 Stunden herkömmlicher Glühlampen)

Große Helligkeit (max. 250 Lumen / Watt)* bei geringer Größe (Leuchtstofflampe: rund 50 Lumen / Watt)

Breites Farbspektrum

Vielfältige Anwendungen

* Stand: September 2010

Auch die Emission für den Menschen unsichtbarer Wellenlängen ist Stand der Technik. So strahlen die Leuchtdioden etwa in Fernbedienungen im Infrarotbereich.

LEDs sind Festkörperlichtquellen; ihr Herzstück, ein Halbleiterkristall ist meist aus einer Galliumverbindung (z. B. Galliumarsenid, GaAs, deshalb auch „III-V-Halbleiter“) aufgebaut. Dieser Kristall besteht aus i. d. R. mehreren dotierten Schichten, ist mit Kontakten versehen und in einer kleinen Kunststoffeinfassung befestigt, deren Innenseite mit einer hauchdünnen Silberschicht als

Reflektor ausgekleidet ist. Dieser Aufbau wird von einem Kunststoffgehäuse, meist mit einer kleinen Linse in der Kuppe, eingefasst.

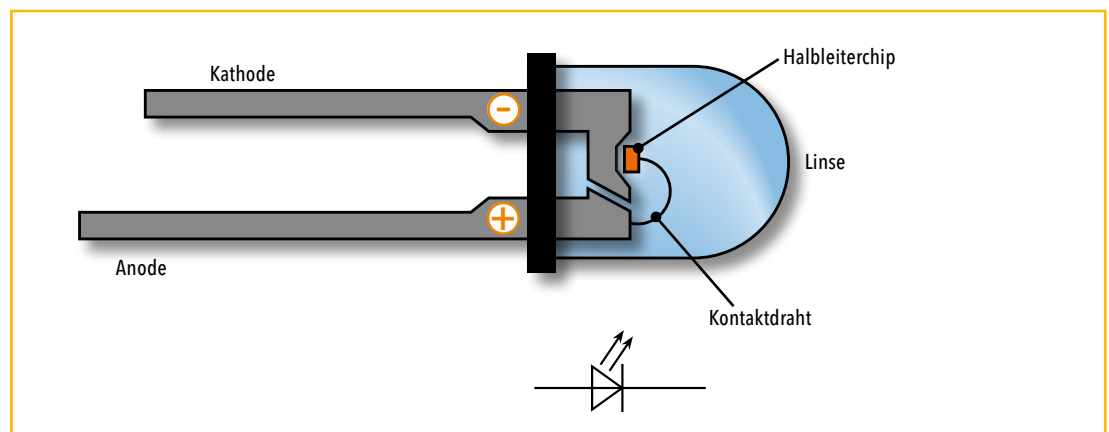
METHODISCHE ANMERKUNG

Die Sperrspannung verschiedenfarbiger LEDs (PHY-EX6a und PHY-EX6b)

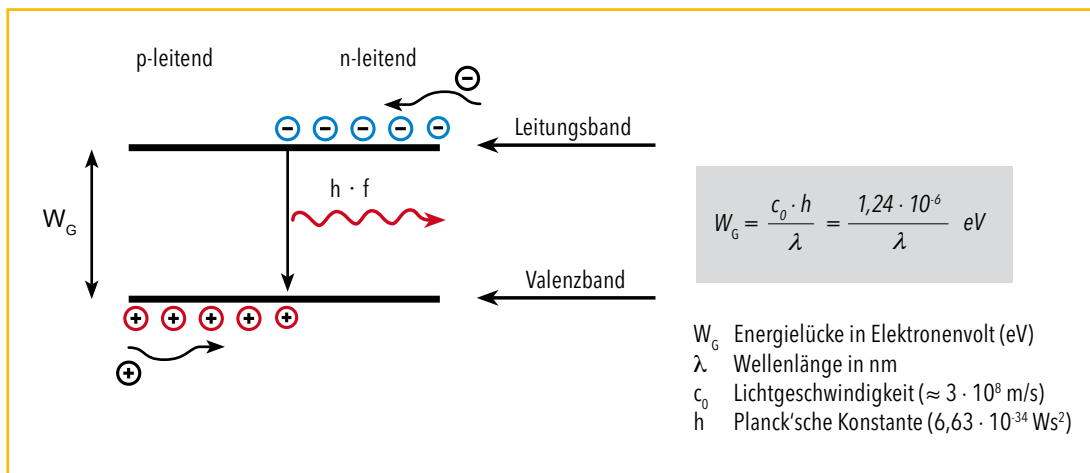
Siehe Versuchsvorschrift.

ABBILDUNG 5-11

Aufbau einer LED



Erklärung diskreter Emissionswellenlängen am Beispiel des Bändermodells



Gemäß seiner Bezeichnung als Leuchtdiode lässt der Halbleiterkristall nur elektrischen Strom in einer Flussrichtung durch und sendet dann Licht aus. Die Wahl des Halbleitermaterials und seiner Dotierung (gezielte „Verunreinigung“ mit Fremdatomen aus anderen Hauptgruppen/siehe auch Kapitel 6.1., Photovoltaik) beeinflusst sowohl die Leistung als auch die Helligkeit und das Farbspektrum einer LED, wie der historische Vergleich zeigt. 1970 bestanden die ersten LEDs aus Gallium-Arsenid-Phosphid (GaAsP). Sie waren lediglich in den Farben Gelb und Rot verfügbar. Ihre Leistung lag unter 0,1 Watt und auch die Helligkeit war mit weniger als 0,1 Lumen gemessen an den heutigen Möglichkeiten noch gering.

HINWEIS

Lumen = Maßeinheit für die gesamte, von einer Lichtquelle im sichtbaren Bereich allseitig abgegebene Strahlung.

Moderne Leuchtdioden auf der Basis von Aluminium-Indium-Gallium-Phosphid oder -Nitrid erreichten bereits im Jahr 2008 eine Leistung von 10 Watt und Helligkeiten von bis zu 150 Lumen. Durch gezielte Dotierung, zum Beispiel mit Mg (p-Schicht) und Te (n-Schicht), wird der geeignete Bandabstand und dadurch die gewünschte Farbe eingestellt (siehe ABBILDUNG 5-12).

Historische Entwicklung anorganischer Leuchtdioden

1970	2010
<p>GaAsP < 0,1 W < 0,1 lm Gelb + Rot</p>	<p>AlInGaP, AlInGaN 0,6 - 10 W 10 - 150 lm Alle Farben + UV</p>

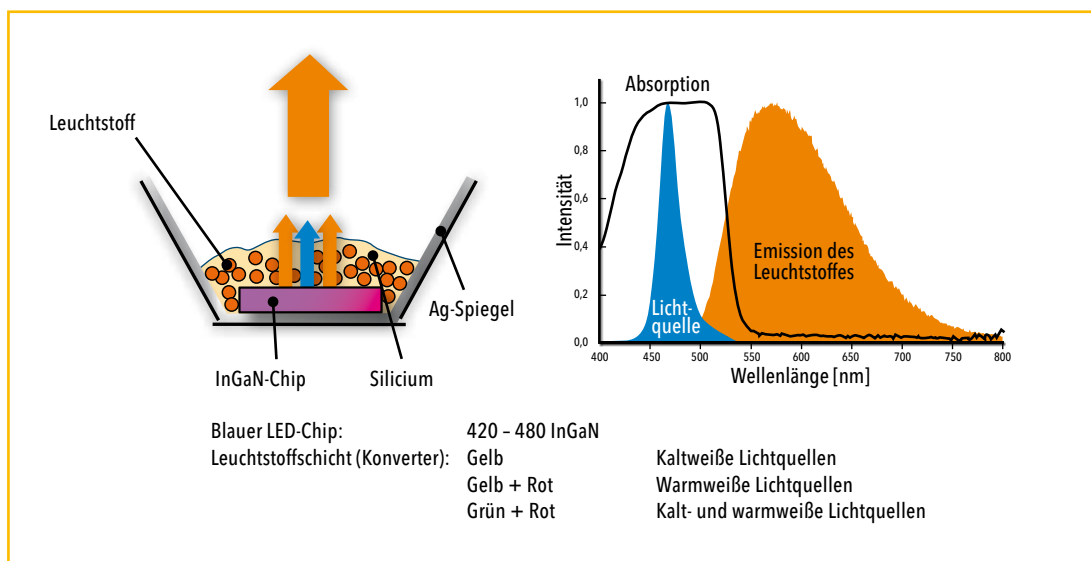


Wie wir bereits bei den Leuchtstofflampen gesehen haben, kann das Farbspektrum einer Lampe durch die Wahl des Leuchtstoffes stark variiert werden. Dieses Prinzip kommt auch bei Leuchtdioden zum Einsatz, um kalt- oder warm-

weißes Licht zu erzeugen. Dabei regt beispielsweise ein UV-Halbleiterchip ein Gemisch aus drei Fluoreszenzfarbstoffen an, die im Rot-, Grün- und Blaubereich emittieren. Die Mischfarbe der drei Spektren ergibt Weiß.

ABBILDUNG 5-14

Funktionsprinzip von weißen LEDs



Flach, farbig und flexibel: OLEDs

Einen gänzlich anderen Aufbau haben die organischen Leuchtdioden oder auch kurz OLEDs. Sie sind nicht punktförmig sondern flächig und bestehen aus mehreren sehr dünnen Schichten auf einem festen oder flexiblen Trägermaterial. Als Licht emittierende Komponente dienen elektrisch leitende organische Farbstoffe (z. B. Aluminium-tris (8-hydroxychinolin)), die zwischen dünnen Halbleiterschichten, von denen mindestens eine durchsichtig sein muss (beispielsweise Indium-Zinn-Oxid, engl.: ITO), als Kontakt zur Anode und Kathode eingefasst sind. Mittlerweile sind sowohl warmweiße Raumleuchten in Kachelform als auch mehrfarbige Displays für Smart Phones oder Digitalkameras auf Basis von OLEDs im Handel erhältlich. Im Zusammenhang mit den lichtstarken und farblich brillanten Kleinbildschirmen taucht immer öfter die Bezeichnung AMOLED auf, die für „Aktivmatrix-OLED“ steht. Hierbei bildet jedes OLED-Modul einen Pixel, der jeweils von einem eigenen integrierten Schaltkreis angesteuert wird.

Enthalten die OLEDs als emittierenden Farbstoff kleine Moleküle, spricht man von SMOLEDs (aus dem Englischen für „small molecules“). Im Fall leuchtender Polymere (beispielsweise Poly (p-Phenylen-Vinyl), PPV) wird auch die Bezeichnung PLED verwendet.

Die Visionen der Entwickler organischer Leuchtdioden reichen vom aufrollbaren Bildschirm bis zur leuchtenden Tapete. Auf dem Weg dorthin sind jedoch noch einige technische Hürden zu nehmen. So sind die Leuchtmaterialien empfindlich gegenüber Oxidation durch den Luftsauerstoff und müssen auch vor Feuchtigkeit geschützt werden. Dies geht auf Kosten der Flexibilität, denn die dafür notwendige Abdichtung erfordert noch starre Trägermaterialien. Um mit dem technischen Stand der LEDs gleichzuziehen, wird auch die Lebensdauer der OLEDs noch deutlich zu steigern sein. Bereits sichtbare Erfolge geben aber Grund zur Hoffnung: In Display-Anwendungen zeigen die organischen Leuchtdioden schon heute ein lichtstarkes, farblich brillantes und kontrastreiches Bild auch aus schrägen Blickwinkeln.

Sie benötigen keine Hintergrundbeleuchtung sondern leuchten aus sich heraus, erzeugen rund 2.000 mal schneller ein Bild als LCD*-Displays und benötigen dafür sehr wenig Strom.

ABBILDUNG 5-15

Aufbau einer OLED

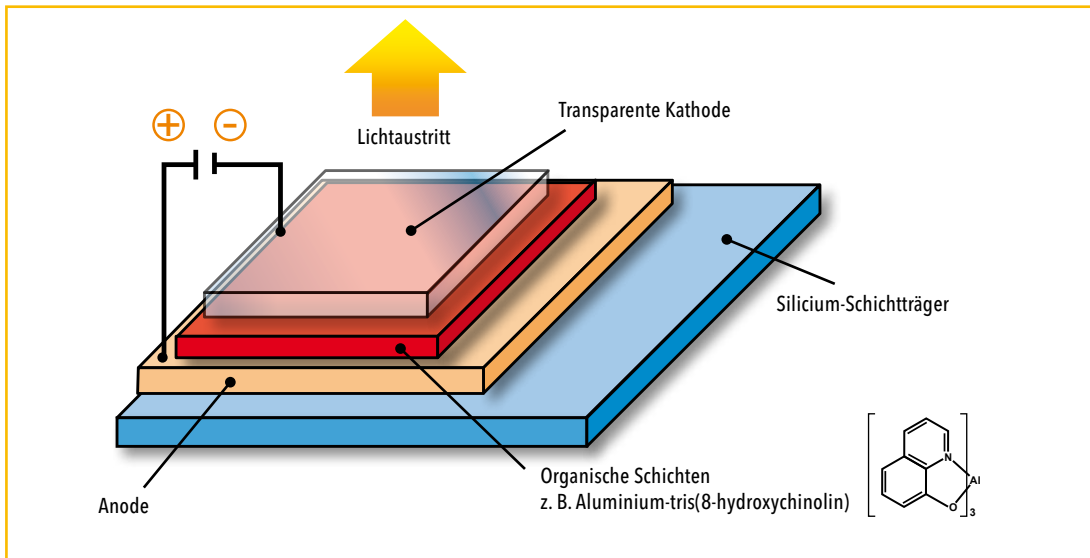
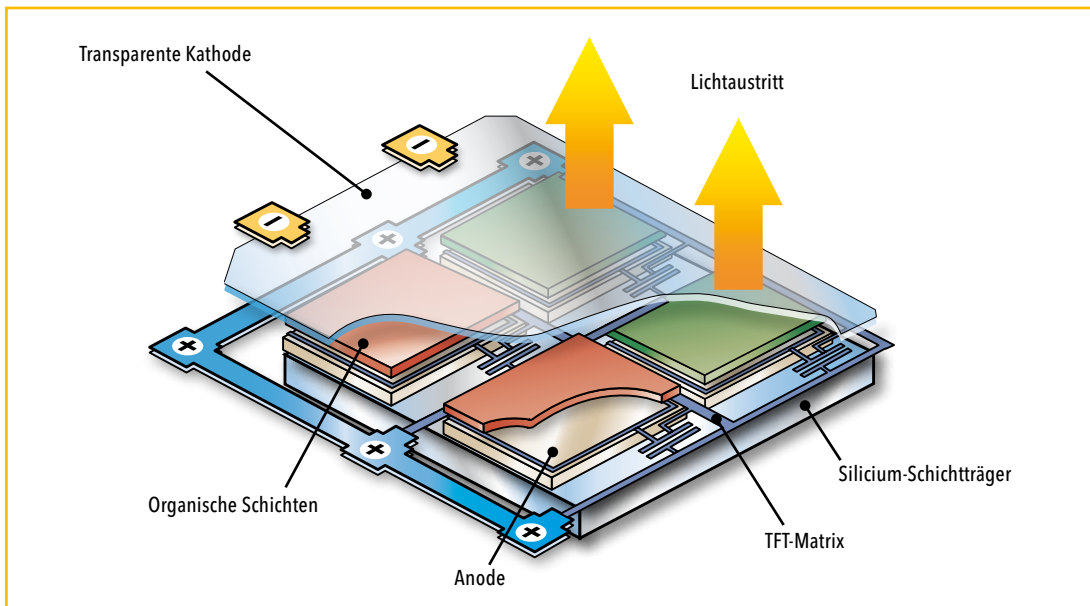


ABBILDUNG 5-16

Aufbau einer AMOLED



A Basis

6.1 Photovoltaik

Wie Sonnenlicht in andere Energieformen umgewandelt wird

Von Pflanzen und Physikern

Unsere Sonne ist eine umweltfreundliche Energiequelle mit schier unerschöpflich viel „Power“.

Um diese Power rechnerisch zu fassen, wurde die Solar-konstante E_0 geprägt. Sie gibt die Strahlungsstärke an, die bei einem mittleren Abstand Erde-Sonne (Durchschnitt des minimalen und maximalen Bahnabstands auf der Ellipse der Erde um die Sonne) ohne den Einfluss der Atmosphäre senkrecht auf die Erdoberfläche trifft.

Die Weltorganisation für Meteorologie legte den Mittelwert für die Solarkonstante 1982 wie folgt fest:

$$E_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$$

Wie diese Energie nutzbar ist, zeigen uns die Pflanzen. Sie nehmen im Prozess der Photosynthese die Lichtenergie der Sonnenstrahlung über das Blattgrün auf und bauen mit deren Hilfe aus dem Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre und Wasser sowie einer Reihe von Spurenelementen ihre gesamte Biomasse auf. Als „Abfallprodukt“ geben sie Sauerstoff ab. Um diesen Prozess zu ermöglichen, müssen in der Pflanze elektrisch geladene Teilchen fließen und übertragen werden.

Das ist in der Solarzelle, mit der Sonnenlicht in Strom umgewandelt wird, nicht anders. Unsere moderne Photovoltaik verdanken wir dem französischen Physiker A. E.

Becquerel. Schon 1839 stellte er fest, dass zwischen zwei Elektroden die er zuvor in ein Säurebad getaucht hatte ein Strom floss, wenn er die eine davon dem Licht aussetzte. Dieser Photoeffekt wurde mit weiteren Experimenten 1887 von dem deutschen Physiker Heinrich Hertz und danach von seinem Schüler Hallwachs weiter erforscht. Albert Einstein erklärte deren Ergebnisse 1905 mit den Theorien der modernen Physik und erhielt dafür 1921 den Nobelpreis.

Sand für Solarzellen

Die Hauptkomponenten der modernen Solarzellen bestehen aus dem zweithäufigsten Element unserer Erde (nach Sauerstoff), dem Silicium. Dieses Element gibt es buchstäblich wie Sand am Meer, denn Quarzsand ist nichts anderes als eine Verbindung von Silicium und Sauerstoff (Siliciumdioxid).

Silicium gehört zu der Gruppe der sogenannten Halbleitermaterialien: Bei tiefen Temperaturen ist es ein guter Isolator. Bereits bei Zimmertemperatur, noch besser aber bei höheren Temperaturen oder unter der Einwirkung von Licht, wird es elektrisch leitfähig. Diese Leitfähigkeit lässt sich noch wesentlich steigern, wenn man das Silicium mit anderen chemischen Elementen gezielt verunreinigt.

METHODISCHE ANMERKUNG

Experiment mit Solarzellen und einfachen „Verbrauchern“ (PHY-EX7)

Siehe Versuchsvorschrift.

ABBILDUNG 6-1-1

Photovoltaikmodule an Satelliten, Hausfassaden und Verkehrsanlagen



C Oberstufe

Anwendungen: Vom Weltraum auf die Erde

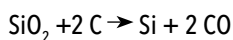
Photovoltaikmodule haben ihren Siegeszug in die Technikwelt zunächst in der Raumfahrtindustrie begonnen. Bei Satelliten ebenso wie bei der internationalen Raumstation ISS sorgen sie als große, faltbare Paneele ergänzend zu den mitgeführten Treibstoffen für die nötige Stromversorgung. Längst haben sie aber auch den Weg vom Weltall zurück auf die Erde gefunden. Man sieht sie heute auf Dächern, Fassaden, Wohnmobilen, Verkehrsanlagen an der Autobahn oder elektrisch betriebenen Fähren und Yachten.

B Mittelstufe

Chemie und Anwendungen des Siliciums

Herstellung von Rohsilicium

Photovoltaik, also die direkte Umwandlung von Sonnenlicht, ist undenkbar ohne das Element Silicium. Es ist ein Halbmetall mit halbleitenden Eigenschaften. Es kommt in der Natur nur in gebundener Form, zum Beispiel in Silicaten vor. Elementares Silicium wird industriell durch Reduktion von Quarzsand mit Koks bei 2.000 °C im Lichtbogenofen hergestellt.

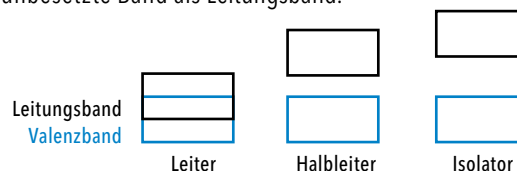


Auf diese Weise werden jährlich weltweit ca. 4 Millionen Tonnen Silicium gewonnen.

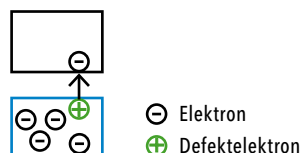
Man unterscheidet drei Formen des Siliciums, monokristallines, polykristallines und amorphes Silicium.

Silicium als Halbleiter*

Eine Solarzelle besteht üblicherweise aus einem sogenannten pn-Übergang zweier verschieden dotierter, also gezielt mit anderen Elementen „verunreinigter“ Siliciumschichten. Die Unterscheidung zwischen Leitern, Halbleitern und Nichtleitern lässt sich mit dem Bändermodell verdeutlichen: Da die Elektronen in Festkörpern über große Abstände miteinander wechselwirken, gibt es keine diskreten Energieniveaus mehr, sondern es entstehen sogenannte Bänder, deren gegenseitige Lage dafür verantwortlich ist, ob ein Stoff leitet oder nicht. Dabei wird das höchste mit Elektronen besetzte Band als Valenzband bezeichnet, das direkt darüber befindliche unbesetzte Band als Leitungsband.



Während sich bei den Leitern das Valenz- und das Leitungsband überlappen, die Elektronen also frei beweglich sind, existiert sowohl bei den Halbleitern als auch bei den Isolatoren eine Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Bei Halbleitern können durch Licht oder Wärme Elektronen in das Leitungsband angehoben werden – das Material wird leitend. Die angeregten Elektronen sowie die Löcher (Defektelektronen) tragen zur Leitung bei. Die in einem Halbleiter, bspw. reinem Silicium, vorkommenden Ladungsträger werden auch als intrinsische Ladungsträger bezeichnet – ihre Dichte ist in Silicium sehr gering.



Durch Dotierung (von lat. *dotare* „ausstatten“) mit Elementen der fünften oder dritten Hauptgruppe kann die Ladungsträgerdichte erhöht werden. Die dabei eingebrachten Mengen dieser Dotierstoffe sind in der Regel sehr gering (Verhältnis Dotierstoff zu Silicium zwischen $1:10^{10}$ und $1:10^4$).

C Oberstufe

Man unterscheidet zwischen n-(negativ) und p-(positiv) Dotierungen.

Bei der p-Dotierung werden in das Silicium Fremdatome der 3. Hauptgruppe eingebracht (z. B. Aluminium, Bor oder Indium). Diese Atome dienen als Elektronenakzeptoren, da sie ein sog. Akzeptorniveau bereitstellen, das energetisch nur knapp oberhalb des Valenzbandes liegt. Es kommt zu einer Lochleitung, da das Siliciumgitter leicht Elektronen an dieses Akzeptorniveau abgibt. Die so entstehenden Elektronenfehlstellen („Löcher“) können leicht durch andere Elektronen aufgefüllt werden. Makroskopisch sieht es dann so aus, als gäbe es bewegliche positive Ladungen.

Bei der n-Dotierung werden Fremdatome der 5. Hauptgruppe eingebracht (beispielsweise Phosphor, Arsen oder Antimon). Diese fungieren als Donatoratome. Es kommt zu einer Elektronenleitung, da das zusätzliche Elektron von den sog. Donatorniveaus leichter in das Leitungsband des Siliciums angeregt werden kann als die Elektronen aus dem Valenzband des Siliciums. Kombiniert man einen p- und einen n-Halbleiter erhält man einen sog. p-n-Übergang. Im p-Teil herrscht ein Löcherüberschuss, während im n-Teil ein Elektronenüberschuss vorliegt. Durch Diffusion wandern die Elektronen von der n- zur p-Seite und die Löcher von der p- zur

n-Seite, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen Diffusion und elektrischer Feldkraft eingetreten ist.

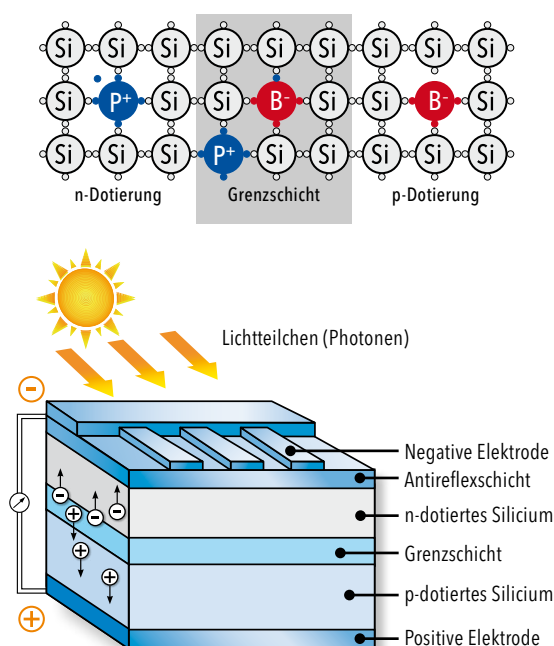
Die so durch Rekombination von Elektronen und Löchern entstandene Grenzschicht ist also eine Zone, die an beweglichen Ladungsträgern verarmt ist, aber eine Raumladung und damit ein elektrisches Feld besitzt.

Wird ein solcher Halbleiter nun dem Sonnenlicht ausgesetzt, so kommt es in der Raumladungszone zur Bildung von Elektron-Loch-Paaren. Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes fließen die Elektronen in den Bereich der positiven Raumladung. Ist – wie bei einer Solarzelle üblich – diese n-dotierte Schicht sehr dünn, gelangen die Elektronen bis zum Frontkontakt. Als Resultat kann nun ein Photostrom an den Außenseiten der Solarzelle abgeführt werden.

HINWEIS

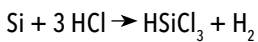
Graphen – ein Material nicht nur für Nobelpreisträger: 2010 wurde der Physik-Nobelpreis an die Forscher Andre Geim und Konstantin Novoselov (University of Manchester) für ihre grundlegenden Experimente zu den Eigenschaften von Graphen verliehen. Neben den Fullerenen* und den Kohlenstoffnanoröhren stellt es eine weitere, vergleichsweise neu entdeckte Variante des Kohlenstoffs dar. Seine C-Atome sind in Sechseck-Waben angeordnet und bilden eine Ebene mit der Dicke einer einzelnen Atomlage, über die sich ein ausgedehntes, delokalisiertes pi-Elektronen-Leitungsband erstreckt. Im organischen Halbleiter Graphen ist die Ladungsträgerbeweglichkeit („Mobilität“ μ = Geschwindigkeit/Feldstärke; Einheit $1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) wesentlich größer als in allen anderen Materialien.

Sie beträgt bis zu $200.000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; zum Vergleich herkömmliche Metalle: $\mu = 50 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. Im Labormaßstab gelang es bereits integrierte Graphen-Schaltkreise herzustellen, deren Schaltraten zehnmal höher waren als die herkömmlicher Silicium-Transistoren. Aber auch für die Umwelttechnik könnte das Material interessant werden: Ein Gemisch aus Graphenoxid und dem Mineral Magnetit filterte in Versuchen koreanischer Forscher 99,9 Prozent des Schwermetalls Arsen aus verunreinigtem Trinkwasser. Danach ließ sich die Verbindung einfach mit einem Magneten wieder vom Wasser abtrennen.

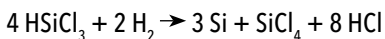


Herstellung von polykristallinem Silicium

Rohsilicium, das wie oben beschrieben durch die Reduktion von Quarzsand gewonnen wird, muss weiter gereinigt werden, um es für die Produktion von Solarzellen nutzen zu können. Genutzt wird hierfür das Siemens-Verfahren: Rohsilicium wird zunächst mit Chlorwasserstoff zu Trichlorsilan (Siedepunkt ca. 35 °C) umgesetzt, welches mehrmals destilliert wird, bis die gewünschte Reinheit erreicht ist.



Die mehrfache Destillation stellt den energieintensivsten Teil bei der Gewinnung des reinen Siliciums dar. Anschließend wird das Trichlorsilan mit Wasserstoff wieder zu reinem Silicium umgesetzt.



Das so gewonnene Silicium hat eine Reinheit von >99,9 Prozent und kann bereits für die Herstellung von Solarzellen aus polykristallinem Silicium eingesetzt werden. Früher erkannte man polykristalline Solarzellen an ihrem typischen blau-glitzernden Aussehen, heute können sie jedoch auch in anderen Farbtönen hergestellt werden. Der Wirkungsgrad, also der Anteil der Lichtenergie, welcher in elektrischen Strom umgesetzt wird, beträgt bei polykristallinen Solarzellen etwa 12 bis 16 Prozent.

Herstellung von monokristallinem Silicium

Um das für Halbleitertechnik und Photovoltaik benötigte hochreine monokristalline Silicium zu gewinnen, werden zwei Verfahren genutzt: Das Tiegelzieh-Verfahren (Czochralsky-Verfahren) und das Zonenschmelz-Verfahren. Beim Tiegelzieh-Verfahren wird das Silicium in einem Quarztiegel geschmolzen und ein Stab mit einem Impfkristall in die Schmelze getaucht. Tiegel und Stab werden nun langsam in entgegengesetzte Richtungen gedreht, während der Stab langsam aus der Schmelze herausgezogen wird. Es bilden sich Silicium-Einkristalle von mehreren Metern Länge und einem Durchmesser von bis zu 30 Zentimeter. Die Verunreinigungen reichern sich in der Schmelze an, so dass ein Einkristall von hoher Reinheit erhalten wird. Zur Herstellung von Computerchips, aber auch von Solarzellen, kann dieser dann in

dünne Scheiben mit einer Dicke von 0,15 bis 0,3 Millimeter zersägt werden (sogenannte Wafer).

Beim Zonenschmelz-Verfahren wandert eine schmale ringförmige Schmelzzone über einen polykristallinen Siliciumstab. Die Verunreinigungen lagern sich in der Schmelze an und können so entfernt werden. Bei der Rekrystallisation entsteht monokristallines Silicium, welches dann ebenfalls zu Wafern weiterverarbeitet wird.

Die beschriebenen Verfahren machen deutlich, dass Solarzellen aus monokristallinem Silicium in der Herstellung energieaufwändiger sind als solche mit polykristallinem Silicium, allerdings besitzen sie einen höheren Wirkungsgrad von bis zu 25 Prozent.

METHODISCHE ANMERKUNG

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle (PHY-EX8)

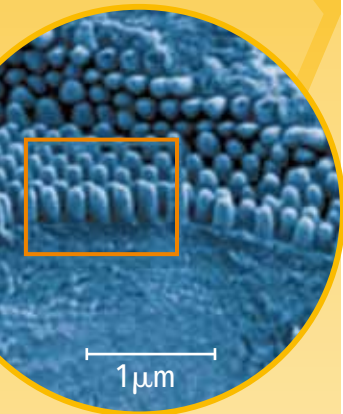
Siehe Versuchsvorschrift.

Herstellung von amorphem Silicium

In amorphem („gestaltlosem“) Silicium, auch als a-Silicium bezeichnet, sind die Atome nicht wie in einem Kristall, sondern unregelmäßig angeordnet. Bei seiner Herstellung wird beispielsweise sehr heißes, gasförmiges Monosilan (SiH_4) unter Zusatz verschiedener Dotierungs- und Hilfsstoffe als Ausgangsstoff verwendet. Auf einem Trägermaterial, etwa einer Glas- oder Metallplatte, scheidet sich hydrogenisiertes Silicium (a-Si:H) ab. Durch das hohe Absorptionsvermögen von amorphem Silicium ist es möglich, Solarzellen mit besonders geringer Schichtdicke herzustellen. Zwar ist der Wirkungsgrad dieser Solarzellen mit 5 Prozent deutlich geringer als der von Solarzellen aus monokristallinem Silicium. Die um einen Faktor 100 geringere Schichtdicke der Solarmodule macht diese Art von Solarzellen jedoch trotzdem wirtschaftlich. In solchen Dünnschichtzellen kommen mittlerweile auch andere Halbleitermaterialien wie Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupferindiumdiselenid (CuInSe_2) zum Einsatz.

Weniger Reflexion durch den Mottenaugeneffekt

In der Photovoltaik ist es ein begehrtes Ziel, die Effizienz der Solarzellen noch weiter zu steigern. Der einfachste Weg dorthin führt über die Verminderung der Reflexion.



Neben der Beschichtung der Siliciumoberfläche mit Siliciumnitrid sind bereits spezielle Abdeckgläser für Photovoltaikmodule auf dem Markt. Mit einem nanotechnologischen Beschichtungsverfahren wird auf der Oberfläche eine löchrige, dichte Lage aus nanoskaligen Siliciumdioxid-Kugeln erzeugt. Diese poröse Schicht vermindert durch den sogenannten „Mottenaugeneffekt“ die Reflexion des Sonnenlichts an der Grenzfläche Glas/Luft und steigert so die jährliche Leistung des Photovoltaikmoduls um 4 bis 7 Prozent.

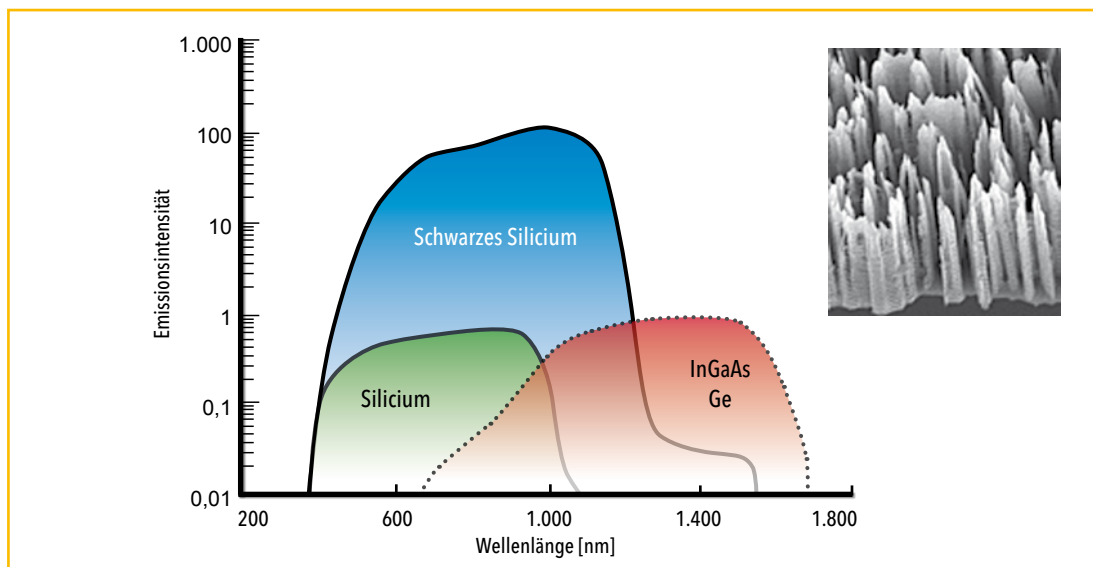
Wie die Bezeichnung des oben genannten Effekts bereits erkennen lässt, diente als natürliches Vorbild für diese Anwendung die Oberflächen-Feinstruktur des Mottenauges. Diese besteht aus flächig verteilten, sich nach außen verjüngenden Zapfen. Die Größe der Zapfen beträgt weniger als 400 Nanometer und unterschreitet somit die Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Weil sich durch die konische Struktur der Zapfen der Brechungsindex nicht sprunghaft sondern kontinuierlich ändert, bildet die Oberfläche des Insektenauges zudem keine konkrete Grenzfläche, anders als zum Beispiel die Grenzfläche Luft/Glas an einer Fensterscheibe.

„Schwarzes Silicium“

Nicht nur die Verglasung der Photovoltaikmodule, auch die Siliciumoberfläche selbst kann zwecks verbesserter optischer Eigenschaften strukturiert werden. Bei der Anwendung hoch energiereicher, ultrakurzer Laserpulse für die Oberflächenbearbeitung wird eine besondere Struktur des kristallinen Siliciums erzeugt, welche die Lichtreflexion an der Oberfläche von Photovoltaikmodulen bei senkrechtem Lichteinfall je nach Wellenlänge von 20 bis 30 Prozent auf 5 Prozent senken kann. Diese Struktur, das „schwarze Silicium“ (engl. „black silicon“ oder auch „silicon grass“), sieht aus wie ein dichter, feiner Rasen aus Nadeln, die mit modernen Verfahren bereits in Nanometerdimensionen erzeugt werden können. Dies eröffnet nicht nur die Perspektive, in Photovoltaikmodulen ein breiteres Wellenlängenspektrum auszunutzen zu können. Auch in der Sensorik, beispielsweise bei Chips in Digitalkameras, kann auf diese Weise die Lichtempfindlichkeit um mehr als das Hundertfache gesteigert werden.

ABBILDUNG 6-1-2

Empfindlichkeitsspektrum eines „Black Silicon“-Sensors



Die „Grätzel-Zelle“

Schon lange strebt die Technik danach, in der Photovoltaik die pflanzliche Photosynthese nachahmen zu können.

Genau dies gelang 1991 dem Schweizer Professor Michael Grätzel mit der Entwicklung einer Farbstoffsolarzelle, die zu seinen Ehren auch Grätzel-Zelle genannt wird.

Anode und Kathode der Zelle bestehen aus innenseitig beschichteten Trägermaterialien (z. B. Glasplatten), zwischen die ein Elektrolyt eingebracht wird.

Die Innenseite der Anode ist leitend mit Indium-Zinn-Oxid (ITO) beschichtet. Darüber befindet sich eine etwa 10 µm dicke nanostrukturierte Schicht des Halbleitermaterials Titandioxid (TiO₂). Auf die TiO₂-Oberfläche wird ein lichtempfindlicher Farbstoff als Monoschicht aufgetragen, der über Hydroxylgruppen an das TiO₂ bindet. Für den Bau einer Grätzel-Zelle im Schulunterricht sind Pflanzenfarbstoffe aus der Gruppe der Anthocyane* gut geeignet, beispielsweise aus Hibiskus- und Brombeerextrakten. Für technische Anwendungen greift man hingegen auf Farbstoffe auf Basis von Rutheniumkomplexen zurück.

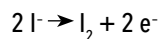
Wegen ihrer Oberflächenrauigkeit bindet die nanostrukturierte Titandioxidschicht etwa zweitausendmal mehr Farbstoff als eine glatte Oberfläche – somit trägt die Nanostruktur zu gesteigerter Effizienz der Farbstoffsolarzelle bei.

Auf die als Kathode fungierende Glasplatte ist antimon-dotiertes Zinnoxid aufgetragen. Darauf wiederum befindet sich eine Lage aus Graphit. Als Elektrolyt zwischen Anode und Kathode (Abstand etwa 20 bis 40 µm) dient beispielsweise Iod-Kaliumiodid-Lösung.

Bei Lichteinfall wird der Farbstoff in der Grätzel-Zelle in einen angeregten Zustand überführt und gibt ein Elektron an das Leitungsband des Titandioxids ab. Anthocyane, als eine Möglichkeit verwendeter Farbstoffe, absorbieren sowohl im UV-Bereich bei 270 bis 290 nm als auch im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Wellenspektrums bei 465 bis 560 nm. Das Absorptionsverhalten ist dabei sowohl abhängig von der Molekülstruktur als auch vom pH-Wert.

TiO₂ wird nicht im sichtbaren Spektralbereich, sondern erst im nahen UV-Bereich angeregt: Sein Abstand zwischen dem Valenz- und Leitungsband beträgt 3,2 eV, was einer Wellenlänge kleiner als 400 nm entspricht. Aus diesem Grund fungiert nanostrukturiertes Titandioxid beispielsweise auch als Photokatalysator.

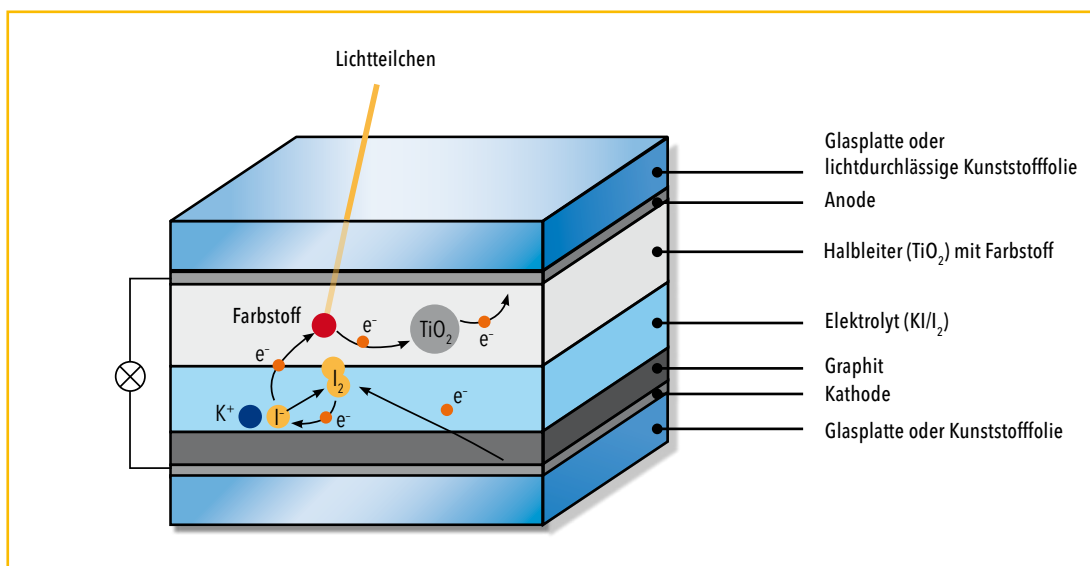
Vom Titandioxid geht das Elektron auf die leitende ITO-Schicht an der Anode und von dort auf die Elektrode über. Nun fehlt dem Farbstoff ein Elektron, das er durch die Oxidation von Iodid-Ionen aus dem Elektrolyten zurück erhält.



Von der Kathode wird der so entstandene Elektronenmangel in der Elektrolytlösung durch Reduktion des elementaren Iods zu Iodid-Ionen wieder ausgeglichen.

ABBILDUNG 6-1-3

Aufbau einer Grätzel-Zelle und Schema des Elektronenflusses



Organische Solarzellen

Das Herzstück einer organischen Solarzelle sind organische Halbleiterverbindungen, zwischen denen die durch Lichtenergie angeregte Ladungstrennung erfolgt. Anders als bei dem Schichtaufbau der Grätzel-Zelle strebt man hier Netzwerke aus verschiedenen Verbindungen an, weil in ihnen die Oberfläche für die Lichtanregung wesentlich größer ist. Dabei kommen sowohl große Polymere als auch kleine Moleküle infrage.

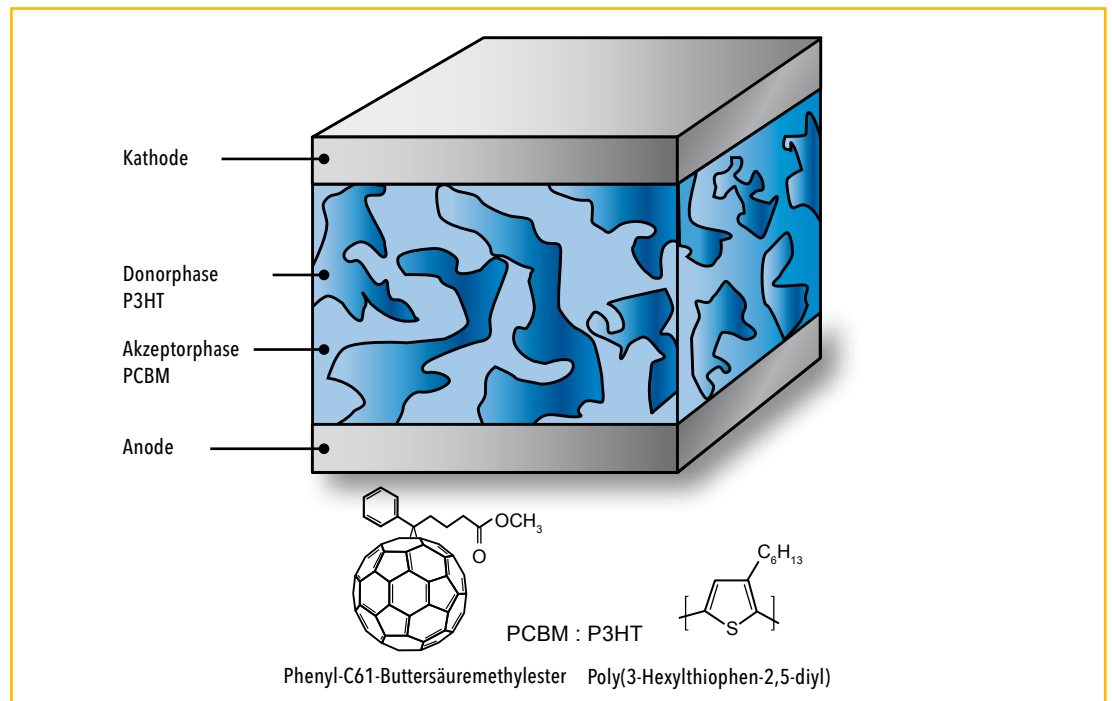
Zwischen den p- und n-dotierten Schichten der Elektroden liegt bei der sogenannten p-i-n-Solarzelle die innere, photoaktive Schicht „i“. Sie wird durch ein Gemisch aus einer Donorphase, die Elektronen abgibt, und einer Akzeptorphase, die Elektronen aufnimmt, gebildet. Die innere Schicht ist in der Regel dünner als 60 nm. Wegen der geringen Eindringtiefe des Lichts sowie durch geringe Absorption an der Elektrodendünnschicht werden sehr

viele der eingestrahlenen Lichtteilchen von der Solarzelle auch absorbiert. Gute Erfahrungen liegen für die „i“-Schicht mit Gemischen aus modifizierten Fullerenen (z. B. PCBM) und langkettigen organischen Polymeren wie zum Beispiel dem Poly(3-Hexylthiophen-2,5-diyl), abgekürzt P3HT, vor. Fullerene sind kugel- oder röhrenförmige Kohlenstoffverbindungen, von denen das C₆₀-Fulleren wegen seiner „Fußball-Geometrie“ die größte Bekanntheit erlangt hat. Für die Anwendung in der p-i-n-Solarzelle stellt das modifizierte C₆₀ den Elektronenakzeptor dar. P3HT dient als Elektronendonator.

Der Vorteil der organischen Solarzellen liegt in ihrer geringen Dicke und der daraus folgenden Flexibilität. Im Labormaßstab konnten bei p-i-n-Solarzellen bereits Wirkungsgrade von 8 Prozent erreicht werden (Stand: Juli 2010).

ABBILDUNG 6-1-4

Aufbau einer organischen Solarzelle



6.2 Solarthermie

Sonnenwärme nutzbar gemacht

Im Hochsommer merkt man es besonders deutlich: Steht ein schwarzes Auto lange in der Sonne, ist die Temperatur im Innenraum meist viel höher als in einem baugleichen PKW mit weißer Lackierung. Der Grund: Schwarze Farbe absorbiert die Wärmeenergie des Sonnenlichts hervorragend. Dieses Prinzip macht man sich beispielsweise beim Solarkocher zunutze: Ein Parabolspiegel konzentriert Sonnenstrahlen auf einen meist mattschwarzen Behälter im Brennpunktbereich des Spiegels. Der Behälter absorbiert das gebündelte Sonnenlicht, so dass sein Inhalt stark erhitzt wird. Solarkocher werden zum Abkochen von Wasser, zum Erwärmen von Speisen, zum Braten, Backen oder Grillen verwendet.

METHODISCHE ANMERKUNG

Selbstbau eines Solarkocher-Modells (PHY-EX9)

Siehe Versuchsvorschrift.

In ärmeren Ländern mit viel Sonnenstrahlung können Solarkocher dazu beitragen, dass weniger Holz für Brennmaterial geschlagen wird. In Gebieten mit wenig sauberem Trinkwasser lässt sich mit ihnen Wasser entkeimen und so die Gesundheit der Menschen verbessern. Die Umwandlung von Sonnenenergie in nutzbare thermische Energie bezeichnet man als Solarthermie. Überall auf der Welt wird die Solarthermie verstärkt dazu verwendet, um mit Sonnenkollektoren Wärmeenergie für Warmwasser zu erzeugen.

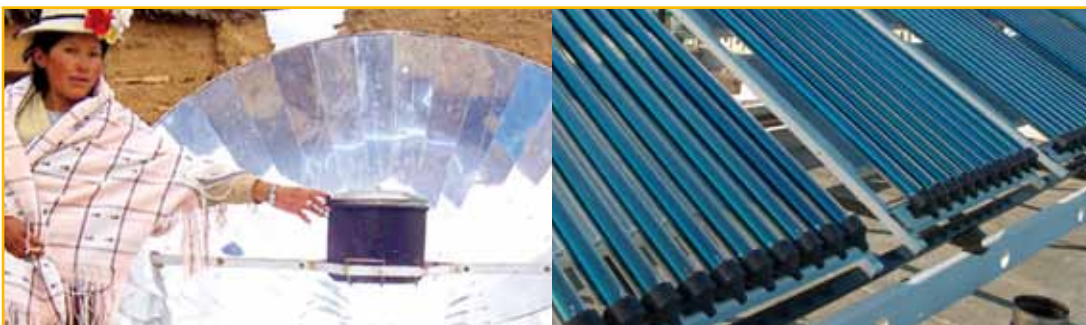
Wärme – physikalisch betrachtet

Jeder Körper gibt Wärmestrahlung ab. Diese auch als thermische Strahlung bezeichnete Strahlung ist ebenso wie sichtbares Licht oder Radiowellen eine elektromagnetische Strahlung. Während bei Flüssigkeiten und Festkörpern in Abhängigkeit von der Temperatur ein recht breites Spektrum an Wärmestrahlung abgegeben wird, lassen sich bei Gasen relativ scharf umrissene, materialtypische Emissionspitzen (Spektrallinien) beobachten. Während Wärmeleitung (Konduktion) und Wärmemitführung (Konvektion) an Materie gebunden sind, kann Wärmestrahlung auch luftleeren Raum überwinden – nur so erreicht uns die Wärme der Sonne auch nach ihrem langen Weg durch das Vakuum des Weltalls. Wenn wir von Wärmestrahlung sprechen, dann meinen wir oft nur den infraroten Anteil der thermischen Strahlung, weil unser Körper diesen spüren kann. Der infrarote Spektralbereich erstreckt sich zwischen 780 nm und 1.000.000 nm (1 mm) Wellenlänge. Dies entspricht einem Frequenzbereich von $3 \cdot 10^{11}$ Hz bis ca. $4 \cdot 10^{14}$ Hz. Wenn Wärmestrahlung auf einen Körper trifft, können drei Dinge geschehen:

1. Transmission: Die Wärmestrahlung wird teilweise durchgelassen (z. B. Fensterscheibe).
2. Reflexion: Die Strahlung wird teilweise zurückgeworfen (z. B. Parabolspiegel).
3. Absorption: Die Strahlung wird teilweise von dem Körper „geschluckt“ (absorbiert) und in Wärme umgewandelt (z. B. schwarzer Behälter im Solarkocher).

ABBILDUNG 6-2-1

Solarkocher und Vakuumröhrenkollektor



Diesen drei Vorgängen wird jeweils ein Koeffizient zugeordnet: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionskoeffizient.

Bei einem Absorptionskoeffizienten von 0,5 beispielsweise „schluckt“ ein Körper 50 Prozent der einfallenden Strahlung, emittiert jedoch bei gegebener Temperatur auch nur die Hälfte der Wärmestrahlung.

Blanke Oberflächen verringern die Absorption von Wärmestrahlung (etwa spiegelnde Metalloberflächen bei Rettungsdecken oder Thermoskannen). Umgekehrt erhöht sich die Wärmestrahlungsabsorption durch matte oder sogar schwarze Oberflächen. Aus diesem Grund erhitzt sich das Wasser in dem schwarzen Behälter eines Solarkochers: Ein solcher Kocher mit einem Parabolspiegel von 140 Zentimeter Durchmesser bringt zum Beispiel drei Liter Wasser in 25 Minuten zum Kochen.

Die Wärmekapazität

Die Menge an thermischer Energie ΔQ , die ein Körper bei einer gegebenen Temperaturänderung ΔT speichern kann, ist durch den Quotienten dieser beiden Größen gegeben und wird als Wärmekapazität C bezeichnet:

$$C = \Delta Q / \Delta T$$

Üblicherweise werden Wärmekapazitäten in Joule pro Kelvin ($J \cdot K^{-1}$) angegeben.

Um Wärmekapazitäten vergleichen zu können, benötigt man eine Bezugsgröße, also entweder Masse, Stoffmenge oder Volumen.

Die auf die Masse bezogene, spezifische Wärmekapazität c ist gegeben durch:

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

Entsprechend bezieht sich die molare Wärmekapazität c_{mol} auf die Stoffmenge n :

$$c_{\text{mol}} = \frac{\Delta Q}{n \cdot \Delta T}$$

Am wichtigsten, insbesondere für den Vergleich von Dämmmaterialien, ist jedoch die auf das Volumen bezogene Wärmespeicherzahl s :

$$s = \frac{\Delta Q}{V \cdot \Delta T}$$

Für das erste Beispiel heißt dies: Die spezifische Wärmekapazität gibt die Energiemenge an, die man benötigt, um 1 Kilogramm eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Ein geeignetes Verfahren ihrer Messung ist die Kalorimetrie (siehe Kapitel 4, Chemie und Energie).

Beispiel: Aluminium besitzt eine spezifische Wärmekapazität von $0,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Zum Vergleich: Der Wert für Eisen beträgt $0,46 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Bei gleicher Energiezufuhr steigt die Temperatur im Eisen also doppelt so schnell wie im Aluminium.

Die spezifische Wärmekapazität für Wasser mit $4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ bedeutet, anders formuliert, dass Wasser ein hervorragender Wärmespeicher ist, wenn es einmal aufgeheizt wurde. Warmwasserheizungen sind der beste Beweis dafür.

METHODISCHE ANMERKUNG

Wie viel Energie steckt in einer Badewanne voll warmem Wasser? (PHY-AB4)

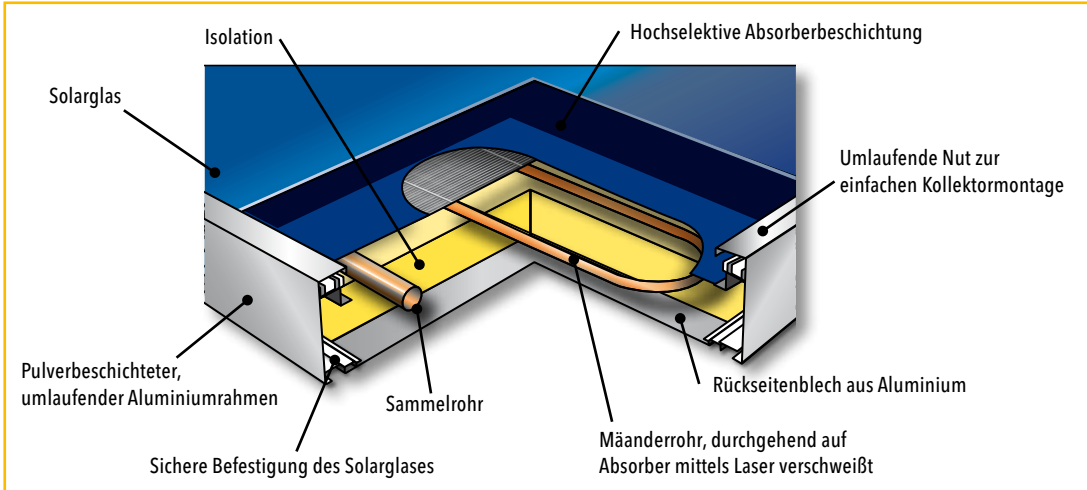
Die Antwort gibt das Arbeitsblatt.

Praktisches Beispiel: der Solarkollektor

Thermische Sonnenkollektoren auf Hausdächern sind gut bekannt und nutzen eine gigantische Energiequelle. Solarkollektoren erreichen (relativ hohe) Wirkungsgrade zwischen 60 und 75 Prozent.

Durch das Abdeckglas des Kollektors fallen Sonnenstrahlen auf den Solarabsorber, das Herzstück des Kollektors. Dieser absorbiert nahezu den gesamten Spektralbereich des Lichts. Der Absorber erwärmt sich, wobei die Abgabe dieser Wärme über einen Konvektionsschutz mit einer oder zwei Glasscheiben oder einem Vakuum verhindert wird. Flachbettkollektoren bestehen aus einer dunklen Absorberfläche mit innenliegenden Hohlräumen, in denen ein Wärmeträger, meist ein Wasser-Glykol-Gemisch, zirkulieren kann. Ihre dunkle Oberfläche nimmt Sonnenlicht sehr gut auf, gibt aber gleichzeitig im Bereich zwischen 780 und 3.000 nm („nahes Infrarot“) weniger Wärmestrahlung ab. Diese Absorberfläche ist in einem stabilen und gedämmten Gehäuse untergebracht, dessen Oberseite in der Regel durch ein Spezialglas verschlossen wird, um eine möglichst hohe Wärmeausbeute zu

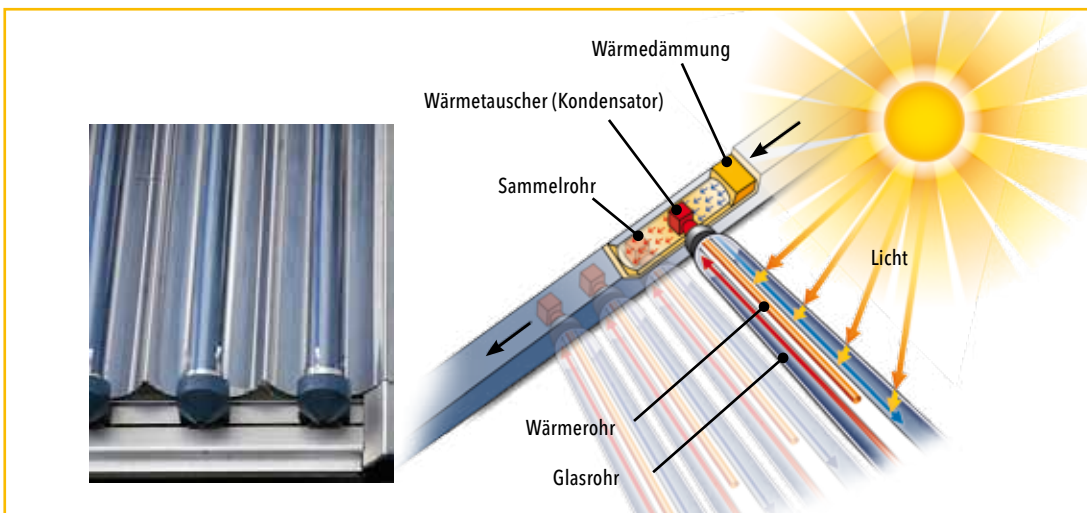
Aufbau eines Sonnenkollektors



gewährleisten. Vakuumröhrenkollektoren sind komplizierter aufgebaut und daher in der Herstellung teurer. In einen Glaskolben wird ein Absorberblech eingebracht, in dessen Mitte ein Rohr mit dem Wärmeträger verläuft. Die Anschlüsse für dieses Rohr werden an einer Seite

aus dem Kolben geführt, anschließend wird in dem Kolben ein Vakuum erzeugt und der Kolben dicht verschlossen. Durch das Vakuum werden die Wärmeverluste gegenüber den Flachkollektoren deutlich reduziert, so dass die Vakuumkollektoren effizienter arbeiten.

Aufbau eines Vakuumröhrenkollektors



Aktuell wird international an Plänen gearbeitet, mithilfe von Solarthermiekraftwerken in der Sahara in großem Maßstab elektrischen Strom zu erzeugen. Im Rahmen der Desertec-Initiative sollen zukünftig die Wüsten

weltweit zur Gewinnung von Solarstrom genutzt werden. Die Sonnenstrahlung, die in sechs Stunden auf die Wüsten der Erde trifft, liefert mehr Energie als die Menschheit in einem Jahr verbraucht.

Wärmeleitung mathematisch unter die Lupe genommen

Welche physikalischen Größen spielen eine Rolle, wenn die Wärmeenergie der Sonne im Solarkollektor von dem Absorber über ein Rohrsystem auf eine wärmetransportierende Flüssigkeit übertragen wird?

Betrachten wir in diesem Zusammenhang zunächst den Wärmeübergangskoeffizienten, durch den die Fähigkeit eines Gases oder einer Flüssigkeit beschrieben wird, Energie von der Oberfläche eines Stoffes abzuführen beziehungsweise an diese abzugeben. Der Wärmeübergangskoeffizient ist bei Flüssigkeiten beispielsweise stark abhängig von der Art der Strömung und der Strömungsgeschwindigkeit.

In einem gegebenen System mit:

α = Wärmeübergangskoeffizient

A = Kontaktfläche beziehungsweise benetzte Oberfläche

T_1, T_2 = Stofftemperaturen der zwei betrachteten Phasen und

Δt = betrachtetes Zeitintervall

berechnet sich durch Wärmeleitung übertragene Wärmemenge Q nach der Gleichung:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_2) \cdot \Delta t$$

Wärmespeicherung: Vom Handwärmer bis zur Heiztechnik

Im Bauwesen sorgen sogenannte Latentwärmespeicher dafür, dass die Sonnenwärme abgeführt und gespeichert wird, anstatt die Fassade aufzuheizen. Wird es draußen kühl, kann die gespeicherte Energie zu Heizzwecken wieder abgegeben werden. Der lateinische Wortstamm *latens* = „versteckt, verborgen“ deutet darauf hin, dass sich das Speichermaterial bei der Aufnahme der **thermischen Energie** bis zum Erreichen seiner Kapazitätsgrenze selbst nicht erwärmt. Daneben gibt es für Latentspeichermaterialien zahlreiche weitere Einsatzmöglichkeiten: In Kraftfahrzeugen speichern sie überschüssige Motorwärme für den Kaltstart. In der Gastronomie finden sie zum Beispiel Verwendung als Warmhalteplatten. In Funktionstextilien nehmen sie die Körper- und Umgebungswärme auf und geben diese wieder ab, wenn es unangenehm kalt ist.

Als Speichermedien verwendet man Materialien, die bei der Wärmeaufnahme einen Phasenübergang von fest nach flüssig durchlaufen. Diese Materialien, vor allem Paraffine* oder Salzhydrate, werden deshalb auch im Englischen als „phase change materials (PCM)“ bezeichnet. Bei der Wärmeaufnahme schmilzt das erstarrte Paraffin oder Salzhydrat und kehrt bei der Wärmeabgabe wieder in seinen Ausgangszustand zurück.

Ein schönes Anwendungsbeispiel für dieses Prinzip sind Wärmekissen im Taschenformat, mit denen man sich im Winter die Hände wärmen kann.

In diesen Taschenwärmern befindet sich häufig Natriumacetat-Trihydrat ($C_2H_3NaO_2 \cdot 3 H_2O$); aber auch Natriumsulfat-Dekahydrat ($Na_2SO_4 \cdot 10 H_2O$, Glaubersalz) oder Kalium-Aluminiumsulfat-Dodekahydrat (Alaunsalz) kommen infrage. Die zu speichernde **thermische Energie** wird dem Speichermedium im Wasserbad zugeführt. Bei einer Schmelztemperatur von $58\text{ }^\circ\text{C}$ verflüssigt sich das Natriumacetat-Trihydrat und kann in diesem Aggregatzustand auch noch bei wesentlich tieferen Temperaturen als unterkühlte Schmelze verbleiben (je nach Bedingungen bis $-20\text{ }^\circ\text{C}$). Dabei ist das Salz in seinem eigenen Kristallwasser gelöst.

Zerdrückt man das Metallplättchen im Wärmekissen, werden winzige Partikel freigesetzt, die als Kristallisationskeime wirken. Bei der Kristallisation erwärmt sich das Kissen auf $58\text{ }^\circ\text{C}$, also wieder auf die für den Schmelzvorgang verwendete Temperatur. Der Kristallisationsvorgang, und damit die Wärmeabgabe, können sich über eine längere Zeit erstrecken.



6.3 Stationäre Brennstoffzelle

Brennstoffzelle – Raumfahrttechnologie mit Zukunft

Bei der Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff wird viel Energie frei. Ein im Verhältnis 2:1 zusammengesetztes Gemisch dieser beiden Gase reagiert bei Zündung mit heftigem Knall, weshalb man es auch als Knallgas bezeichnet. Diese sehr energiereiche Reaktion wurde beispielsweise in den Haupttriebwerken des amerikanischen Space Shuttle genutzt, von denen jedes pro Sekunde mehr als 1.300 Liter eines Gemisches aus flüssigem Wasserstoff und Sauerstoff verbrannte, wobei eine Temperatur von etwa 3.300 °C und ein Schub von 2 Meganewton (soviel wiegt eine Masse von 200.000 Kilogramm auf der Erde) entstand. Die gleiche Reaktion, aber unter ganz anderen Umständen, findet in einer Brennstoffzelle statt. Sie zählt zu den galvanischen Elementen. Ein entscheidender Unterschied zu Batterien und Akkumulatoren besteht darin, dass die energiereichen Substanzen („Brennstoffe“, also im vorliegenden Fall H_2 und O_2) nicht von vornherein in der Zelle enthalten sind, sondern von außen zugeführt werden. Das Grundprinzip der Brennstoffzelle: Wasserstoff wird an einer Elektrode (der Anode) zugeführt und Sauerstoff an der anderen Elektrode (der Kathode). Die Reaktion dieser beiden Gase miteinander wird nun durch die Bauweise der Brennstoffzelle so geführt, dass eine elektrische Spannung an diesen beiden Elektroden resultiert. Verbindet man die Elektroden über einen Stromkreis, so lässt sich der Großteil der bei dieser Reaktion freiwerdenden Energie zum Betrieb eines elektrischen Verbrauchers nutzen.

Anders als etwa ein Dieselgenerator erzeugt eine Brennstoffzelle geräuschlos Strom und ihr „Abgas“ ist reines Wasser.

Ihr Grundprinzip ist übrigens schon recht lange bekannt: Im Jahre 1838 bemerkte der Metzinger Gelehrte Christoph Schönbein, dass zwischen zwei Platindrähten in einer sauren Lösung eine elektrische Spannung herrscht, wenn der eine mit Wasserstoff und der andere mit Sauerstoff umspült wird. Der Schotte Sir William Grove baute auf Schönbeins Arbeit auf und prägte den Begriff des „batterisierten Knallgases“.

Der berühmte französische Schriftsteller Jules Verne formulierte 1870 in seinem Roman „Die geheimnisvolle Insel“ weitreichende Visionen über die Zukunft von Wasserstoff als Energieträger mit dem Satz: „Das Wasser ist die Kohle der Zukunft.“

Nun, ganz so weit sind wir heute noch nicht. Wegen der hohen Kosten und des komplizierten Betriebes war der Einsatz der Brennstoffzelle lange auf Nischenanwendungen in U-Booten oder in der Raumfahrt beschränkt. Doch in den letzten Jahrzehnten wurden immer weitere Anwendungsfelder erschlossen. Zudem lassen die intensiven Forschungen auf diesem Gebiet weitere Durchbrüche erwarten.

METHODISCHE ANMERKUNG

Betrieb einer Brennstoffzelle (CH-EX4)

Die Schüler lernen im Experiment den Aufbau einer Brennstoffzelle kennen und erfahren, welchen Faktoren ihre Leistung bedingen und welche Anforderungen an die Konstruktion einer Brennstoffzelle gestellt werden.

ABBILDUNG 6-3-1

Technische Anwendungen von Brennstoffzellen

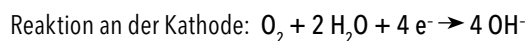
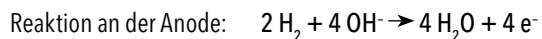


B Mittelstufe

Brennstoffzellen: Hocheffiziente Energiewandler

Eigentlich ist es falsch von „der“ Brennstoffzelle zu sprechen, denn es existieren mittlerweile zahlreiche Typen, die sich in unterschiedlichen Parametern unterscheiden. Im Folgenden werden einige Beispiele dargestellt: Sehr leistungsfähig mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 60 bis 70 Prozent ist die alkalische Brennstoffzelle. Sie arbeitet bei Temperaturen zwischen 20 und 90 °C und verwendet Kalilauge als Elektrolyt. Die zwischen Anoden- und Kathodenraum transportierte Spezies ist das Hydroxid-Ion OH⁻. Aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit wird sie in der Raumfahrt seit langem routinemäßig verwendet. Allerdings hat sie den Nachteil, dass Wasserstoff und Sauerstoff in sehr reiner Form zugeführt werden müssen, da die alkalische Brennstoffzelle auf Verunreinigungen, etwa mit Kohlenstoffdioxid, sehr empfindlich reagiert.

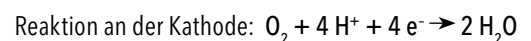
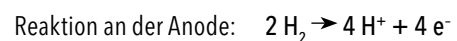
Die bei der alkalischen Brennstoffzelle stattfindenden Reaktionen lauten wie folgt:



Die Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle – entsprechend ihrer englischen Bezeichnung „polymer

electrolyte membrane fuel cell“ als PEMFC abgekürzt – kann je nach Elektrolyt bei 60 bis 80 °C (Niedertemperatur-PEMFC) oder bei 130 bis 200 °C (Hochtemperatur-PEMFC) betrieben werden. Als Elektrolyt kommt bei ihr eine protonenleitende Kunststoffmembran zum Einsatz. PEMFCs lassen sich leicht zu größeren Einheiten zusammenfassen und besitzen hohe Wirkungsgrade von 40 bis 60 Prozent. Allerdings benötigen sie als Katalysator das teure Metall Platin. Anwendung finden sie zum Beispiel in elektrischen Autoantrieben, in der Raumfahrt oder auch in der Hausenergieversorgung.

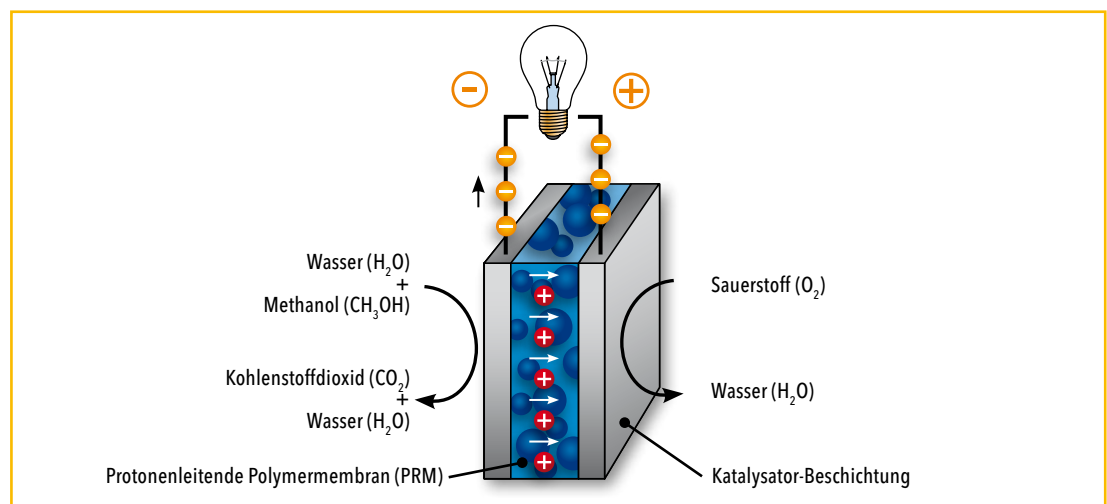
Die bei der PEMFC ablaufenden chemischen Abläufe sind:



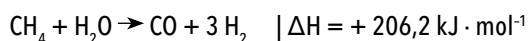
Es ist wichtig sich vor Augen zu halten, dass die Brennstoffzellentechnologie sich mit der Energiewandlung befasst. Unter ökologischen Aspekten ist es also auch wichtig, die genutzte Energiequelle zu betrachten: So ist es zum Beispiel wenig zielführend, mit Hilfe von durch Verbrennung von Kohle erzeugtem Strom Wasser zu zerlegen, um den Wasserstoff anschließend wieder in Strom umzuwandeln.

ABBILDUNG 6-3-2

Aufbau einer Direkt-Methanol-Brennstoffzelle



Zurzeit wird Wasserstoff überwiegend als Nebenprodukt der petrochemischen Industrie bzw. durch die sogenannte Dampfreformierung von Methan gewonnen. Dabei werden Methan und Wasserdampf bei hohen Temperaturen (700 bis 1.100 °C) in Gegenwart eines Nickel-Katalysators in einer endothermen Reaktion zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgesetzt:



Um die Wasserstoffausbeute zu steigern, kann in einem nachgelagerten Reaktionsschritt das Kohlenstoffmonoxid in der leicht exothermen sogenannten Wassergas-Shift-Reaktion mit Wasser umgesetzt werden:



HINWEIS

Brennendes Eis: Es ist kalt, es sieht aus wie Eis, doch es brennt – Methanhydrat. Diese ungewöhnliche Kombination aus Methan und Wasser entsteht bei hohen Drücken und niedrigen Temperaturen in Permafrostböden* und in den Tiefen der Ozeane. Fachleute schätzen, dass der Energiegehalt der Methanhydratvorkommen in den Weltmeeren fünfmal so hoch ist wie der aller bekannten Kohle-, Erdöl- und Erdgasvorkommen zusammen. Noch ist die Erschließung dieser Ressourcen Zukunftsmusik, doch an der Nutzbarmachung dieser insbesondere in unterseeischen Kontinentalhängen gebundenen Gasmassen wird geforscht, auch in Deutschland.

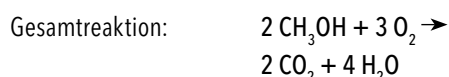
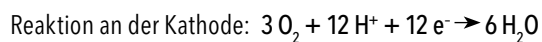
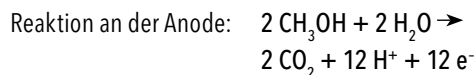
Doch was ist mit der CO₂-Bilanz? Denn schließlich wäre die energetische Nutzung dieses Methans mit einer weiteren Produktion des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid verbunden. Auch dafür haben die Wissenschaftler eine bestechende Idee: Gelänge es, das Methanhydrat durch Einpressen von Kohlenstoffdioxid in die Kontinentalhänge zu gewinnen, so ließen sich zwei Fliegen mit einer Klappe schlagen. Man könnte eine wertvolle Ressource erschließen und gleichzeitig die Freisetzung von Kohlenstoffdioxid unterbinden. Denn je nach Druck- und Temperaturverhältnissen ließen sich für jedes Methanmolekül drei bis fünf Kohlenstoffdioxidmoleküle speichern.

In Zukunft könnte sich die Gewinnung von Wasserstoff zum Betrieb von Brennstoffzellen auf ganz andere Quellen stützen als heute. Dabei möchte man sich die belebte Natur zunutze machen – entweder als Lieferant energiehaltiger Verbindungen oder aber als Ideengeber. Hierzu werden im Wesentlichen drei Ansätze verfolgt: Die Nutzung von Biomasse, zum Beispiel Stroh oder Holzabfällen, welche durch chemische und thermische Prozesse in ein wasserstoffhaltiges Gasgemisch umgesetzt werden. Eine andere Variante besteht darin, Algen gentechnisch gezielt so zu verändern, dass sie bei der Photosynthese Wasserstoff produzieren. Und schließlich wird daran geforscht, Photo-Katalysatoren zu entwickeln, welche die Energie des Sonnenlichtes direkt zur Spaltung von Wasser in seine Elemente nutzen.

Ein Problem bei der Nutzung von Brennstoffzellen besteht darin, dass der Energieträger Wasserstoff entweder unter hohem Druck oder tiefkalt verflüssigt (-253 °C) vorgehalten werden muss. Dies erfordert einen hohen technischen Aufwand bei Transport und Lagerung. Eine Alternative bieten Brennstoffzellen, die mit Energieträgern betrieben werden, welche bei Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck flüssig sind. Einen solchen Energieträger nutzt die Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (abgekürzt DMFC, von engl. "direct methanol fuel cell"). Sie funktioniert prinzipiell sehr ähnlich wie eine PEMFC und kann zwischen Zimmertemperatur und 200 °C eingesetzt werden. Nachteilig sind allerdings die Giftigkeit und Korrosivität des Methanols sowie der niedrigere elektrische Wirkungsgrad von 20 bis 30 Prozent. Ihre möglichen Anwendungsfelder sind zum Beispiel Elektroantriebe oder tragbare Stromversorger.



Die in einer DMFC ablaufenden chemischen Vorgänge lauten:



Ein Nachteil hierbei ist die mögliche Bildung von Carbonat aus dem bei der Reaktion entstehenden Kohlendioxid. Dieses setzt den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle deutlich herab.

Größere stationäre Brennstoffzellenanlagen finden bereits Anwendung zur Energieversorgung von Krankenhäusern und im kommunalen Bereich. Bei den hier installierten Leistungen im Bereich von mehreren 100 Kilowatt kommen nicht DMFCs, sondern Hochtemperaturbrennstoffzellen zum Einsatz, die als Elektrolyt Salzschnmelzen oder spezielle Oxidkeramiken enthalten. Sie arbeiten bei Temperaturen zwischen 620 und 1.000 °C und erreichen dabei Wirkungsgrade von bis zu 65 Prozent.

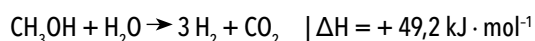
C Oberstufe

Brennstoffzelle: Visionen und technische Herausforderungen

Eine der großen Herausforderungen bei der Nutzung von Brennstoffzellen stellt die Technologie zur Speicherung des Wasserstoffs dar. Seine kritische Temperatur* liegt bei -240 °C, d. h. oberhalb dieser Temperatur kann Wasserstoff nicht mehr durch Druck verflüssigt werden (anders als etwa Ethan oder Propan, deren kritische Temperaturen bei 32,3 °C bzw. 96,7 °C liegen). Daher kommt er als Druckgas in Flaschen mit einem Fülldruck von 200 bzw. 300 bar in den Handel. Ausgehend von einem Fülldruck von 300 bar ergibt sich für eine Zehnliter-Flasche ein Energiegehalt von 32,4 Megajoule – dies entspricht etwa dem Energiegehalt von einem Liter iso-Octan (31 Megajoule). Hochdruckspeicher aus Carbon-Verbundmaterialien

ermöglichen bereits Speicherdrücke von 700 bar bei verhältnismäßig niedrigem Gewicht und werden in fortgeschrittenen Prototypen von Wasserstoff-Autos verschiedener Hersteller eingesetzt.

Eine andere Möglichkeit der Speicherung besteht darin, den Wasserstoff tiefkalt zu verflüssigen (Siedepunkt -252,87 °C), ein Liter hat dann einen Energiegehalt von 8,5 Megajoule (ein Liter Benzin hat einen Energiegehalt von 31,5 Megajoule). Allerdings sind sowohl die Verflüssigung als auch die Lagerung und der Transport bei solch extrem niedrigen Temperaturen sehr aufwändig. Zudem treten trotz der extrem guten Isolierung nach einigen Tagen Abdampfverluste auf, welche heute in der Größenordnung von täglich 0,4 Prozent des Tankvolumens liegen. Eine weitere Alternative besteht darin, Methanol zuzuführen und vor Ort den benötigten Wasserstoff mit Hilfe eines sogenannten Methanol-Reformers zu erzeugen:



Die Reaktion ist endotherm und erfolgt bei Drücken von etwa 20 bar und Temperaturen von 250 bis 280 °C. Der gebildete Wasserstoff wird mit Hilfe einer spezifisch nur für ihn durchlässigen Membran abgetrennt.

Viele Metalle, insbesondere der ersten bis dritten Hauptgruppe des PSE, haben eine hohe Affinität zu Wasserstoff, sie bilden Hydride. Dieses macht man sich in Wasserstoffhydridspeichern zunutze: Das entsprechende Metall liegt in feiner Verteilung, also mit einer hohen inneren Oberfläche vor. Wird es nun mit Wasserstoff in Kontakt gebracht, so löst sich dieser bereits bei geringem Überdruck in einer exothermen Reaktion. Um den Speicher zu entleeren, muss dieser nun wieder erwärmt werden. Metallhydridspeicher haben eine hohe Speicherkapazität pro Volumeneinheit – so enthält ein Liter Metallhydrid mehr Wasserstoffatome als ein Liter verflüssigter Wasserstoff. Auf das Gewicht bezogen ist die Speicherkapazität allerdings sehr gering und die bisherigen Speicher sind sehr teuer.

Eine interessante Alternative könnten in Zukunft sogenannte metallorganische Gerüste (engl. MOF = "metal organic framework") darstellen. Sie bestehen aus Metallatomen als Knotenpunkten sowie organischen Molekülen

als Verbindungselemente zwischen diesen Knotenpunkten und verfügen über eine große innere Oberfläche von mehr als 4.500 m²/g. Wasserstoff kann sich an dieser großen inneren Oberfläche anlagern. Die MOFs stellen vielversprechende Kandidaten für zukünftige Wasserstoffspeicher mit einer hohen gewichtsbezogenen Speicherkapazität dar.

Damit eine Brennstoffzelle funktioniert, muss unter anderem dafür gesorgt werden, dass zwischen Anodenraum und Kathodenraum kein innerer Kurzschluss auftritt. Bei einer Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (PEMFC) wird dies dadurch erreicht, dass man die beiden Halbzellen durch eine Membran mit ionenselektiver Permeabilität voneinander trennt: Die Durchlässigkeit für die positiven Ladungsträger, also die Protonen, von der Anode zur Kathode muss gewährleistet sein, während gleichzeitig die Durchlässigkeit für andere Spezies möglichst niedrig sein sollte. In der Praxis erreicht man dies, indem man die Membran aus einem Polymer herstellt, welches durch das Einbringen stark polarer Gruppen für Ionen leitfähig ist. Man spricht dann auch von einem Ionomer. Eines der ersten Ionomere war ein durch „Einbau“ von Sulfonsäuregruppen modifiziertes Polytetrafluorethen. Es ist für Anionen undurchlässig, zeigt aber Durchlässigkeit für Kationen.

Für den Einsatz in einer PEMFC benötigen solche Membranen noch eine weitere Komponente, und zwar eine katalytisch aktive Beschichtung. Diese kann beispielsweise aus einem Gemisch aus Kohlenstoff mit verschiedenen Metallen der Platingruppe, Nickel oder Cobalt bestehen. Diese Katalysatorschicht sorgt dafür, dass Wasserstoffmoleküle auf der Anodenseite dissoziieren und ihre Elektronen abgeben. Letztere fließen durch den äußeren Stromkreis und reduzieren auf der Kathodenseite unter Mitwirkung des Katalysators Sauerstoffmoleküle zu Oxidionen. Diese reagieren mit den durch die Membran gewanderten Oxoniumionen zu Wasser.

Die Erforschung dieser Vorgänge an solchen Katalysatoren ist entscheidend, um Leistungsfähigkeit, Effizienz und Langlebigkeit von Brennstoffzellen weiter zu optimieren. Deutsche Forscherinnen und Forscher sind hier an vorderster Front mit dabei: So erhielt Frau Dr. Christina Roth,

🔍 METHODISCHE ANMERKUNG

Membrantechnologie (CH-EX4)

Die Membran muss den Anoden- und Kathodenraum trennen und dabei den Schluss des Stromkreises ermöglichen. Die Schüler können die Wirksamkeit verschiedener „Alltagsmembranen“ wie Papier oder Stoff prüfen. Die Vorgänge in einer Brennstoffzelle erläutert die ANIMATION 6-3-1 auf der CD-ROM.

Juniorprofessorin an der Technischen Universität Darmstadt, im März 2010 den mit 50.000 Euro dotierten Adolf-Messer-Preis. Gemeinsam mit ihrem Team hat sie unter anderem eine Methode entwickelt, mit der sich die Wirkmechanismen von Katalysatoren im laufenden Betrieb verfolgen lassen – ein entscheidender Schritt für die Verbesserung von Brennstoffzellen.

Da Brennstoffzellen aus der Sicht der Thermodynamik keine Wärme-Kraft-Maschinen sind, gelten für sie nicht die Beschränkungen des Carnot-Wirkungsgrads. Der bisher höchste bei Brennstoffzellen realisierbare Wirkungsgrad liegt bei ca. 70 Prozent deutlich mehr als beispielsweise bei der Kombination Verbrennungsmotor-Generator. Doch im Umkehrschluss heißt das auch, dass 30 Prozent der Energie als Abwärme ungenutzt bleibt. Als zukunftsweisendes Konzept zur besseren Ausnutzung von Energieträgern gilt daher die Kraft-Wärme-Kopplung. Sie wird in Blockheizkraftwerken* (BHKW) eingesetzt, die Leistungen im mehrstelligen Megawattbereich aufweisen. Doch das Prinzip lässt sich auch herunterskalieren auf kleinere Anlagen zur Versorgung einzelner Gebäude bis hin zu Einfamilienhäusern. Hier spricht man auch von Mini- oder gar Mikro-BHKW. Zurzeit laufen zahlreiche Feldversuche mit Mini-BHKWs basierend auf Brennstoffzellentechnik. Ein solches derzeit in der Erprobung befindliches Modul hat zum Beispiel bei einer elektrischen Leistung von 1 Kilowatt und einer thermischen Leistung von 2 Kilowatt (plus maximal 20 Kilowatt Zusatzheizleistung) einen Gesamtwirkungsgrad von über 90 Prozent und wird mit gewöhnlichem Erdgas (Methan) betrieben.

6.4 Dämmmaterialien

Wärmedämmung in der Natur

Warum schützt das Fell oder Federkleid viele Tiere so gut vor Kälte? Zwischen den dichten Haaren beziehungsweise Federn wird die Luft – ein schlechter Wärmeleiter – gut festgehalten. Weil sie dort wenig Platz zum Strömen hat, geht über die Haut kaum Wärme verloren.

In der kalten Jahreszeit verstärken viele Tiere ihre „körpereigene Isolierung“ noch: Sie bilden zum Beispiel ein Winterfell, das noch mehr kleine Haare enthält als das Sommerkleid. Vögel bekommen zusätzliche Flaumfedern (Daunen), die nach dem Winter wieder ausfallen. Wenn Vögel frieren, können sie sich außerdem „aufplustern“. Dadurch bringen sie zusätzliche Luft unter ihr Federkleid und vergrößern so die Dicke der dämmenden Luftschicht.

Kleine luftgefüllte Hohlräume sind also ideal für gute Wärmedämmung. Deshalb wendet auch der Mensch diesen Trick bei vielen Dämmstoffen an, beispielsweise um sein Haus vor Wärmeverlusten zu schützen.




Wärmedämmung in der Technik

Als Dämmstoffe bezeichnet man alle Materialien mit wärme- und/oder schalldämmenden Eigenschaften. Es gibt eine Vielzahl natürlicher und synthetischer Dämmstoffe mit unterschiedlich guten Eigenschaften. Wichtig für die Bewertung ihrer Qualität sind zum Beispiel:

- Wärmeleitwert
- Wärmespeicherfähigkeit
- Brandverhalten (Brandschutz)
- Schalldämmung
- Zugfestigkeit
- Druckfestigkeit
- Baubiologische Eignung (z. B. Vermeidung von Schimmel)

Wie anhand der Wärmedämmung in der Natur bereits deutlich geworden ist, sind kleine Hohlräume mit minimaler Luftzirkulation die Ursache für die Dämmwirkung. Dämmstoffe müssen folglich über eine poröse oder gewebeartige Struktur verfügen. Die Dämmstoffe auf der nebenstehenden Seite sind besonders geläufig.

 ABBILDUNG 6-4-1

Wärmedämmung in Natur und Technik



METHODISCHE ANMERKUNG

Wettbewerb zur Wärmedämmung mit verschiedenen Materialien (PHY-EX10)

Siehe Anleitung.

Den klassischen Dämmstoffen aus Mineralien oder natürlich vorkommenden Polymeren (etwa Keratin in Wolle oder Zellulose im Holz) stehen die synthetisch hergestellten Dämmstoffe aus organischen Polymeren gegenüber.

Polystyrol wird durch katalysatorvermittelte Polymerisation von monomerem Styrol synthetisiert. Polystyrol-Hartschaum hat sich als hoch leistungsfähiges Dämmmaterial für alle Arten von Verpackungen industriell etabliert. Seine Einsatzbreite reicht von der Gebäudedämmung bis hin zur Lebensmittelverpackung. Als Partikelschaum, also mit körniger Struktur, kennt man ihn beispielsweise unter dem Markennamen Styropor. Im Herstellungsprozess wird das Polystyrolgranulat auf 90 °C erhitzt. Dadurch verkleben die Partikel miteinander und es kommt durch die Ausdehnung des Treibmittels (Pentan) zur Aufschäumung. Polystyrol-Hartschaum besitzt mit 0,03 W/(m² · K) eine sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit.

Polyurethanschaum ist als Kern in sandwichartig aufgebauten Dämmplatten zwischen zwei Deckschichten aus Dachpappe oder Aluminiumfolie besonders für die Isolierung von Wänden, Dächern, Fußböden oder Decken geeignet. Das Material kann auch als Sprühschaum auf Flachdächer oder Fassaden angebracht werden.

Durch seine extrem niedrige Wärmeleitfähigkeit (0,02 bis 0,03 W/(m² · K)) liefert Polyurethan in viel leichteren und dünneren Platten dieselbe Isolierwirkung wie wesentlich dickere Elemente beispielsweise aus Steinwolle oder Polystyrol. Möglich wird dies durch einen speziellen Schaumstabilisator. Er sorgt für eine optimale Durchmischung der beiden Ausgangsstoffe (Polyole und Polyisocyanate) und bewirkt beim Aufschäumen die Entstehung mikroskopisch kleiner Bläschen, aus denen sich später die Zellen bilden. Je kleiner die Zellen, desto besser die Isolierwirkung. Auch die gleichmäßige Struktur (ohne Löcher und harte oder weiche Stellen), die Druckfestigkeit und die Strapazierfähigkeit bei Hitze und Kälte sind Eigenschaften, die entscheidend vom Stabilisator bestimmt werden. Er bewirkt u. a. eine möglichst gute Emulgierung (Vermischung) der Stoffe, aus denen der Schaum hergestellt wird.

TABELLE 6-4-1

Gängige Dämmstoffe, ihre Rohstoffe und Herstellung

Dämmstoff	Herstellung
Polyurethanschaum 0,02–0,03 W/(m ² · K)	Gleichmäßige Durchmischung von Polyolen und Polyisocyanaten während der Polyadditionsreaktion zu Polyurethan unter Zuhilfenahme eines speziellen Schaumstabilisators führt zu gleichmäßigen Porenstrukturen.
Polystyrol-Hartschaum 0,03 W/(m ² · K)	Katalysatorvermittelte Polymerisation von monomerem Styrol zu Polystyrol und Verarbeitung zu Granulat, Erhitzen des Granulats bei 90 °C in Gegenwart des Treibmittels Pentan zur Verklebung des Granulats und Aufschäumung.
Mineralwolle (Stein-, Glaswolle) 0,035 W/(m ² · K)	Schmelzen und Zerfasern mineralischen Gesteins (z. B. Spat, Dolomit, Basalt) mit Zusätzen zum Beispiel von Koks und Bindemitteln bzw. von Altglas mit Beimischungen von zum Beispiel Sand, Kalkstein und Soda.
Zellulose 0,045 W/(m ² · K)	Zerfasern von Altpapier (Lignozellulosen aus Holz)
Blähperlit 0,05–0,1 W/(m ² · K)	Mahlen von vulkanischem Gestein (Perlit) und Erhitzen auf 1.000 °C, Expansion des im Gestein gebundenen Wassers auf zwanzigfaches Volumen unter Dampfentwicklung.

Schemazeichnung eines Niedrigenergiehauses



C Oberstufe

Innovative Wärmeisolierung bei Verglasungen

Tricks für gute Dämmung: W rmeschutzfenster

 ber veraltete Fenster geht ein großer Teil der Wärme aus dem Haus verloren. Um den Wärmeverlust rechnerisch zu beschreiben, wird der sogenannte U-Wert herangezogen. Seine Maßeinheit des internationalen Einheitensystems ist Watt pro Quadratmeter und Kelvin $W/(m^2 \cdot K)$. Bezogen auf das Fenster gibt er die Wärmeenergie-Menge in Joule (= Wattsekunden) an, die im Zeitraum von einer Sekunde über eine Fläche von einem Quadratmeter durch das Glas hindurch gelassen wird, wenn sich die Temperaturen auf beiden Seiten des Glases um 1 Kelvin (= 1  C) unterscheiden. Je kleiner der U-Wert, desto besser die Isoliereigenschaften des Fensters. In der Bautechnik wird der U-Wert aber auch zur Beschreibung anderer Bauteile, wie etwa Wände, herangezogen.

Ein Beispiel: Der jährliche Wärmeverlust durch ein 1 m² großes Fenster mit Einfach-Glasscheibe (U-Wert: 5,5) erfordert ungefähr den Energieaufwand von 60 Litern Heizöl. Moderne Isolierglasfenster helfen deutlich beim Energiesparen (U-Wert: 0,65).

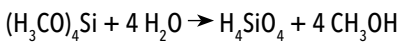
Sie bestehen aus zwei oder drei Glasscheiben. Die Zwischenräume sind mit „W rmeschutzgas“ (meist Argon, Krypton, selten auch Xenon) gef llt. Allerdings darf der Zwischenraum nicht so groß sein, dass über die Konvektion des Füllgases Wärme verloren gehen kann. Die einatomigen Edelgase Argon, Krypton und Xenon besitzen eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Luft. Bei Xenon beispielsweise ist diese fünfmal geringer. Darüber hinaus zeichnen sie sich durch weitere positive Eigenschaften für die Anwendung als Isoliergas aus: Sie diffundieren nicht über das Dichtungssystem der Scheibe aus dem Zwischenraum heraus, sind chemisch inert und greifen das umgebende Material nicht an. Sie entfalten keine Giftwirkungen und sind nicht schädlich für die Umwelt. Hinzu kommt ihre gute Verfügbarkeit (sie fallen beim Verfahren der Luftverflüssigung an). Zusätzliche W rmschutzwirkung entsteht durch die spezielle Behandlung der Gläser. Eine Dotierung mit Fe²⁺-Ionen durch Beimischen von Eisenoxid zur Glasschmelze bewirkt ein gutes Absorptions- und Reflexionsverhalten im infraroten Spektralbereich. Auch das Aufdampfen dünner Kupfer- oder Siliciumdioxidschichten dient diesem Zweck.

Fast so leicht wie Luft: Aerogele

Aerogele sind ganz besondere Isoliermaterialien. Sie können aus Metalloxiden oder verschiedenen Polymeren hergestellt werden, sind hart, dabei aber sehr leicht und nahezu lichtdurchlässig.

Der Blick in ihre Feinstruktur offenbart dreidimensionale Netzwerke aus Polymerketten, zwischen denen sich Hohlräume von wenigen Milliardstel Meter (Nanometer) Durchmesser auftun. Gemessen am Volumen des verwendeten Polymers überwiegt der Anteil der Hohlräume bei weitem.

So bestehen etwa die häufig verwendeten Silikat-Aerogele zu über 95 Prozent aus Luft. Ihre Herstellung kann zum Beispiel nach dem sogenannten Kistler-Verfahren durch katalysatorvermittelte Hydrolyse von Tetramethoxysilan zu Orthokieselsäure und Methanol erfolgen:

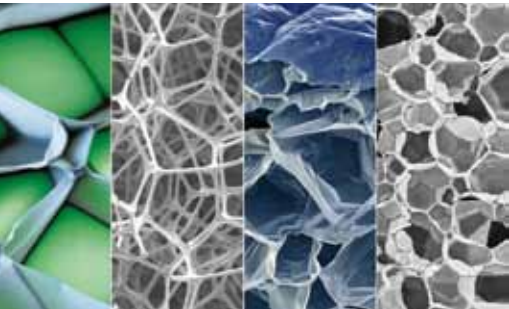


Dabei entstehen Silikat-Tetraeder, die zu einem dreidimensionalen Netzwerk mit methanolgefüllten Poren, dem Alkogel, aggregieren. Anschließend wird das Methanol bei 249 °C und 80,9 bar dem Gel entzogen und im Trocknungsprozess durch Luft ersetzt.


In den luftgefüllten Hohlräumen in Größenordnungen zwischen 10 und 100 Nanometer liegt das Geheimnis der besonderen Isoliereigenschaften von Aerogelen. Die Beweglichkeit der Luftmoleküle ist in den kleinen Poren stark eingeschränkt, was die Ausbreitung von Schall und Wärme gleichermaßen stark hemmt. Aus diesem Grund werden Silikat-Aerogele in Granulatform für Spezialanwendungen als Füllmaterial zwischen Doppelverglasungen, zum Beispiel für Anwendungen in der Hochhausarchitektur, kommerziell angeboten.

ABBILDUNG 6-4-3

Struktur eines Melaminharz-Dämmstoffs und eines Silicat-Aerogels



Melaminharz



Silicat-Aerogel

Melaminharz Synthese:

Melamin (Nc1nc(N)c(N)n1) reacts with 6 molecules of formaldehyde (HCHO) to form a cross-linked network with hydroxymethyl groups (HOCH2).

At $> 100^\circ C$ with loss of H_2O , the network cross-links to form a thermosetting resin.

Further treatment with HCl leads to a fully cross-linked structure.

Silicat-Aerogel Struktur:

The structure is a 3D network of silicate tetrahedra. Pore sizes are indicated as 1-2 nm (pore diameter) and 20-40 nm (pore length).

$(H_3CO)_4Si + 4 H_2O \rightarrow H_4SiO_4 + 4 CH_3OH$



A Basis

7.1 Mobile Kommunikation und Unterhaltung

Hightech für unterwegs

Das weltweit erste tragbare Mobiltelefon kam 1986 auf den Markt. Es wog knapp acht Kilogramm, hatte eine Stand-by-Zeit von acht Stunden und kostete gute 4.000 US-Dollar. Bis 1992 wurden die Geräte schon erheblich kleiner und verdienten die deutsch-englische Bezeichnung „Handy“.


Im Vergleich dazu wog im Jahr 2010 ein modernes Smartphone als komplettes kleines „Multimedia-Center“ um die 100 Gramm und hatte eine Stand-by-Dauer von mehreren 100 Stunden.

Dieser technische Fortschritt ist der rasanten Verkleinerung und Leistungssteigerung der Energiespeicher (und Anwendung neuer Materialien und Technologien für weitere elektronische Bauteile) zu verdanken.

B Mittelstufe

Praktische Elektrochemie für zuhause und unterwegs

Batterien und Akkus umgeben uns nahezu überall. Wie bereits in Abschnitt 4.B dargestellt, handelt es sich bei ihnen um galvanische Elemente. Die in ihnen ablaufenden Redoxreaktionen lassen sich systematisch in der elektrochemischen Spannungsreihe der Elemente darstellen. Für Metalle ergibt sich diese Spannungsreihe, wenn man diese nach ihrem Bestreben anordnet, bei Kontakt mit einer wässrigen Lösung durch Elektronenabgabe positiv geladene Ionen zu bilden (Oxidationsbestreben).

 ABBILDUNG 7-1-1

Mobile Kommunikation und Unterhaltung



ABBILDUNG 7-1-2

Spannungsreihe der Metalle

Element		Normalpotenzial
Gold	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3 \text{e}^-$	+1,45 Volt
Silber	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	+0,80 Volt
Kupfer	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^-$	+0,34 Volt
Wasserstoff	$\text{H}_2 \rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$	0 Volt
Blei	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,125 Volt
Eisen	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,44 Volt
Zink	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-0,76 Volt
Aluminium	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3 \text{e}^-$	-1,68 Volt
Magnesium	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2 \text{e}^-$	-2,40 Volt

METHODISCHE ANMERKUNG

Volta-Element – Die Idee des Herrn Volta (CH-EX5)

Durch den Bau einer Volta'schen Säule lernen die Schüler wesentliche Teile einer galvanischen Zelle kennen. Der säulenartige Aufbau verdeutlicht die Funktion der Komponenten, außerdem sind Variationen wie eine Vergrößerung des Plattenquerschnitts, der Zahl der „Schichten“ sowie der Konzentration des Elektrolyten möglich. Solche Variationen können helfen, die Funktionsweise galvanischer Elemente zu verstehen.

In den Spannungsquellen laufen Redoxreaktionen ab, deren Ursachen in der elektrochemischen Spannungsreihe liegen. Jedes Metall verdrängt in der Reihe jeweils Metalle höheren Potenzials aus den Lösungen ihrer Salze, d. h. es wirkt gegenüber den Ionen dieser Metalle als Reduktionsmittel. Umgekehrt wirken Metall-Ionen gegenüber allen Metallen mit geringerem Normalpotenzial als Oxidationsmittel.

Beispiel: $\text{Zn} + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + \text{Cu}$

Die Kombination aus einem Metall und seinem korrespondierenden Ion wird als Redoxpaar bezeichnet. Doch natürlich existieren auch zahlreiche Redoxpaare, an denen kein Metall beteiligt ist. So bilden elementares Iod und Iodid ebenfalls ein Redoxpaar, welches in der üblichen Kurzschreibweise als I_2/I^- dargestellt wird. Ein sehr wichtiges Redoxpaar wird durch den elementaren Wasser-

stoff und das Wasserstoff-Ion (Proton) gebildet, denn es dient konventionsgemäß als Nullpunkt der Spannungsreihe: Alle Metalle, die ein negatives Standardpotenzial aufweisen, verdrängen den Wasserstoff aus verdünnten Säuren und wirken gegenüber den Wasserstoff-Ionen (Protonen) als Reduktionsmittel.

Beispiel: $\text{Mg} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{H}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$

Welche Spannung an einem galvanischen Element mit zwei definierten Redoxpaaren vorliegt, kann man durch Differenzbildung aus der elektrochemischen Spannungsreihe der Elemente ablesen (siehe Arbeitsblatt CH-EX5).

Die Zink-Braunstein-Batterie

Die elektrochemischen Vorgänge in einer Batterie kann man gut am Beispiel der Zink-Braunstein-Batterie (unpräzise auch als Zink-Kohle-Batterie bezeichnet) erklären, die wir schon kurz in Abschnitt 4.B kennen gelernt haben. Im Wesentlichen besteht dieses galvanische Element aus einem Zinkbecher, der mit einer eingedickten, 20-prozentigen Ammoniumchloridlösung (NH_4Cl), Kohlenstoff zur Verbesserung der Leitfähigkeit und Mangandioxid („Braunstein“, MnO_2) gefüllt ist. In der zähen Masse steckt als Elektrode ein Graphitstift. Der Zinkbecher fungiert als Minuspol, das Braunsteinpulver als Pluspol. Die Spannung einer frischen Zink-Braunstein-Zelle beträgt 1,5 V.

Wenn man das Gehäuse einer solche stark gebrauchten Zelle öffnet erkennt man, dass der Zinkbecher zerfressen ist. Offenbar löst sich das Zink auf, wenn die Batterie Strom liefert. (Für die chemischen Vorgänge in der Batterie siehe ABBILDUNG 4-2)

METHODISCHE ANMERKUNG

Elektrolyse einer Zinkbromidlösung an Kohlelektroden und deren Umkehrung (CH-EX6)

Bei der Elektrolyse entstehen zwei deutlich sichtbare Produkte, die Schüler können das „Laden“ der Batterie beobachten. Die Rückreaktion beim Entladen ist über die nachlassende Färbung in der Bromid-/Brom-Halbzelle beobachtbar. Der Versuch verbindet die Themen „Elektrolyse“, „galvanische Zelle“ sowie „Batterien und Akkumulatoren“.

METHODISCHE ANMERKUNG

Wie ist eine Taschenlampenbatterie aufgebaut? (CH-EX7)

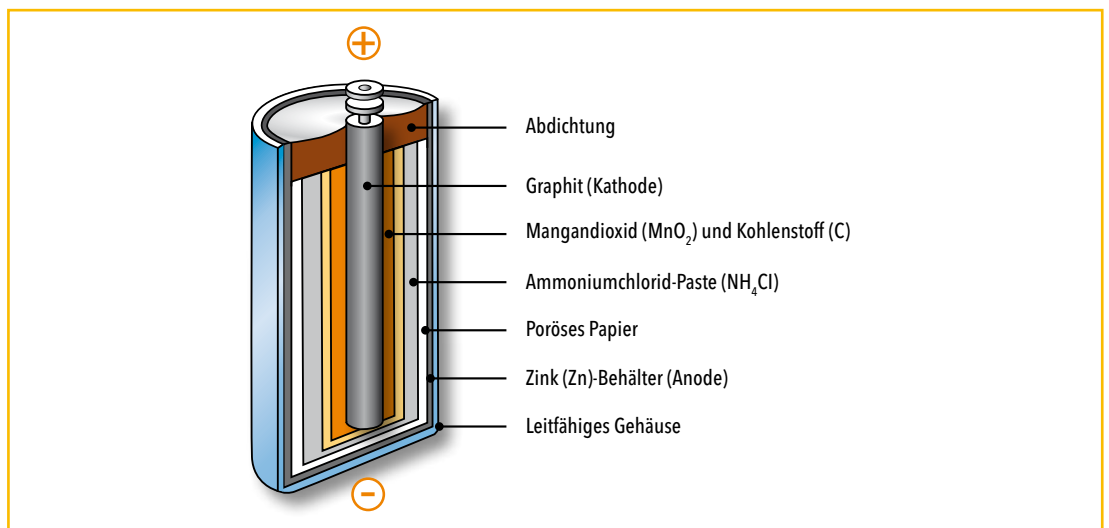
Mit einigen Sicherheitsvorkehrungen ist es möglich eine Batterie zu öffnen, um ihren Aufbau zu studieren. Je nach Kenntnisstand der Schüler sind diese in der Lage, die Funktion der einzelnen Teile herzuleiten. Dazu ist es unter Umständen instruktiv, eine neue und eine entladene Batterie zu öffnen und zu vergleichen.

Modell einer Taschenlampenbatterie (CH-EX7)

Alternativ oder ergänzend zur Öffnung einer Batterie kann anhand der ABBILDUNG 7-1-3 eine Batterie selbst gebaut werden. Dabei sollten keine allzu strengen Vorgaben hinsichtlich der zu verwendenden Materialien gemacht werden, um verschiedene Bauweisen zu realisieren und deren Vor- und Nachteile zu diskutieren.

ABBILDUNG 7-1-3

Aufbau einer „Zink-Kohle-Batterie“



Der „Blei-Akku“

Das bekannteste Beispiel für ein Sekundärelement, also eine wiederaufladbare Batterie, ist der Blei-Akkumulator. Die seiner Funktion zugrunde liegenden Redoxpaare sind Pb/Pb^{2+} und $\text{Pb}^{2+}/\text{Pb}^{4+}$, als Elektrolyt kommt verdünnte Schwefelsäure zum Einsatz (Reaktionsgleichungen an Anode und Kathode siehe ABBILDUNG 4-2). Blei-Akkumulatoren gestatten kurzzeitig hohe Entladestromstärken, weshalb sie als Starterbatterien in Pkw weit verbreitet sind. Sie sind preisgünstig und relativ langlebig, ihre elektrische Kapazität ist mit 0,03 Kilowattstunden pro Kilogramm jedoch recht gering (in einem kg Autobatterie „steckt“ also nur soviel Energie wie in ca. sieben g Zucker). Blei-Akkumulatoren, zum Beispiel Autobatterien, altern heute relativ langsam. Trotzdem gilt es, einige Faktoren

METHODISCHE ANMERKUNG

Blei-Akku – Wieder verwenden statt wegwerfen (CH-EX8)

Die Bedeutung von Blei-Akkumulatoren vor allem als Starterbatterie für Autos macht diese Art der Akkumulatoren so wichtig. Experimentell lernen die Schüler den prinzipiellen Aufbau des Blei-Akkumulators kennen und erarbeiten die ablaufenden Reaktionen. In diesem Zusammenhang können besondere Aspekte beim Betrieb des Akkus (z. B. Änderung der Dichte des Elektrolyten, Bedeutung der Schwerlöslichkeit von Blei(II) sulfat) besprochen und einige seiner Eigenschaften (z. B. Abhängigkeit der Leistung von der Temperatur) experimentell nachgestellt und erläutert werden.

zu beachten, um die Lebensdauer nicht zu verkürzen. So ist es nicht empfehlenswert, teilgeladene Autobatterien längere Zeit unbenutzt zu lassen. Dann bilden sich große Bleisulfatkristalle (man spricht auch von „grober Sulfatierung“), die beim Wiederaufladen nicht mehr in Blei und Bleidioxid umgewandelt werden können. Die möglichen Folgen: ein starker Kapazitätsverlust bis hin zur totalen Unbrauchbarkeit.

Zudem sollte eine Autobatterie immer mit der optimalen Ladespannung versorgt werden, die für eine Batterie mit nominell 12 Volt zwischen 13,8 und 14,4 Volt liegt. Bei einer höheren Spannung kommt es zur Elektrolyse des in der Batteriesäure enthaltenen Wassers (so genanntes „Gasen“). Die Folge ist ein Sinken des Flüssigkeitsspiegels und schließlich ein teilweises Trockenfallen von Elektroden. Diese Elektrodenbereiche werden irreversibel geschädigt und die Kapazität der Batterie nimmt ab. Bei einer zu niedrigen Ladespannung hingegen wird die Batterie nie richtig vollgeladen, so dass eine geringere Kapazität zur Verfügung steht und die Batterie schneller altert. Für eine möglichst präzise Regulierung der Ladespannung sorgen heutzutage elektronische Laderegler.

Besonders beliebt sind sogenannte wartungsfreie Autobatterien, deren Zellen nicht mehr ohne weiteres zugänglich sind. Bei älteren Typen konnte man den Ladezustand durch Dichtemessung („Spindeln“) der Batteriesäure ermitteln: Da Schwefelsäure eine höhere Dichte als Wasser hat und beim Ladevorgang Sulfationen und Protonen aus der Batteriesäure entfernt werden, hat diese bei einer geladenen Batterie eine niedrigere Dichte als bei einer ungeladenen.

⬡ METHODISCHE ANMERKUNG

Recycling von Akkuschrott (CH-EX9)

Blei ist giftig und umweltgefährlich, so dass nahe liegt, dass Akkuschrott fachgerecht entsorgt werden muss. „Entsorgen“ heißt in diesem Falle, das Blei aus dem Schrott abzutrennen. Je nach Kenntnisstand der Schüler kann man sie hier eigene Ideen sammeln und diese dann vor allem vor dem Hintergrund der relativen Unlöslichkeit von Blei(II)sulfat diskutieren lassen.

⬡ ABBILDUNG 7-1-4

Verschiedene Batterien und Akkus



Hightech, nicht nur im Handy: Leistungswunder Lithium-Ionen-Akku

Viele mobile Endgeräte wie beispielsweise Mobiltelefone oder Netbooks werden heute von Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit hoher Leistungsdichte gespeist, die eine Betriebsdauer von mehr als 16 Stunden gewährleisten. Die Leistungsdichte eines Energieträgers gibt an, wie viel Leistung (gemessen in Watt) man pro Gewicht oder Volumen der Zelle entnehmen kann. Die pro Volumen oder Gewicht gespeicherte Energie E wird als Energiedichte bezeichnet und wird entsprechend in $J \cdot m^{-3}$ bzw. $J \cdot kg^{-1}$ oder davon abgeleiteten Einheiten angegeben. Ein weiterer Vorteil der Lithium-Ionen-Akkus ist, dass sie anders als andere Akkumulatoren, keinen Memory-Effekt aufweisen. Dieser Effekt wurde bei NiCd-Akkumulatoren bereits in den 1960er Jahren von der amerikanischen Raumfahrtbehörde NASA an Satelliten beobachtet: Ein Gerät stellt mit der Zeit statt der ursprünglichen nur noch die bei den bisherigen Entladevorgängen benötigte Energiemenge zur Verfügung – verliert also an nutzbarer Kapazität. Dieses Phänomen lässt sich u. a. auf das Wachstum von Cadmiumkristallen in der Zelle zurückführen: Je größer diese sind, desto geringer wird das Oberflächen-Volumen-Verhältnis und desto schlechter lässt sich der Akku entladen.

Wie sieht das Innenleben eines Lithium-Ionen-Akkus aus? Das Material der negativen Elektrode besteht aus Graphit, während die positive Elektrode meist Lithium-Metalloxide wie $LiCoO_2$ (Lithiumcobaltdioxid), $LiNiO_2$ (Lithiumnickeloxid) oder $LiMn_2O_4$ (Lithiummanganoxid) enthält. Der Elektrolyt ist praktisch wasserfrei und besteht aus Lithiumsalzen (z. B. $LiPF_6$), die in aprotischen polaren Lösemitteln wie Ethylencarbonat, Propylencarbonat, Dimethylcarbonat, Diethylcarbonat oder 1,2-Dimethoxyethan gelöst sind. Diese Flüssigkeiten lösen durch ihre polaren Eigenschaften Ionenverbindungen sehr gut, spalten aber – anders als Wasser – keine Protonen ab (aprotisch). Beide Elektroden sind durch eine poröse Membran (Separator) getrennt, welche die Diffusion von Lithium-Ionen ermöglicht. Lithium-Ionen-Akkus sollte man auf keinen Fall öffnen, da die Reaktion mit Wasser aus der Luft sehr heftig erfolgen kann.

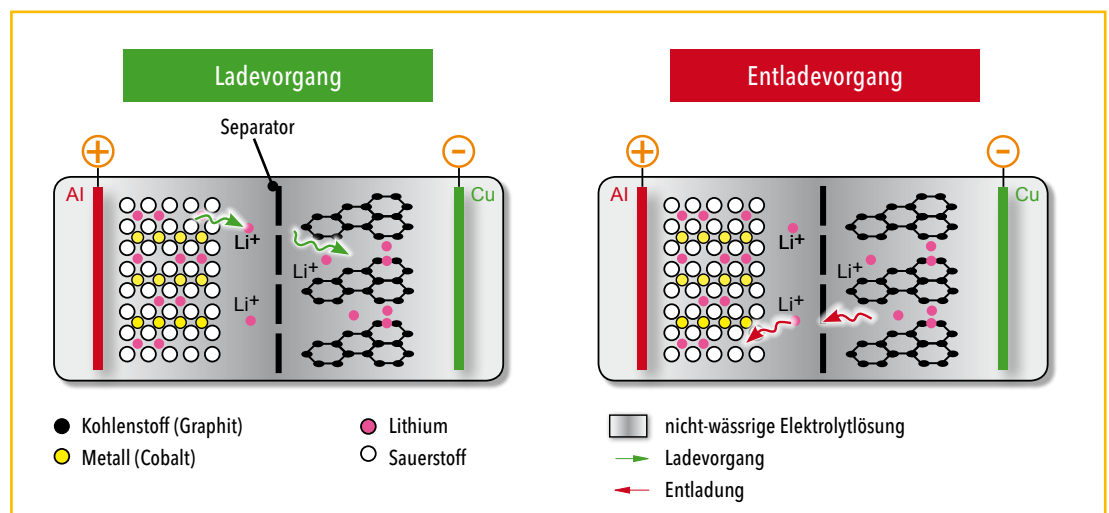
METHODISCHE ANMERKUNG

Leistungswunder Lithium-Ionen-Batterie (CH-EX10)

Chemisch interessant ist hier der Einfluss der chemischen Umgebung eines Teilchens. Alternativ kann man experimentell die Abhängigkeit des Potentials eines $[ML_n]^{z+}/M$ -Redoxpaares von der Art der Liganden L untersuchen. Siehe auch ANIMATION 7-1-1 auf der CD-ROM.

ABBILDUNG 7-1-5

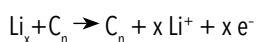
Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkus



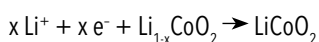


Lithium kann sich zwischen den einzelnen Schichten des Elektrodenmaterials Graphit einlagern, ohne dass dessen Struktur dabei wesentlich verändert wird. Dieser Prozess wird auch als Interkalation bezeichnet (von lat. *intercalare*, einschieben). Für die Funktion der Batterie ist es unerlässlich, dass sich auf der negativen Elektrode eine Deckschicht ausbildet. Diese ist für die kleinen Lithium-Kationen durchlässig, nicht jedoch für die größeren Lösungsmittelmoleküle. Ist diese Deckschicht nicht ausreichend oder beschädigt, können Li^+ -Ionen zusammen mit Lösungsmittelmolekülen interkalieren, wodurch die Graphitelektrode zerstört wird. Die Quellspannung wird nun ausschließlich durch Verschiebung von Lithium-Ionen gemäß der folgenden Gleichungen aufgebaut (da in Interkalationsverbindungen* das stöchiometrische Verhältnis zwischen den Reaktanden nicht ganzzahlig sein muss, weichen diese Gleichungen von der uns bekannten Form ab ($0 < n < 1$)).

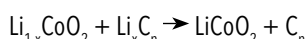
Negative Elektrode (Entladung):



Positive Elektrode (Entladung):



Redoxgleichung (Entladung):



Früher bestand bei Lithium-Ionen-Akkus die Separator-membran aus Kunststoffen. Bei unsachgemäßer Handhabung, beispielsweise durch Überladung, bedeutete dies oft Brandgefahr. Um diese zu beseitigen, hat ein deutsches Unternehmen die Polymere Membran mit einer Schicht aus Keramik-Nanomaterialien versehen, die auf die Membran aufgesintert werden. Die keramische Zusammensetzung der Membran macht sie hitzebeständig bis zu 700 °C.

ABBILDUNG 7-1-6

B-Netz Funktelefon und modernes Mobiltelefon



Moderne Elektronik – viele Bauteile helfen Energiesparen
 Hochleistung bei elektronischen Geräten ist „Teamsache“, bei der nicht nur der Akku entscheidet, sondern auch der geringe Stromverbrauch anderer Komponenten, wie zum Beispiel Touchdisplays. Hier werden an ultradünnen Halbleiterschichten aus Indiumzinnoxid minimale Ströme benötigt, um den Druck eines Fingers oder Plastikstifts auf dem Display zu messen.

METHODISCHE ANMERKUNG

Nickel-Metallhydrid-Akku (CH-EX11)

Chemisch ist am Nickel-Metallhydrid-Akku vor allem das Auftreten des Hydrids interessant, wodurch der Blick der Schüler, die Wasserstoff ansonsten hauptsächlich elementar oder in Form des Protons wahrnehmen, deutlich ausgeweitet werden kann.



A Basis

7.2 Energiesparen durch Leichtbau

Leichter = sparsamer

Ob bei Autos oder Flugzeugen: Seit dem Beginn ihrer Massenproduktion haben sich die verwendeten Materialien stark verändert. Immer weiter ging der Trend hin zu leichteren, aber mindestens ebenso stabilen und sicheren Werkstoffen. Bestanden früher Karosserien noch aus Stahl und später aus Aluminium, so finden sich heute in vielen Fällen Verbundwerkstoffe mit Hochleistungseigenschaften. Leichtere Fahrzeuge benötigen geringere Motorleistungen. Das bedeutet: geringerer Benzinverbrauch und weniger Umweltbelastungen.

Benzin pro 100 km. Dementsprechend verringert sich die Kohlenstoffdioxidemission um etwa 10 g pro km (wobei hier die gesamte Treibstofflieferkette berücksichtigt ist). Ein durchschnittlicher Pkw verbraucht bei 200.000 Kilometern Lebensdauer durch Leichtbau 700 Liter weniger Treibstoff. Fahrzeuge wie Busse oder Taxen, die im Durchschnitt größere Strecken fahren als ein Pkw, können in ihrem „Produktleben“ sogar mehr als 2.500 Liter einsparen. Im Sinne des Klimaschutzes wird besonders darauf geachtet, dass die Verringerung des CO₂-Ausstoßes bei der Nutzung eines Materials weit größer ist als die CO₂-Emissionen bei dessen Herstellung. Man spricht dann von einer positiven CO₂-Bilanz.

⬡ METHODISCHE ANMERKUNG

Modellrechnung zur Kraftstoffeinsparung (PHY-AB5)

Hier geht es um Ersparnisse im Spritverbrauch bei Pkw, wenn nicht der Wagen, sondern die Insassen leichter werden.

B Mittelstufe

Neue Werkstoffe schützen nicht nur das Klima

Nach Studien des IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) bewirkt eine Gewichtserparnis von 100 Kilogramm im Pkw durch Leichtbaumaterialien eine durchschnittliche Einsparung von 0,35 L

Verbundwerkstoffe

Treibstoffersparnis dank neuer Materialien – dabei dürfen die Werkstoffe zwar leichter werden, sollen aber eben-

⬡ ABBILDUNG 7-2-1

Drei Generationen: Materialien in Automobilbau & Luftfahrt



so belastbar bleiben oder sogar noch mehr aushalten als vorher. Oft wünscht man sich auch eine höhere Temperatur- oder Chemikalienbeständigkeit. Diesen Schritt ermöglichen die sogenannten Verbundwerkstoffe oder auch „Komposite“. Wie der Name schon sagt, liegen in ihnen zwei oder mehr Materialien im strukturellen Verbund miteinander vor.

Die Eigenschaften der verschiedenen Materialien bleiben dabei erhalten und ergänzen sich im neuen Werkstoff. Dessen Charakteristika werden durch die stofflichen Eigenschaften und die Geometrie der Komponenten und die ihrer Grenzflächen zueinander bestimmt. Enthält also ein Komposit beispielsweise Fasern, dann sind die Beschaffenheit der Fasern und ihre Ausrichtung zueinander bestimmend für die Eigenschaften des Verbundwerkstoffs.

Man unterscheidet vier Arten von Kompositen:

- **Teilchenverbundwerkstoffe** (z. B. Ruß in Autoreifen)
- **Faserverbundwerkstoffe** (z. B. Stahlbeton)
- **Schichtverbundwerkstoffe** oder auch Lamine (z. B. Bimetallstreifen)
- **Durchdringungswerkstoffe** (z. B. Keramikschaum mit infiltrierter Metallschmelze)

Verbundwerkstoffe sind die „Stars“ unter den industriellen Anwendungen im Leichtbau. Nach dem oben beschriebenen Prinzip lassen sich beispielsweise Kunststoffe mit Kohlefasern (sog. CFK = Carbon-Faser-Komposite), Kohlen-

stoff-Nanoröhren oder Glasfasern (sog. GFK = Glas-Faser-Komposite) mischen: Weiterhin können Polymere mit metallischen Hohlkugeln zu neuen Materialien vermischt werden.

Diese Verbundwerkstoffe bewirken:

- Gewichtseinsparungen zwischen 50 und 75 Prozent
- Höhere Druck- und Zugfestigkeit bei Aufprall und Verformung
- Höhere Stabilität bei minimaler Biegung
- Möglichkeiten, zum Beispiel faserförmige Funktionselemente, etwa winzige Aufprallsensoren, für Pkw in das Bauteil zu integrieren. Unsichtbare Beschädigungen können so leichter erkannt werden.

Neue Materialien sparen Energie in der Produktion

Weil in der Fahrzeug-, Luftfahrt- und Raumfahrtindustrie zunehmend Polymerwerkstoffe untereinander oder mit Metallen verbunden werden müssen, tritt das Schweißen immer mehr in den Hintergrund und wird durch Klebprozesse abgelöst. Punktgenaues Heißkleben statt Schweißen senkt dabei den Energieaufwand und unerwünschte Wärmeeinwirkung auf die Bauteile.

Weiterhin arbeitet man daran, durch neue ultradünne Beschichtungen aus Keramik oder diamantähnlichem Kohlenstoff (engl. DLC = „diamond-like carbon“) die Reibungswärmeverluste an Getriebeteilen von Maschinen und Motoren zu verringern. Dies trägt zu weniger Energieverlust im Produktionsprozess bei.

ABBILDUNG 7-2-2

Metallschäume und Sandwichstrukturen



Clevere Ideen, neue Materialien

Verbundwerkstoffe

In Verbundwerkstoffen wie den Kunststoffen mit Kohlefasern (CFKs) sind parallele Stränge von stabilen Fasern in eine Polymermatrix eingebunden und geben einem Werkstück so die gewünschten Eigenschaften. Doch wie kommen diese Fasern in der gewünschten Anordnung dort hinein? Dies lässt sich anhand der Herstellung technischer Textilien verdeutlichen. Man kann eine Kunststoff- und eine Kohlefaser miteinander zu einem Garn verdrillen und aus dem Garn ein flächiges Gewebe erzeugen. Dieses Textil wird stark erhitzt, bis der Kunststoff schmilzt und gleichmäßig zerläuft. Nach dem Aushärten entsteht eine dünne Kunststoffplatte, in der die Kohlefasern noch in genau derselben Richtung verlaufen wie im Textil.

Sandwichstrukturen

Im Automobilbau wird unter anderem für die Produktion von Kofferraumböden, Reserveradabdeckungen oder Schiebedachkassetten eine besondere Methode verwendet. Leichte Papierwabenkerne werden zwischen Glasfasergewebematten von wenigen zehntel Millimeter Dicke gelegt. Dann besprüht man die Glasfasermatten auf beiden Seiten mit einer leicht aufschäumenden Polyurethan-Reaktionsmischung und verpresst die Teile in einer heißen Form miteinander. Nach dem Aushärten des Polymers sind alle Teile fest miteinander verbunden. So erzeugte Sandwichbauteile sind hoch stabil und weisen Flächengewichte von lediglich drei Kilogramm pro Quadratmeter auf.

Metallschäume

Metallwerkstücke, die von Blasen und Poren durchzogen sind, stellen interessante Materialien für den Leichtbau dar. Insbesondere leichte Metallschäume auf Basis von Aluminium und Zink beziehungsweise aus deren Legierungen erscheinen wegen ihrer Eigenschaftskombinationen interessant. Sie bestehen in der Regel zu 85 Prozent aus Luft und nur zu 15 Prozent aus Metall. Diese Gewichtsersparnis ist gleichzeitig gepaart mit den typischen Eigenschaften eines metallischen Werkstoffs, etwa höheren Festigkeiten und Steifigkeiten als bei Kunststoffschäumen. Für die Fahrzeugindustrie ist insbesondere die Tatsache interessant, dass Metallschäume bei einem Crash sehr hohe Mengen an Aufprallenergie aufnehmen können und gute Wärme- und Schalldämmungseigenschaften besitzen.

Metallschäume können auf zwei Wegen hergestellt werden. Einer davon ist die schmelzmetallurgische Produktion: Diese beginnt in der Regel durch das Aufschäumen einer Metallschmelze, entweder durch Einleiten von Gasen oder durch die Zugabe eines Treibmittels (beispielsweise Titanhydrid), das in einer thermischen Reaktion Gas abspaltet. Auf diesem Weg können sowohl offenzellige (miteinander verbundene) Poren als auch geschlossenzellige (in sich abgeschlossene) Poren hergestellt werden.

Bei dem Verfahren der pulvermetallurgischen Produktion vermischt der Hersteller handelsübliche Metallpulver mit geringen Mengen eines ebenfalls pulverförmigen Treibmittels. Die Pulvermischung wird dann zu einem festen, wenig porösen Vormaterial verdichtet, das in die gewünschte Form – zum Beispiel zu Blechen oder Profilen – weiterverarbeitet werden kann. Nahe der Schmelztemperatur des Grundmaterials nimmt das Metall einen zähen oder flüssigen Zustand an und durch Gasbildung entstehen die gewünschten Poren.

7.3 Treibstoffe aus Biomasse

Umdenken ist nötig

Neben Erdöl ist es heute vor allem Erdgas, aus dem Kraftstoffe für Autos und Flugzeuge hergestellt werden. Diese Rohstoffe lagern unter der Erde. Sie sind aus den Überresten von Pflanzen und Kleinstlebewesen entstanden, die vor vielen hundert Millionen Jahren gelebt haben. Dieser Vorrat ist jedoch begrenzt. Deshalb muss die Menschheit bereits heute umdenken, um neue Quellen für die Treibstoffe von morgen zu erschließen.

Viele Länder der Welt haben damit bereits begonnen. Sie stellen Bioethanol, Biogas und Biodiesel aus Biomasse her. Als Quellen kommen unter anderem Mais, Raps, Weizen, Zuckerrohr, Palmöl, Olivenöl, Holz, Stroh oder Kompost infrage. Treibstoffe aus Biomasse können eine kreislauffähige Alternative zu Treibstoffen aus fossilen Rohstoffquellen darstellen. Der Grund: Bei ihrer Verbrennung wird nur so viel Kohlenstoffdioxid freigesetzt, wie die Pflanzen aus der Atmosphäre aufgenommen haben. Wo der Anbau von Treibstoffpflanzen sinnvoll ist, muss im Einzelfall unter Berücksichtigung von ökologischen und ökonomischen Faktoren entschieden werden. Dies betrifft beispielsweise die vielzitierte „Tank oder Teller“-Diskussion. Die Ausweitung von Anbauflächen für die Treibstoffproduktion aus Biomasse darf nicht auf Kosten des Nahrungspflanzenanbaus gehen. Ökologische Fragestellungen betreffen etwa die Ausweitung von Monokulturen und den Verlust der Artenvielfalt.

Werden Biokraftstoffe die Erdölprodukte ablösen?

Bis heute ist es nicht möglich, Strom oder Wasserstoff für den Antrieb von Autos, Schiffen oder Flugzeugen kostengünstig genug zu speichern. Daher sind wir bis auf weiteres auf andere Kraftstoffe angewiesen.

Biokraftstoffe der ersten Generation

Große Hoffnungen setzt man darauf, solche Treibstoffe aus den Inhalts- und Gerüststoffen von Pflanzen zu gewinnen. Bereits seit einigen Jahren sind die sogenannten Biokraftstoffe der ersten Generation (**Biodiesel** und **Bioethanol**) auf dem Markt, bei denen nur ein Teil der Pflanze genutzt wird. Biodiesel wird in Deutschland überwiegend als Rapsölmethylester getankt, der durch Umsetzung von Rapsöl mit fossilem Methanol hergestellt wird. Bioethanol eignet sich für den Einsatz in Ottomotoren. Es wird überwiegend aus Zuckerrohr und Mais produziert.

Biokraftstoffe der zweiten Generation

Insbesondere in ärmeren Ländern mit gravierenden Problemen in der Nahrungsmittelversorgung ist es wichtig, dass Agrarflächen für Ernährungspflanzen nicht auf Kosten der „Treibstoffproduktion vom Acker“ verringert werden. Auch darf die Agrarnutzung nicht weiter zur Vernichtung der tropischen Wälder führen.

Aus diesem Grund wird intensiv daran geforscht, die gesamte pflanzliche Biomasse in flüssige Treibstoffe

ABBILDUNG 7-3-1

Treibstoffherstellung aus nachwachsenden Rohstoffen



der sogenannten zweiten Generation umzuwandeln. Allerdings gibt es noch keine großtechnischen Produktionsanlagen, weil sich die stoffliche Zusammensetzung des Ausgangsmaterials je nach Pflanzenart, Bodenbeschaffenheit und Klima stark unterscheiden kann. Bei der Gewinnung von Biokraftstoffen der zweiten Generation, etwa aus Holz oder Stroh, sollen auch die Faserstoffe (Lignozellulose) aufgeschlossen und verarbeitet werden. Möglich wird dies durch die Behandlung mit Zelluloseabbauenden Enzymen (Zellulasen). Für feuchte Biomasse wie Ernterückstände, Traubentrestler oder Klärschlamm kommt – alternativ zur Herstellung von Biogas (Methan und Kohlenstoffdioxid) – möglicherweise der Aufschluss mit überkritischem Wasser in Betracht. Bei einem Druck von mindestens 221 bar und einer Temperatur von mindestens 374 °C wird Wasser zu einer aggressiven Substanz, die auch sehr große Polymere in kurze Moleküle aufspaltet.



Für die Treibstoffherstellung aus trockenen Pflanzenresten steht in Karlsruhe bereits eine Versuchsanlage für einen Prozess aus Schnellpyrolyse, Synthesegasproduktion (Vergasung zu einem Gemisch aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff) und Synthese des flüssigen Kraftstoffs. Der englische Fachbegriff für dieses Verfahren lautet "Biomass to Liquid", abgekürzt BtL.

"Biomass to Liquid": Flüssigkraftstoff aus fester Biomasse

Für die technisch unproblematische Produktion flüssigen Treibstoffs wurde am Forschungszentrum Karlsruhe das „bioliq®“-Verfahren entwickelt.

Nach dem Motto „Sprit aus Stroh“ soll eine Produktionsanlage in einem vierstufigen Prozess aus trockener Biomasse hochwertige Flüssigtreibstoffe im industriellen Maßstab herstellen. Aber nicht nur Stroh kann als Ausgangsmaterial dienen. Auch Baumschnitt, Heu, Restholz, Rinde oder Papier kommen infrage. Diese werden bei 500 °C durch die sogenannte Schnellpyrolyse in ein transportfähiges flüssiges Zwischenprodukt („Bioslurry“) – eine Art biologisches Rohöl mit hoher Energiedichte – umgewandelt. Bei 1.200 °C entstehen aus diesem dann Kohlenwasserstoffe mit Benzin- und Deseleigenschaften. Das bioliq®-Verfahren bietet zahlreiche Vorteile: So ist



die Qualität des Kraftstoffes weit höher als die von herkömmlichen Biotreibstoffen und sogar als die von Mineralölprodukten. Rund 50 Prozent der in der Biomasse enthaltenen Energie verbleiben im Produkt, dem Treibstoff. Als Nebenprodukte werden Wärme und Strom erzeugt, die wieder in den Herstellungsprozess eingespeist werden und dessen Energiebedarf vollständig decken. Zudem benötigt die Herstellung der Biomasse als Ausgangsmaterial keine zusätzlichen landwirtschaftlichen Flächen.

8. Websites und Literatur

Weiter im Web

Die folgenden Links finden Sie auch auf der CD-ROM.

Fonds der Chemischen Industrie im
Verband der Chemischen Industrie e.V.
www.fonds.vci.de

Verband der Chemischen Industrie
www.vci.de

DECHEMA Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e.V.
www.dechema.de

Gesellschaft Deutscher Chemiker e. V.
www.gdch.de

Neue Entwicklungen in der Beleuchtungstechnik
www.naturwissenschaften-entdecken.de/dyn/bin/844243-844265-1-gdch_beleuchtungstechnik.pdf

„Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland“ der Leopoldina,
zum Download unter:
www.leopoldina-halle.de/cms/fileadmin/user_upload/leopoldina_downloads/Energieforschungskonzept.pdf

Internationales Jahr der Chemie 2011
www.ijc2011.de

Jahr der Energie 2010
www.zukunft-der-energie.de

Planet Schule
www.planet-schule.de

Aral Forschung: Die Brennstoffzelle
www.aral.de/aral/genericarticle.do?categoryId=9011599&contentId=56436

„Erneuerbare Energie 2020“ der Agentur für
Erneuerbare Energien
www.unendlich-viel-energie.de/de/wirtschaft/potenziale.html

„Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft“
der Deutschen Bunsen-Gesellschaft (speziell auch für
Schüler geeignet), zu bestellen über
www.bunsen.de/Wir+%C3%BCber+uns/Publicationen/Energie+und+Chemie.html

Desertec Foundation (Solarthermie-Kraftwerke)
www.desertec.org/de/

Literatur

Chemie im Kontext
Hrsg.: Prof. Dr. Reinhard Demuth, Prof. Dr. Ilka Parchmann,
Prof. Dr. Bernd Ralle
2006, Cornelsen-Verlag, Berlin

Die nachfolgenden Publikationen wurden erstellt und
getragen durch den Koordinierungskreis Chemische
Energieforschung der folgenden Chemieorganisationen:
DBG – Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische
Chemie e.V., DECHEMA – Gesellschaft für Chemische
Technik und Biotechnologie e.V., DGMK – Deutsche
Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und
Kohle e.V., GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.,
VCI – Verband der Chemischen Industrie e.V., VDI-GVC –
Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

Positionspapier:
Energieversorgung der Zukunft
– der Beitrag der Chemie –
Eine quantitative Potenzialanalyse
Oktober 2009
www.energie-und-chemie.de/pdf/psp_energie09.pdf

Positionspapier:
Energieversorgung der Zukunft
– der Beitrag der Chemie –
März 2007
www.vci.de/template_downloads/tmp_VCIInternet/120330Positionspapier.pdf?DokNr=120330&p=101

Innovative Beiträge der Chemie für die Energieversorgung
der Zukunft und zur Reduzierung des Energieverbrauchs
September 2006
www.gdch.de/oearbeit/chemenerg.pdf

Absolute Temperatur

Bei der Angabe der absoluten Temperatur in Kelvin (K) geht man vom absoluten Nullpunkt (-273,15 °C, entspricht 0 K) aus. Der absolute Nullpunkt kann gemäß dem 3. Hauptsatz der Thermodynamik prinzipiell nicht erreicht werden.

Anthocyane

Bei Anthocyanen handelt es sich um eine weit verbreitete Gruppe von Pflanzenfarbstoffen, welche von der Grundstruktur des Flavans abgeleitet sind und je nach Substituent eine oft intensive Farbe von rot über blau bis zu fast schwarz aufweisen.

Blockheizkraftwerk

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) ist eine Anlage zur gleichzeitigen Gewinnung von elektrischer Energie und Wärmeenergie. BHKW leisten typischerweise zwischen 5 Kilowatt und 5 Megawatt auf und ermöglichen eine besonders effiziente Nutzung von Brennstoffen.

Carnot'scher Kreisprozess

Als Kreisprozesse werden periodisch ablaufende technische Prozesse bezeichnet, in denen durch die Zustandsänderung (beispielsweise Druck oder Temperatur) eines Arbeitsmediums Wärmeenergie in mechanische Energie umgewandelt wird oder umgekehrt. Der von dem französischen Physiker Sadi Carnot (1796–1832) beschriebene Prozess stellt dabei einen idealisierten Prototyp dar, aus dem sich der maximale theoretisch mögliche Wirkungsgrad (Carnot-Wirkungsgrad) eines Prozesses ermitteln lässt.

Fullerene

Als Fullerene werden kugel- oder röhrenförmige, ausschließlich aus Kohlenstoff bestehende Moleküle bezeichnet. Das bekannteste dieser Moleküle mit der Summenformel C_{60} wurde 1985 erstmals synthetisiert. Da seine Form stark an die geodätischen Kuppeln des amerikanischen Ingenieurs Buckminster Fuller erinnert, erhielt es den Namen Buckminsterfulleren, wovon dann der Gattungsbegriff Fulleren abgeleitet wurde.

Galvanisches Element

Ein Galvanisches Element (auch Galvanische Zelle genannt) besteht aus zwei Redoxpaaren, deren Redox-Reaktionen in zwei sogenannten Halbzellen räumlich voneinander getrennt ablaufen. Dadurch kann im äußeren Stromkreis, der die beiden Halbzellen miteinander verbindet, ein Stromfluss auftreten. Benannt ist es nach dem italienischen Naturforscher Luigi Galvani (1737–1798), einem der Pioniere der Erforschung der Elektrizität.

Halbleiter

Bei Halbleitern handelt es sich um Elemente oder Verbindungen, die bezüglich ihrer elektrischen Leitfähigkeit zwischen den Leitern und den Nichtleitern liegen. Halbleitermaterialien sind von zentraler Bedeutung für Anwendungen in Elektronik, Optoelektronik und Photovoltaik.

Interkalationsverbindung

Bei diesem Verbindungstyp sind Moleküle, Ionen oder Atome in andere Moleküle eingelagert (interkaliert). Die Struktur der aufnehmenden Moleküle wird dabei nur wenig beeinflusst.

Kritische Temperatur

Betrachtet man die Zustandsänderungen eines Stoffes, so lassen sich die drei Aggregatzustände – fest, flüssig und gasförmig –, in Abhängigkeit von Druck und Temperatur, in ein sogenanntes Zustandsdiagramm eintragen. Oberhalb des kritischen Punktes, der für jeden Stoff charakteristisch und durch die kritische Temperatur und den kritischen Druck gegeben ist, existiert keine Unterscheidung mehr zwischen der Flüssigkeits- und der Gasphase.

LCD

Ein LCD (liquid crystal display) ist eine Flüssigkristallanzeige. Flüssigkristalle vereinen Eigenschaften von Flüssigkeiten mit richtungsabhängigen optischen Eigenschaften (ähnlich denen von Kristallen). Diese optischen Eigenschaften können durch Anlegen einer elektrischen Spannung beeinflusst werden.

Nanopartikel

Als Nanopartikel werden Partikel mit äußeren Durchmessern unterhalb von 100 Nanometern bezeichnet. Unter anderem durch ihre im Verhältnis zum Volumen sehr große Oberfläche weisen sie oft besondere Eigenschaften auf.

Nanostrukturierte Materialien

Nanostrukturierte Materialien haben eine nanoskalige innere Struktur oder eine nanoskalige Oberflächenstruktur. Als nanoskalig wird der der Längenbereich 1–100 nm verstanden. Chemisch gesehen, kann es sich bei Nanomaterialien beispielsweise um reine oder gemischte Oxide, Salze, Metalle und organische Stoffe handeln.

Paraffin

Dabei handelt es sich um ein Gemisch verschiedener langkettiger Alkane, deren Hauptbestandteile zwischen 18 und 32 Kohlenstoffatome enthalten.

Permafrostboden

Als Permafrostböden werden solche Böden bezeichnet, die ab einer bestimmten Tiefe das ganze Jahr über gefroren sind. Sie finden sich arktischen und antarktischen Regionen, aber auch im Hochgebirge.

Perpetuum mobile

Ein Perpetuum mobile ist eine nicht realisierbare Vorrichtung, die entweder mehr Energie abgeben soll als ihr zugeführt wird – dies ist aber aufgrund des Prinzips der Energieerhaltung (erster Hauptsatz) nicht möglich – oder aber die ohne weitere Energiezufuhr der Umgebung Wärme entziehen und in nutzbare Energie umwandeln soll. Letzteres käme einer Verringerung der Gesamtentropie des Weltalls und damit einem Verstoß gegen den zweiten Hauptsatz gleich.

Plasma

Manchmal als „vierter Aggregatzustand“ bezeichnet, versteht man unter einem Plasma ein Gas, das ganz oder vollständig in Ladungsträger getrennt ist. In der Natur tritt es beispielsweise in Blitzen auf und Fixsterne wie die Sonne bestehen vollständig aus Plasma.

Pyrolyse

Bei der Pyrolyse werden die Moleküle organischer Verbindungen bei hohen Temperaturen (500–900 °C) unter Luftabschluss in kleinere Moleküle zerlegt.

Quantenpunkt

Als Quantenpunkte wird eine Klasse von Nanopartikeln bezeichnet, die meist aus halbleitenden Materialien bestehen und aus verhältnismäßig wenigen (einigen 1.000) Atomen aufgebaut sind.

Thermodynamik

Als Thermodynamik (auch Wärmelehre) wird die Wissenschaft von den Energieumwandlungen, insbesondere von thermischer und mechanischer Energie, bezeichnet. Ihre grundlegenden Gesetzmäßigkeiten werden in den vier Hauptsätzen der Thermodynamik beschrieben.

Die im Glossar erklärten Begriffe sind im Textheft * markiert.

Impressum

Herausgeber

Fonds der Chemischen Industrie im
Verband der Chemischen Industrie e.V. (FCI),
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main
www.fonds.vci.de

Erstauflage: Juli 2011

26.000 Exemplare

Alle Rechte vorbehalten

Das vorliegende Textheft zur Informationsserie
„Chemie – Schlüssel zur Energie von morgen“ ist
zusammen mit einer interaktiven CD-ROM erschienen.
Auf dieser CD-ROM sind alle Abbildungen nochmals
separat als PPT- und PDF-Dateien gespeichert.
Außerdem enthält die CD-ROM, Animationen,
Arbeitsblätter und Versuchsbeschreibungen.
Die Informationsserie ist außerdem über
das Internet abrufbar (www.fonds.vci.de).

Fachliche und fachdidaktische Beratung

Prof. Dr. Bernd Ralle, Technische Universität Dortmund
Prof. Dr. David Di Fuccia, Universität Kassel
Udo Wlotzka, Helene-Lange-Gymnasium Dortmund
Mitarbeit: DECHEMA e.V.

Autoren

Dr. Andreas Jungbluth,
Flad & Flad Communication GmbH, Heroldsberg
Dr. Markus Döring,
Flad & Flad Communication GmbH, Heroldsberg
Prof. Dr. David Di Fuccia, Universität Kassel
Udo Wlotzka, Helene-Lange-Gymnasium Dortmund
Ines Schmidt, Universität Kassel

Redaktion

Birgit Kullmann, Fonds der Chemischen Industrie
im Verband der Chemischen Industrie e. V.

Bildquellen

Getty Images/Flad & Flad (Titel)
iStockphoto (Seiten 8, 9, 10 o. m., 13, 22 o. m. + u. l., 27 r.,
34/Blatt + u. m. + u. r., 35, 37, 50 u. m., 59 o. + u. r.,
60 o. + u. l. + u. m.)
www.Solarbox24.de (Seite 9)
Stockbyte (Seiten 10 u., 45 r.)
Kane Skennar (Seite 10 o. l.)
Hemera (Seiten 9, 10 o. r., 22 o. r. + u. m. + r., 29 m.,
34 u. l., 41 r., 50 o., 54 r., 60 u. r., 62 r., 64 l.)
Universität Siegen (Seite 16 l.)
AVE (16 r.)
BananaStock (Seite 22 o. r.)
Hemera Technologies (Seiten 26 u., 59 l.)
Klaus Bonda/Pixelio (Seite 30 l.)
Toyota Deutschland GmbH, Lexus Deutschland (Seite 30 r.)
Photodisc (Seite 34, Zellen)
Max-Planck-Institut für Metallforschung (Seite 38 l.)
Fraunhofer ISE (Seite 40 u.)
www.fh-ooe.at/campus-wels (Seite 41 l.)
Ra Boe (Seite 43)
Daimler AG (Seite 45 l.)
Florian Lehr (Seite 47)
Cornelsen Verlag GmbH (Seite 48 u. 58)
teleDesign, München (Seite 49)
Malermeister Seidel (Seite 50 u. l.)
Jupiterimages (Seiten 17, 50 u. r.)
VCI – infografik.biz. (Seite 52)
BASF (Seite 53 o. l.)
Cabot Corporation (Seite 53 o. r.)
BrandXPictures (Seite 54 l.)
Fraunhofer IFAM (Seite 61)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Seite 63)
Goodshoot (Seiten 62 r., 64 r.)
Flad & Flad Communication GmbH (Übrige Abbildungen)

Gestaltung

Regine Radina
Flad & Flad Communication GmbH, Heroldsberg

Druck

Wünsch Offset-Druck GmbH, Neumarkt

