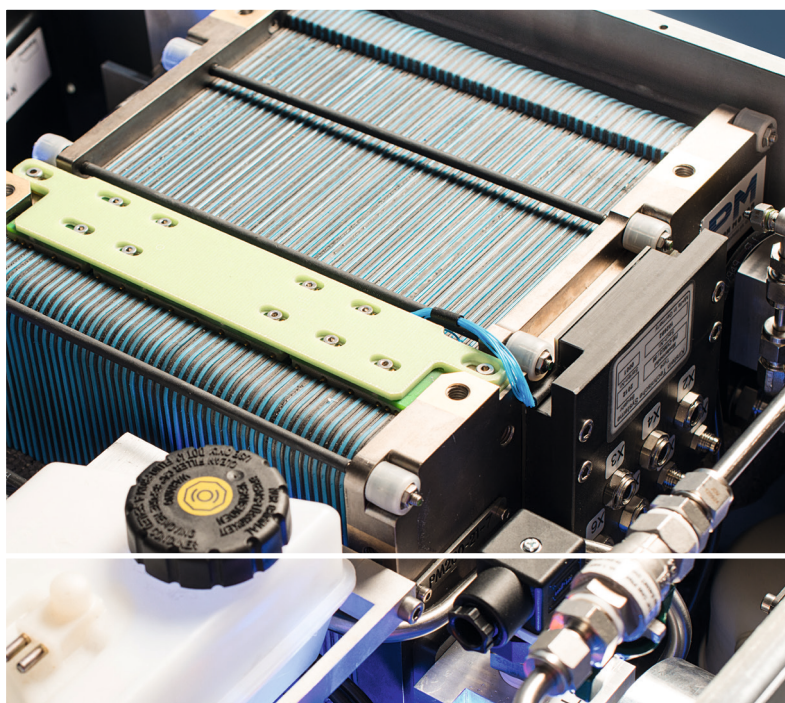


Enno Wagner

Das System Brennstoffzelle

Wasserstoffanwendungen
ganzheitlich entwickeln



HANSER

Wagner
Das System Brennstoffzelle



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Enno Wagner

Das System Brennstoffzelle

Wasserstoffanwendungen ganzheitlich entwickeln

HANSER

Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Enno Wagner, Frankfurt University of Applied Sciences

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Julia Stepp

Herstellung: Melanie Zinsler

Titelmotiv: © Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE/Foto: Joscha Feuerstein

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: le-tex publishing Services, Leipzig

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-47260-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47505-2

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Wasserstoff als Hoffnungsträger	2
1.2	Funktionsprinzip der Brennstoffzelle	5
1.3	Aktuelle Herausforderungen der Brennstoffzellentechnologie	8
1.4	Aufbau dieses Buches	12
2	Energiegeschichte der Menschheit	15
2.1	Frühe solare Zivilisationen	15
2.2	Fossiles Industriezeitalter	19
2.3	Vision einer solaren Zivilisation	32
3	Naturgesetze der Energie	37
3.1	Exergie	37
3.2	Entropie	43
3.3	Syntropie und Information	52
3.4	Bedeutung für die Energiewirtschaft	67
4	Thermochemische Grundlagen	71
4.1	Grundfunktion einer Brennstoffzelle	71
4.2	Das chemische Potenzial	73
4.3	Ruhepotential einer Brennstoffzelle	75
4.4	Brennstoffzellen unter Strom	78
4.5	Stofftransportprozesse	91
4.6	Impedanzspektroskopie	99
4.7	Batterien	101

5	Elektrolyse- und Brennstoffzellen	109
5.1	Übersicht der Brennstoffzellentypen	109
5.2	Alkalische Technologie	120
5.3	Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM)	143
6	Mechatronik und Systemtechnik	167
6.1	Mechatronische Konstruktion	168
6.2	Anwendung der Systemtechnik	226
7	Wasserstofftechnologie	233
7.1	Eigenschaften von Wasserstoff	233
7.2	Verdichtung von Wasserstoff	235
7.3	Wasserstoffinfrastruktur	249
7.4	Wasserstofftankstellen	255
7.5	Wasserstofffahrzeuge	258
7.6	Hausenergiepolitik	261
7.7	Industrielle Wasserstoffnutzung	263
8	Regeneratives Energiesystem	267
8.1	Energieatlas Deutschland	267
8.2	Elektrische Systemebene	269
8.3	Chemische Energie	288
8.4	Thermische Systemebene	301
9	Wirtschaft und Politik	313
9.1	Grenzen des Wachstums	313
9.2	Stand der Energiewende in Deutschland	323
9.3	Wasserstoffstrategien	325
9.4	Nachhaltig wirtschaften	326
10	Ausblick	331
10.1	Die Rolle von Wasserstoff für die Energiewirtschaft	332
10.2	Die solare Zukunftsvision	336
	Index	341

In der aktuellen energiepolitischen Diskussion werden Wasserstoff und Brennstoffzellen teilweise recht kontrovers diskutiert. Für die einen ist Wasserstoff der Hoffnungsträger der Energiewende, weil er wie Erdgas oder Benzin in herkömmlichen Anlagen und Motoren verbrannt werden kann. Damit hätten fossile Infrastrukturen eine längere Daseinsberechtigung. Für die anderen ist Wasserstoff der Champagner der Energiewende, der kostspielig und energieaufwendig in der Herstellung ist und daher nur für exklusive Anwendungen geeignet ist. Man sollte Gasnetze besser gleich abreißen und auf eine rein elektrische Energieversorgung umstellen, sagen sie.

Die Wahrheit liegt natürlich irgendwo dazwischen. Doch eines ist klar: Die Umstellung eines mächtigen weltumspannenden fossilen Energiesystems auf eine klima- und umweltfreundliche Wirtschaftsweise gibt es nicht zum Nulltarif. Hierfür sind immense Investitionen und Jahrzehnte lange Anstrengungen erforderlich. Es ist die wohl größte energietechnische und wirtschaftliche Herausforderung seit Beginn der Industrialisierung, und eine enorme Schwierigkeit wird vermutlich die Umstellung in den Köpfen sein. Eine monopolistisch ausgelegte Verteilstruktur, die auf günstigen fossilen Energieträgern und einer expansiven Wirtschaftspolitik basiert, wird sich künftig kaum mehr mit den begrenzten Ressourcen und Umweltproblemen unseres Planeten in Einklang bringen lassen. Vielmehr ist ein bedachter Umgang mit hochwertiger Energie gewünscht, der auf dezentralen erneuerbaren Energiesystemen basiert. Eine smarte Vernetzung von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern ist essenziell, um die tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen der erneuerbaren Energievorkommen auszugleichen. Nur so können die verschiedenartigen Energieträger wie Strom und Gas in einem ausgeklügelten Wechselspiel entsprechend ihrer spezifischen Eigenschaften möglichst effizient und nachhaltig genutzt werden.

■ 1.1 Wasserstoff als Hoffnungsträger

Wasserstoff (H_2) ist ein sehr leichtes und brennbares Gas, das allerdings nicht frei verfügbar in der Natur vorkommt. Im **Erdgas** hingegen (Methan, CH_4) ist Wasserstoff enthalten, der an Kohlenstoff gebunden ist. Der Wasserstoff kann in einem thermischen Prozess abgespalten und freigesetzt werden, was heute bereits in nennenswertem Umfang in der chemischen Industrie geschieht. Hierbei entsteht allerdings wieder das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2), weshalb man auch vom **grauen Wasserstoff** spricht. Einige Vertreter aus Politik und Wirtschaft befürworten den Ansatz, den aus Erdgas hergestellten Wasserstoff als Brückentechnologie zu verwenden, um eine Wasserstoffwirtschaft aufzubauen. Dieser Vorschlag ist jedoch eher fragwürdig. Zum einen würden hiermit weiterhin fossile Verteilstrukturen unterstützt und ausgebaut werden, wodurch es sogar zu einem Anstieg der Treibhausgasemissionen kommen kann. Zum anderen zeigen die aktuellen politischen Missverhältnisse zwischen der EU und Russland, dass die starke Abhängigkeit von einem dominierenden Energieträger wie dem Erdgas in Zukunft unerwünscht ist.

Wasserstoff ist allerdings noch in einer anderen gebundenen Form in sehr großer Menge auf der Erde vorhanden – und zwar im Wasser (H_2O), in Verbindung mit Sauerstoff (O_2). Wasserstoff ist also wortwörtlich der Stoff, aus dem Wasser gemacht ist. Wasser ist allerdings eine sehr stabile und energiearme Verbindung, die sich nicht ohne Weiteres auflösen lässt. Für die Aufspaltung von Wasser mittels **Elektrolyse** muss daher zunächst sehr viel elektrische Energie aufgewendet werden. In sogenannten Elektrolyseuren wird Wasser mithilfe von elektrischem Strom zerlegt, wobei die Gase Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt werden. Wird für den Betrieb des Elektrolyseurs nur elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen wie Wind- oder Solarenergie eingesetzt, so spricht man von **grünem Wasserstoff**. Bei der Elektrolyse wird der Sauerstoff meistens in die Atmosphäre entlassen (obwohl er auch für andere Zwecke wie beispielsweise zur Desinfektion eingesetzt werden kann). Das Wasserstoffgas wird komprimiert und kann in Stahlbehältern bevorratet und transportiert werden. Hochverdichteter Wasserstoff kann somit an **Wasserstofftankstellen** über einen Tankstutzen in den Drucktank von Fahrzeugen überströmt werden. Der Vorgang geschieht ähnlich schnell wie das Tanken von Benzin, wodurch ein klarer Vorteil gegenüber dem langwierigen Laden von Batteriefahrzeugen gegeben ist. Es gibt daher eine nennenswerte Menge an Befürwortern, die Wasserstofffahrzeuge den reinen Batteriefahrzeugen vorziehen würden. Ein weiterer Vorteil ist durch die größeren Reichweiten gegeben. Während bei kleinen Stadtfahrzeugen die Vorteile der Batterien überwiegen, sind schwere Fahrzeuge wie Busse, Lkw, Züge und Schiffe, die große Reichweiten zurücklegen müssen, mit Batterien nicht sinnvoll zu betreiben. Mit Wasserstoff in großen Druck-

tanks lassen sich hingegen Reichweiten von über 1000 Kilometer problemlos darstellen.

Die **Herstellung von grünem Wasserstoff** aus elektrischem Strom kann besonders vorteilhaft an Orten mit großen Energievorkommen wie beispielsweise Windparks an der Küste stattfinden. Doch auch im Binnenland gibt es günstige Standorte (Bild 1.1). Durch die Speicherfähigkeit von großen Energiemengen und die grundsätzliche Transportfähigkeit kann daher eine zeitliche und räumliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch stattfinden. Wasserstoff kann für die saisonale Speicherung in großen Salzkavernen eingelagert und im Winter als erneuerbarer Energieträger anstelle von Erdgas in Gasturbinenkraftwerken wieder zurückverstromt werden. Er ist daher entlastend und unterstützend für die Stromnetze, insbesondere bei Verbrauchsspitzen und bei mangelndem Stromangebot aus erneuerbaren Energien im Winter.



Bild 1.1 Energiepark Mainz mit Wasserstoffspeichern: Der Wasserstoff wird mittels Elektrolyse und erneuerbarem Strom aus regionalen Wind- und Solaranlagen erzeugt (© mit freundlicher Genehmigung der Mainzer Stadtwerke AG).

In **Brennstoffzellenfahrzeugen** wird der elektrische Strom für die Antriebsmotoren an Bord aus Wasserstoff hergestellt. In Brennstoffzellen findet eine sogenannte kalte Verbrennung statt, ein elektrochemischer Prozess, bei dem Wasserstoff und Luftsauerstoff wieder zu Wasser reagieren, wobei elektrische Energie und Wärme freigesetzt werden. Die Effizienz ist hierbei deutlich höher als bei klassischen Verbrennungsmotoren, und aus dem Auspuff kommt nichts als reiner Wasserdampf. Auch Brennstoffzellenfahrzeuge sind demnach Elektrofahrzeuge, nur dass der elektrische Strom im Fahrzeug aus Wasserstoffgas generiert wird.

Darüber hinaus zeigt beispielsweise eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg, dass ab einer Speicherkapazität von etwa 60 Kilowattstunden Brennstoffzellen und Wasserstoff in Fahrzeugen umwelt-

freundlicher sind als Batterien, wenn man den vollständigen **Produktlebenszyklus** inklusive Herstellung, Nutzung und Entsorgung betrachtet. In Batterien muss nämlich die gesamte Energiemenge an umweltschädliche Materialien wie Lithium, Cobalt und seltene Erden gebunden werden, die teils unter widrigen Bedingungen und unter Freisetzung von CO₂ gewonnen werden. In Elektrolyse- und Brennstoffzellen wird das Gas unabhängig von der Größe des Energiewandlers in Tanks gespeichert, sodass über die Zeit sehr große Gasmengen umsetzbar und damit speicherbar sind (Sternberg et al. 2019).



Vorteile von Wasserstoff und Brennstoffzellen:

- Energiespeicherung über lange Zeiträume und große Distanzen
- Entlastung und Stabilisierung des Stromnetze
- effiziente und schadstofffreie Energiewandlung
- schnelle Vertankung vergleichbar mit Benzin
- Nutzung für chemischen Prozesse

Den Vorteilen von Wasserstoff stehen allerdings auch einige **Nachteile** gegenüber. Wie bereits erwähnt, werden für die Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff große Mengen elektrischer Energie benötigt. Stammt der elektrische Strom auch aus der Verbrennung von fossilen Energien, also beispielsweise aus Kohlekraftwerken, so verschwinden die Vorteile gegenüber der Nutzung von Erdgas, da hierbei ebenfalls klimaschädliche Gase freigesetzt werden. Wasserstoff sollte also nur per Elektrolyse hergestellt werden, wenn der elektrische Strom zu 100 Prozent aus regenerativen Energiequellen wie Wind- oder Solarstrom stammt. Nur dann gilt der Begriff **grüner Wasserstoff**. Aktuell befinden sich die Erzeugungsanlagen für erneuerbare elektrische Energie in Deutschland noch im Aufbau. So müssen in den nächsten Jahrzehnten riesige Windparks in der Nord- und Ostsee (Offshore) und im Binnenland (Onshore) aufgeschlagen werden. Das Gleiche gilt für Photovoltaikanlagen, die sowohl auf Dächern als auch auf Freiflächen in großem Umfang installiert werden müssen. Nur so können klimaschädliche Gas- und Kohlekraftwerke schrittweise vom Netz genommen und die Klimaziele der EU erreicht werden. Gleichzeitig wird aber der Strombedarf rapide ansteigen, da weite Teile des Verkehrs (Elektromobilität) und der Gebäudeheizung (elektrisch betriebene Wärmepumpen) zu elektrifizieren sind. Werden im gleichen Zeitraum noch große Elektrolyseanlagen zur Erzeugung von grünem Wasserstoff installiert, so entsteht eine kritische **Konkurrenzsituation** hinsichtlich der vorrangigen Nutzung von sauberer elektrischer Energie. Hierbei sollten die effizientesten Technologien primär genutzt werden.



Nachteile von Wasserstoff und Brennstoffzellen:

- große Mengen erneuerbarer elektrischer Energie erforderlich
- verhältnismäßig geringe Speicherwirkungsgrade
- hohe Systemkomplexität und damit hohe Kosten

Die Energiespeicherung mittels Wasserstoff erfordert zudem eine **komplexe Systemtechnik** mit einer Vielzahl von mechanischen und elektronischen Komponenten wie Pumpen, Ventilen und Steuerungen. Hierdurch und aufgrund von Verlusten ergibt sich eine verhältnismäßig **geringe Gesamteffizienz**. Während Batterien sehr hohe elektrische Speicherwirkungsgrade im Bereich von 80 bis 90 Prozent aufweisen, liegt der Gesamtspeicherwirkungsgrad mit Elektrolyse, Verdichtung und Rückverstromung in Brennstoffzellen lediglich in einem Bereich von 30 Prozent (Kurzweil/Dietlmeier 2015). Daher ist die Energienutzung von Wasserstoff grundsätzlich **kostenintensiv** und sollte gut bedacht werden. Vor allem, wenn eine direkte Nutzung des elektrischen Stroms aus zeitlichen oder räumlichen Gegebenheiten nicht möglich ist, kommt die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger in Betracht. Besonders für die saisonale Langzeitspeicherung, für Fahrzeuge mit großen Reichweiten und für bestimmte chemische oder verfahrenstechnische Prozesse wie die Stahl- und Glasherstellung wird Wasserstoff in der Zukunft alternativlos sein. Eine besondere technische Herausforderung ist die Weiterentwicklung der Brennstoffzellentechnologie zur deutlichen Steigerung der Effizienz. Dies ist ein Schwerpunkt des vorliegenden Buches.

■ 1.2 Funktionsprinzip der Brennstoffzelle

Das Buch trägt den Titel *Das System Brennstoffzelle*. Hierbei ist die Brennstoffzelle als Synonym für unterschiedliche Zelltypen anzusehen. In dieser allgemeineren Ausdrucksweise können sowohl Brennstoffzellen als auch Elektrolysezellen gemeint sein, da diese von der grundsätzlichen Funktionsweise sehr ähnlich aufgebaut sind und der Prozess prinzipiell reversibel, also umkehrbar ist und damit vorwärts wie rückwärts ablaufen kann (Bild 1.2).

Während der Elektrolyse erfolgt die Aufspaltung von Wasser in einem **elektrochemischen Prozess** mittels elektrischer Energie, wobei gasförmiger Wasserstoff und Sauerstoff freigesetzt werden. Bei der Umkehrung des Prozesses (kalte Verbrennung), der typischerweise in Brennstoffzellen abläuft, reagieren Wasserstoff und Sauerstoff wieder zu Wasser, wobei elektrische Energie und Wärme entstehen. Aufgrund der Stöchiometrie werden immer doppelt so viele Moleküle Wasserstoff wie Sauerstoff umgesetzt. Da die Trennung der Gase einen zusätzlichen Energieaufwand erforderlich macht und die in der Brennstoffzelle anfallende Abwärme nicht mehr in elektrische Energie umgewandelt werden kann, ist der Gesamtprozess verlustbehaftet. Hieraus erklären sich die geringeren Speicherwirkungsgrade im direkten Vergleich mit Batterien.

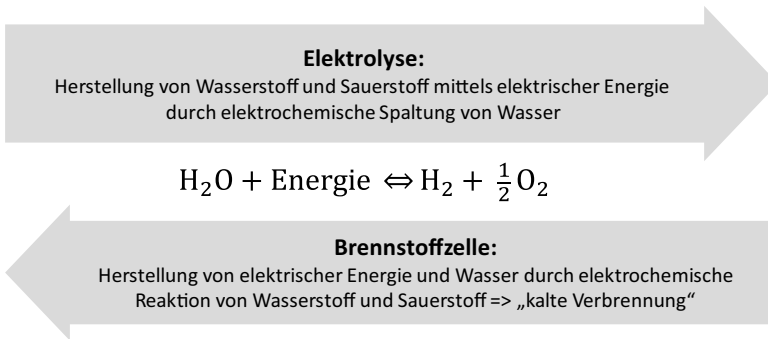


Bild 1.2 Reaktionsgleichung des grundsätzlich umkehrbaren Brennstoffzellenprozesses.

Während eine Mischung aus Wasserstoff und Sauerstoff, das sogenannte **Knallgas**, prinzipiell in sehr einfachen Elektrolysezellen aus blanken Metallplatten hergestellt werden kann, erfordern moderne Elektrolyse- und Brennstoffzellen die Trennung der Reaktionsgase durch eine **gasdichte Membran**. Mit der Erfindung einer stabilen Polymer-Elektrolyt-Membran (kurz: PEM), die gleichzeitig leitfähig für Ionen ist, kann dies heute in vielfältigen Brennstoffzellenanwendungen sichergestellt werden. Wie in Bild 1.3 schematisch dargestellt, werden Wasserstoff und Sauerstoff von zwei gegenüberliegenden Seiten an eine solche Membran herangeführt. Unmittelbar auf die Membran sind beidseitig feinporige **Elektroden** aufgebracht. Diese bestehen aus **Katalysatoren**, an denen die eigentlichen elektrochemischen Reaktionen ablaufen. Häufig werden hierfür Edelmetalle wie Platin und Iridium eingesetzt. Es gibt aber auch günstigere Alternativen wie Nickel, Eisenverbindungen und Kohlenstoff.

Die in Bild 1.2 dargestellte Gesamtreaktion ergibt sich hierbei aus zwei **Teilreaktionen** an den beiden Elektroden. Auf der linken Seite (hier: Anode) geht der Wasserstoff in Lösung, wobei Protonen (H^+ -Ionen) und Elektronen (e^-) entstehen:



Diese Ionen wandern nun durch die Membran zur gegenüberliegenden Sauerstoff-Elektrode. Die bei der Reaktion freigesetzten Elektronen (e^-) fließen über die elektrisch leitfähigen Zellmaterialien durch einen äußeren Stromkreis, wo sie in einem elektrischen Verbraucher Arbeit verrichten können. An der Sauerstoffelektrode (hier: Kathode) werden die Elektronen aufgenommen und sorgen gemeinsam mit den H^+ -Ionen für die Reduktion des Sauerstoffs, wobei Wasser entsteht:



Das Reaktionswasser wird mit dem Gasvolumenstrom abgeführt. In heutigen PEM-Brennstoffzellen wird hierzu mittels Kompressor ein geregelter Luftstrom mit Überschuss durch die Brennstoffzelle geführt.

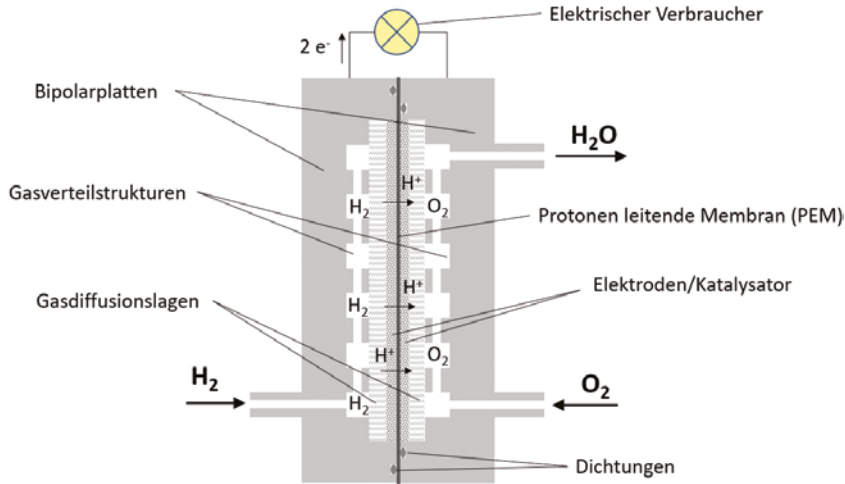


Bild 1.3 Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle mit protonenleitender Membran (PEM).

Für die Realisierung des Prozesses ist eine ausgeklügelte **Zellkonstruktion** erforderlich. Um die feinen Elektroden einerseits elektrisch zu kontaktieren und andererseits eine gute Gasversorgung zu gewährleisten, werden dünne Gasdiffusionslagen aufgepresst. Diese bestehen meist aus feinen Kohlefaserpapieren. Für die gleichmäßige Gasversorgung der Elektroden sind typischerweise meanderförmige Gasverteilstrukturen in mechanisch stabile Platten eingearbeitet. Man spricht von Bipolarplatten, wenn diese Platten auf zwei Seiten mit benachbarten Zellen in Verbindung stehen und von der einen Zelle den Minuspol und von der anderen Zelle den Pluspol darstellen. Da die elektrische Spannung einer typischen Brennstoffzelle lediglich 0,5 bis 1,0 Volt beträgt, werden für technische Anwendungen eine Vielzahl solcher Einzelzellen aufeinandergestapelt und mithilfe von stabilen Endplatten miteinander verschraubt. Einen solchen Zellstapel bezeichnet man aus dem Englischen kommend als Stack. Für mobile Anwendungen zum Beispiel im Pkw-Bereich werden Hunderte Einzelzellen zu großen Brennstoffzellen-Stacks in Reihe geschaltet, sodass elektrische Leistungen im Bereich von 100 kW zur Verfügung stehen.

Die aktuelle **Brennstoffzellenforschung** befasst sich vor allem mit der Optimierung der Zellmaterialien, damit die Haltbarkeit erhöht und die Herstellkosten gesenkt werden können. So wurde der Einsatz des teuren Edelmetalls Platin in den letzten beiden Jahrzehnten bereits auf ein Zehntel herabgesenkt. Während Bipolarplatten früher aufwendig aus massiven Grafitplatten gefräst wurden, werden sie heute aus dünnen beschichteten Edelstahlplatten ausgestanzt (Kurzweil 2016).

Heute haben Elektrolyse- und Brennstoffzellen einen hohen technologischen Reifegrad erlangt, sodass erste in Serie gefertigte Produkte in den Markt eingeführt

wurden. Bis zu einer massenhaften Anwendung mit niedrigen Herstellkosten und investitionsfreudigen Gewinnmargen im Wasserstoffgeschäft sind jedoch noch einige technologische und wirtschaftliche Anstrengungen und begünstigende politische Rahmenbedingungen erforderlich.

■ 1.3 Aktuelle Herausforderungen der Brennstoffzellentechnologie

Für die Realisierung von brauchbaren und kostengünstigen Elektrolyse- und Brennstoffzellen ist vor allem eine **Senkung der Herstellkosten** erforderlich. Das ist eine enorme wissenschaftlich-technische Herausforderung. Es beginnt bei hohen, teils widersprüchlichen Anforderungen an die Zellmaterialien zum Beispiel hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit, Gasdichtigkeit, Porosität, Wasseraufnahme und Korrosionsbeständigkeit. Vor allem auf der Sauerstoffseite von Elektrolyseuren mit sauren Membranen (PEM) herrscht ein so hohes korrosives Potenzial, dass praktisch nur massive Platten aus gefrästem Titan beständig sind. Die Herstellung ist entsprechend aufwendig und kostenintensiv. Zudem ist eine anspruchsvolle Dichtungstechnik erforderlich, die häufig nur in mühsamer Handarbeit realisiert werden kann. Enge Fertigungstoleranzen machen vor allem Zellstapel mit über hundert Zellen durch hohe Ausschussraten sehr kostspielig. Neben den Materialwissenschaften sind also hochspezialisierte und automatisierte Fertigungsverfahren gefragt, mit denen eine zuverlässige und kostengünstige Serienproduktion von Elektrolyse- und Brennstoffzellen-Stacks realisiert werden kann.

Eine weitere große Herausforderung liegt in der **Verbesserung der Effizienz** von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen, vor allem in Konkurrenz zu Batteriespeichern. Der vorangehend genannte geringe Speicherwirkungsgrad der Wasserstoffnutzung ergibt sich vor allem durch die Kombination verschiedener Teilprozesse (Herstellung, Verdichtung, Transport und Rückverstromung von Wasserstoff), die alle verlustbehaftet sind. Doch auch die Effizienz von Elektrolyseuren und Brennstoffzellen ist aktuell noch verbesserungswürdig. Während die PEM-Technologie große Vorteile in Bezug auf eine anwendbare Konstruktion und hohe Leistungsdichten aufweisen kann, sind in Bezug auf den maximal erzielbaren Wirkungsgrad elektrochemische Grenzen gesetzt. Vor allem die Sauerstoffreaktion läuft im sauren Milieu langsam und stark verlustbehaftet ab. Hier verzeichnet die alkalische Technologie einige Vorteile. Zum einen können hiermit deutlich höhere Wirkungsgrade erzielt werden, zum anderen können günstige Katalysatoren aus Nickel eingesetzt werden. Alkalische Elektrolyseure stellen daher heute noch den Stand der Technik dar, auch wenn die PEM-Technologie auf dem Vormarsch ist.

Alkalische Brennstoffzellen in der klassischen Bauweise sind durch den Einsatz von flüssiger Kalilauge unpraktisch in der Anwendung und weisen zu geringe Leistungsdichten auf. Die Entwicklung stabiler alkalischer Membrane (*Anion Exchange Membrane*, AEM) für hohe Wirkungsgrade bei gleichzeitig hohen Leistungsdichten ist aktueller Forschungsgegenstand (Xue et al. 2022).

Ein weiterer essenzieller Punkt ist die **Umweltverträglichkeit** bei der Herstellung von Elektrolyse- und Brennstoffzellen. So setzen Platin und vor allem Iridium, das für die PEM-Elektrolyse benötigt wird, hohe CO₂-Emissionen bei der bergbaulichen Gewinnung frei. Diese Emissionen und der Energieaufwand sollten in der ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse mitberücksichtigt werden. Weiterhin basiert der Membrangrundstoff auf einer chemischen Fluorverbindung (PTFE) aus fluorierten Kohlenstoffgerüsten. **Fluorverbindungen** sind in jüngster Zeit unter kritische Beobachtung geraten, da sie in zunehmender Konzentration in der Umwelt auftauchen und die Auswirkungen nicht abschätzbar sind. Auch Brennstoffzellen können aus dem „Auspuff“ über verbrauchte Luft und Wasser Abrieb aus den fluorierten Kohlepapieren und der PTFE-vernetzten Elektroden-Membran-Verbindung nach draußen befördern, sodass diese in die Umwelt gelangen. Aus diesen Gründen wird unter anderem die **alkalische Elektrolyse- und Brennstoffzellentechnologie** weiterentwickelt, die ohne Platin und Iridium auskommt und mit Nickeln und Silberelektroden arbeitet. Die Membrane basieren zudem auf einer andersartigen Molekülstruktur aus Kohlenstoffringen, die ohne PTFE auskommt. Hinzu kommt der Vorteil des nennenswert höheren Wirkungsgrads mit der alkalischen Technologie. Ihr soll aufgrund des zukunftssträchtigen Potenzials in puncto Energieeffizienz ein besonderes Augenmerk im Rahmen des Buches zukommen.

Im Gegensatz zu Batterien weisen Elektrolyse- und Brennstoffzellen eine hohe **Systemkomplexität** auf. Während Batterien einfach aus aufeinandergestapelten oder zusammengrollten flachen Zellmaterialien hergestellt werden, muss bei Brennstoffzellen immer die gesamte Gastechnik mit aufgebaut werden. Wasserstoff muss in Drucktanks mitgeführt und über Druckminderer und Ventile den einzelnen Zellen gleichmäßig zugeführt werden. Mittels Kompressoren werden die Zellen mit Luftsauerstoff versorgt, der allerdings genau geregelt werden muss, um ein Absaufen oder Austrocknen der empfindlichen Membrane zu verhindern. Die Temperierung erfolgt mittels zusätzlicher Pumpen und Kühlkreisläufe. Über teure Leistungselektronik erfolgt die Anpassung der Spannungsniveaus an das Verbrauchersystem. Bei der Wasserstoffherstellung muss neben der Realisierung der Elektrolytkreisläufe eine aufwendige Gasreinigung vorgesehen werden. Die Verdichtung des Wasserstoffgases erfolgt in der Regel mit schweren Kompressoren, die energie- und wartungsaufwendige Maschinen darstellen. Aus diesen Gründen fällt es momentan schwer, die **Wasserstofftechnologie** zu verkleinern und zu vereinfachen. Die Tendenz geht daher zur Projektierung von industriellen Großanlagen mit hohen Durchsätzen, da sich die aufwendige Anlagentechnik hier schneller amorti-

sieren lässt. Brennstoffzellen-Pkw lassen sich heute in Europa noch nicht zu wettbewerbsfähigen Preisen herstellen. Deutschland sollte jedoch aufpassen, dass ein noch bestehender **technologischer Vorsprung** nicht verspielt wird, nur weil derzeit hohe Kosten gescheut werden. In Japan, Südkorea und China beobachtet man aktuell deutlich stärkere Aktivitäten in der Vermarktung erster serienreifer Pkw mit Brennstoffzellenantrieb. In China haben gleich mehrere Automobilhersteller angekündigt, bis zum Jahr 2030 rund eine Millionen Brennstoffzellen-Pkw auf die Straßen zu bringen.

Auch wenn die Aufwände und Kosten der Wasserstofftechnik derzeit noch zu hoch liegen, um attraktive Gewinne zu erzielen, so ist die Technologie dennoch ein **unverzichtbarer Baustein für die Energiewende**. Wasserstoff als erneuerbarer Energieträger wird zwangsläufig für die Stabilisierung der Stromnetze, als Treibstoff für den Verkehr und für die chemische Industrie benötigt. Aus diesen Gründen gibt es nun sowohl auf europäischer Ebene als auch in Deutschland **politische Vorgaben**, die zum Beispiel in Form einer Wasserstoffstrategie niedergeschrieben sind. Demnach sollen bis zum Jahr 2030 in der Europäischen Union 40 Gigawatt Elektrolysekapazität und in Deutschland 10 Gigawatt installiert werden. Neben der Entwicklung von Fahrplänen und Zielvorgaben und dem Aufbau strategischer Netzwerke hat die Bundesregierung nun insgesamt 900 Millionen Euro für die Förderung von Wasserstoffprojekten zugesagt. Gefördert werden in der Regel Einzelvorhaben von Unternehmen und Forschungsinstituten, wobei der Schwerpunkt auf der großindustriellen Herstellung von Wasserstoff liegt. Eine besondere Hoffnung liegt im **Import von grünem Wasserstoff** aus sonnenreichen Gegenden der Erde. So könnte beispielsweise in Chile oder Saudi-Arabien Wasserstoff aus günstigem Solarstrom hergestellt und dann tiefkalt verflüssigt per Schiff nach Deutschland transportiert werden. Neben den technischen Schwierigkeiten und den großen Verlusten durch den Transport besteht die große Herausforderung im Aufbau einer solchen Technologie in Ländern, die keine vergleichbare technische Infrastruktur wie Deutschland vorweisen können. Projekte dieser Art werden daher vermutlich ein bis zwei Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Für die chemische Industrie mit einem enormen Bedarf an Wasserstoff zum Beispiel für die Stahl- und Glasherstellung wird es mittelfristig allerdings kaum eine Alternative geben.

In kleinerem Maßstab ließen sich allerdings auch in Deutschland sehr viel schneller nennenswerte Kapazitäten an Wasserstofferzeugern oder Brennstoffzellen aufbauen, wenn ein **dezentraler Ansatz** verfolgt und unterstützt würde. In landwirtschaftlichen Betrieben, Kleingewerben oder gar in Privathäusern könnte dann mittels kleiner Elektrolysegeräte Wasserstoff aus überschüssigem Photovoltaikstrom produziert und in das Erdgasnetz oder ein reines Wasserstoffnetz eingespeist, selbst bevorratet oder an Tankstellen geliefert werden. Vergleichbar mit dem EEG (Erneuerbare-Energien-Gesetz) würde hierzu eine Art **Wasserstoff-Umlage** benötigt werden, mit der die Investitionskosten bezuschusst werden. Mit ei-

nem geschickt ausgearbeiteten Wirtschaftsmodell könnten so deutlich schnellere Effekte erzielt werden als mittels Förderung über bürokratisch aufwendige und langwierige Einzelvorhaben. Gleichzeitig würden nicht nur Großindustrieunternehmen, sondern vor allem der **Mittelstand und das Handwerk** und damit die breite Masse von der Herstellung und Installation der Geräte profitieren.

Bild 1.4 zeigt die Entwicklung und die Kosten von Brennstoffzellen-Heizgeräten in Japan, bei denen eine anfängliche Förderung mit sinkenden Herstellkosten sukzessive heruntergefahren werden konnte.

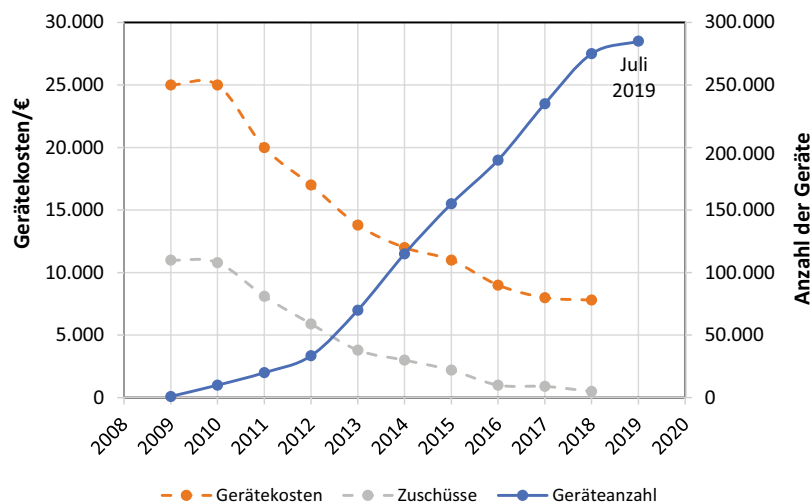


Bild 1.4 Markteinführung von Brennstoffzellen-Heizgeräten (Mikro-KWK) in Japan; vereinfachte Darstellung mit Daten vom DLR, in Anlehnung an Mitzel/Friedrich 2020.

Darüber hinaus scheint das **Umdenken** in den Köpfen eine große Anstrengung zu bereiten. So wird aktuell sehr viel über Wasserstoff geredet, teilweise nur vor dem Hintergrund, ein Greenwashing des eigenen Unternehmens zu betreiben. Andererseits verkünden Automobilhersteller lautstark, dass die Brennstoffzelle tot sei, oder Wärmepumpenproduzenten, dass Wasserstoff keine Lösung für den Wärmemarkt ist. Offensichtlich wird hier ein technisches Thema politisiert, um eine mögliche Konkurrenz für die hauseigene Technologie zu blockieren. Tatsächlich ist ein kleines, umweltfreundlich geladenes Batterieauto effizienter als ein komplexer Brennstoffzellen-Pkw, und auch ein Haus sollte vorrangig mit einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe geheizt werden, bevor man kostbaren Wasserstoff verbrennt. Doch es wird auch Zeiten geben, in denen das elektrische Netz an seine Grenzen kommt, der Strompreis sprichwörtlich durch die Decke geht und Brennstoffzellen sowie Wasserstoff unersetzlich sind. Die Konzentration auf nur einen Energieträger ist heute nicht mehr zeitgemäß. Mit welchen prozentualen Anteilen

sich die Märkte künftig etablieren werden, kann heute niemand genau voraussagen. Doch mit Sicherheit werden immer mehrere unterschiedliche Technologien nebeneinander existieren und zu unterschiedlichen Zeiten ihre Vorteile ausspielen.

Um diese Zusammenhänge zu vertiefen, bedarf es also neben dem technischen Verständnis auch einer ganzheitlichen Herangehensweise bei der Ausbildung in wissenschaftlichen und technischen Berufen.

■ 1.4 Aufbau dieses Buches

In den meisten Fachbüchern für Ingenieurinnen und Ingenieure sucht man vergeblich eine Vision, und die Motivation ist auf wenige Sätze zu steigender Effizienz sowie sinkenden Herstellkosten beschränkt. Doch vor welchem historischen Hintergrund entwickelt sich die globale Energienutzung? Und welches wirklich nachhaltige Ziel strebt die Menschheit an? Mit dieser **Vision** beginnt das Buch (Kapitel 2).

Ein tieferes wissenschaftliches Verständnis über die **Naturgesetze der Energie** erhalten Sie in Kapitel 3. Mit den Begriffen Exergie und Entropie gelingt es, Energieformen zu bewerten. Darüber hinaus werden die exponentiellen Zusammenhänge zwischen Energie, Syntropie und Information hergestellt.

Von den großen Energieströmen geht es nun tief hinein in die molekulare Ebene. In Kapitel 4 werden die Grundlagen der **Thermodynamik und Elektrochemie** einer Brennstoffzelle Schritt für Schritt auf ausführliche und anschauliche Weise anhand vieler Abbildungen erklärt. Das chemische Potenzial, die Ruhespannung und die Überspannungen werden dargestellt. Hier wird Ihnen auch das **physikalische Rüstzeug** zur Berechnung von Stoffumsatz, Energie- und Gasströmen geliefert. Zudem wird das Verständnis erlangt, warum poröse Gaselektroden deutlich effizienter Wasserstoffgas erzeugen als blanke Metallbleche.

Mit verschiedenen Elektrolyten lassen sich auch unterschiedlichen **Brennstoffzellentypen** bauen, auf welche in Kapitel 5 eingegangen wird. So arbeitet die klassische alkalische Brennstoffzelle, die bereits zum Mond geflogen ist, mit flüssiger Kalilauge. Aufgrund der besonders hohen Wirkungsgrade und der anschaulich darstellbaren physikalischen Mechanismen ist sie auch heute noch wissenschaftlich interessant und ein spannendes Objekt für die Ausbildung. Die moderne PEM-Brennstoffzelle trumpft hingegen mit einer sehr hohen Leistungsdichte auf und bietet zahlreiche Anwendungsbeispiele. Die Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) ist weniger empfindlich gegenüber unsauberem Gas und eignet sich vor allem für (Klein-)Kraftwerke.

Für die Konstruktion und den Betrieb von Brennstoffzellensystemen sind weitreichende Kenntnisse im Bereich **Mechatronik und Systemtechnik** erforderlich, die in Kapitel 6 vermittelt werden. Mechanische Konstruktion, Verfahrenstechnik und vor allem auch Messtechnik, Elektronik und Informationsverarbeitung werden daher mit anwendungsorientiertem Bezug auf die Brennstoffzellensystemtechnik dargestellt.

Der **Wasserstofftechnik** ist ein eigenes Kapitel gewidmet (Kapitel 7). Hier geht es um die physikalischen Eigenschaften dieses sehr leichten und brennbaren Gases. Wie wird Wasserstoff komprimiert oder gar verflüssigt, oder wie kann er chemisch gebunden werden? Die Speicherung und der Transport von Wasserstoff sind wesentliche technische Voraussetzungen für den Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft.

In Kapitel 8 werden die zuvor erarbeiteten Komponenten wie Elektrolyseure, Wasserstoffkomponenten und Brennstoffzellen in einem ganzheitlichen Ansatz in ein mögliches künftiges Energiesystem integriert. Der **Energieatlas Deutschland** beschreibt das Zusammenspiel der unterschiedlichen regenerativen Energiesysteme in einem sinnvollen Zukunftsszenario. Dem System Brennstoffzelle wird hierbei eine Schlüsselrolle bei der Sektorenkopplung zwischen elektrischer Energie, chemischer Energie und Wärmeenergie zugeschrieben.

Doch inwieweit sind hierzu **wirtschaftliche** und **politische Rahmenbedingungen** erforderlich? Reichen die aktuellen Strategien, Vorgaben und Gesetze aus, oder müssen diese erweitert oder gar neue geschaffen werden? Dies wird in Kapitel 9 diskutiert.

Den Abschluss bildet ein **Ausblick** in Kapitel 10, in dem noch einmal auf die eingangs aufgestellte Vision eingegangen wird. Inwieweit trägt das System Brennstoffzelle dazu bei, die Energienutzung der Menschheit auf eine umweltfreundliche und langfristig nachhaltige Wirtschaftsweise umzustellen, und welche Rolle spielt die Solarenergie dabei?

Literatur

Kurzweil, P.: Brennstoffzellentechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden 2016

Kurzweil, P./Dietlmeier, O. K.: Elektrochemische Speicher. Springer Vieweg, Wiesbaden 2015

Mitzel, J./Friedrich, K. A.: Wasserstoff und Brennstoffzellen. Nationale Wasserstoffstrategie. In: BWK Energie, Bd. 72, Nr. 12, 2020

Nieswand, J.: Für Klimaschutz und Energieversorgung – mit Wasserstoff sauber in die Zukunft. Podcast mit Prof. Enno Wagner. hr-inforadio.de, 12.08.2022. <https://www.hr-inforadio.de/podcast/bilanz/fuer-klimaschutz-und-energieversorgung-mit-wasserstoff-saube-in-die-zukunft,podcast-episode-106522.html>

Mainzer Stadtwerke AG: Energiepark Mainz. <https://www.energiepark-mainz.de>

Sternberg, A./Hank, C./Hebling, C.: Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) 2019

- Wagner, E.: Der Champagner der Energiewende – Wasserstoff ist ein unverzichtbares Element für die künftige Energielandschaft. In: Forum Nachhaltig Wirtschaften, 03/2022 (ISSN 1865-4266)
- Wagner, E.: Die Energiewende als Chance für inklusives Wachstum in Deutschland. transforming-economies.de, Bertelsmann Stiftung, 08.12.2021. <https://transforming-economies.de/die-energiewende-als-chance-fuer-inklusive-wachstum-in-deutschland>
- Wagner, E.: Ist Wasserstoff wirklich eine Alternative zu den fossilen Energieträgern? DieLinde.online, 23.09.2021. <https://dielinde.online/16027/ist-wasserstoff-wirklich-eine-alternative-zu-den-fossilen-energietraegern>
- Wagner, E.: Wasserstoff – der Stoff der Zukunft. Scinexx.de, 01.09.2020. <https://www.scinexx.de/businessnews/wasserstoff-der-stoff-der-zukunft>
- Xue, J./Zhang, J./Liu, X./Huang, T./Jiang, H./Yin, Y./Qin, Y./Guiver, M. D.: Toward alkaline-stable anion exchange membranes in fuel cells: cycloaliphatic quaternary ammonium-based anion conductors. In: Electrochem. Energy Rev 5, 2022, S. 348–400



Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.

Für eine ganzheitliche Betrachtung unserer Energiesysteme soll in diesem Kapitel die historische Entwicklung der menschlichen Energienutzung beleuchtet werden. Hierbei wird ersichtlich, dass praktisch alle vergangenen Kulturen der Menschheitsgeschichte **solare Zivilisationen** waren. Das bedeutet, die technische Energienutzung basierte im Wesentlichen auf Energieflüssen, die mehr oder weniger direkt von der Sonne bereitgestellt werden. So sind auch Wind- und Wasserkraft über das Wettergeschehen indirekt von der Sonne angetrieben. Holz und Getreide sind solare Energiespeicher. Auch die fossilen Energieträger basieren auf Rohstoffen solaren Ursprungs, die sich über Jahrmillionen aufkonzentriert haben. Ihre Nutzung ermöglichte einen rasanten technologischen Aufschwung für die gesamte menschliche Zivilisation. Um jedoch der damit einhergehenden Verschmutzung unserer Biosphäre Einhalt zu gebieten, werden die Menschen möglichst zeitnah auf eine direkte Nutzung der Solarstrahlung umsteigen müssen. Vor allem für lange Phasen der Dunkelheit im Winter und in der Nacht wird solarer Wasserstoff ein vielversprechender Energiespeicher der Zukunft sein. Als längerfristige Vision steht die industrielle Erschließung der Solarenergie im Weltraum an.

■ 2.1 Frühe solare Zivilisationen

Angetrieben von der Kraft der Sonne, wurde den frühen Menschen zunächst jede Menge frische Luft, klares Wasser und eine Vielfalt an Früchten, Getreiden, Jagdtieren und Fischen bereitgestellt. Vor allem an der Ostküste Afrikas stand in Form von kleinen Meerestieren eine sehr proteinreiche Nahrungsquelle zur Verfügung, die vermutlich begünstigend für die Heranbildung des großen Gehirns gewesen ist. Wahrscheinlich nutzten die ersten Menschen die größte Kapazität ihres Intellektes für die Entwicklung der Sprache zur zwischenmenschlichen Kommunikation im Rahmen eines gesellschaftlichen Zusammenlebens. Hier entstanden bereits frühe Formen der Religion zur Deutung unverständlicher Naturphänomene.

Eine weitere solare Kraftquelle entfaltete sich schließlich gegen Ende der letzten Eiszeit in den Flussebenen von **Mesopotamien**, dem sogenannten Zweistromland. Von andauernden Regenfällen heimgesucht, wuchsen hier ausufernde Felder mit **Wildgetreide** heran. Diese bedeutsame Konzentration von biologisch gespeicherter solarer Energie, die auf einmal den damaligen Bewohnern in Form eines Getreidebreis zur Verfügung stand, wurde so zu einer zuverlässigen und leistungsstarken Nahrungsquelle – und somit zum Treibstoff für die Erschaffung erster „übermenschlicher“ Bauten. Menschliche Sklaven mussten auf diese Weise maschinenähnlich eingesetzt und mit solarem Kraftstoff versorgt werden, um aus schweren Steinblöcken prächtige Gebäude mit bewässerten Gärten und komplette Städte zu errichten. Die Arbeitsteilung macht hier beispielsweise die theoretische Durchplanung eines ausgeklügelten hydraulischen Systems zur Bewässerung der wundervollen **Gärten** möglich, die als „Hängenden Gärten von Babylon“ als eines der sieben Weltwunder der Antike gelten (Bild 2.1).



Bild 2.1 Die hängenden Gärten von Babylon gelten als eines der sieben Weltwunder. Die Abbildung zeigt ein historisches Gemälde der Gärten von Martin Heemskerck, einem niederländischen Künstler aus dem 16. Jahrhundert (© Wikimedia Commons, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hanging_Gardens_of_Babylon.jpg).

Im östlichen Mittelmeerraum bildete sich schließlich um 1600 v. Chr. die Hochkultur des **antiken Griechenlandes**, das maßgeblich auch unsere heutige Zivilisation mitgeprägt hat. Begünstigt durch ein mildes und stabiles Mittelmeerklima, konnten sich nicht nur die Kunst des Städtebaus und das kulturelle Zusammenleben entfalten, sondern auch fundamentale wissenschaftliche Disziplinen wie Logik, Dialektik und Rhetorik. Astrologie, Mathematik und Philosophie waren so weit entwickelt, dass bereits tiefgehende Gedanken über die Bewegungen des Sonnensystems und die Materie diskutiert wurden. Es gab Unterteilungen von Himmelssternzeichen in die vier Elemente Erde, Wasser, Luft und Feuer. Der Philosoph De-

mokrit formulierte noch vor Aristoteles, dass sich alles auf winzige unzerstörbare Teilchen zurückführen lasse. Diese nannte er Atome (griechisch für „unteilbar“, vgl. Kaku 2021).

Doch die frühen **Hochkulturen** lebten längst nicht immer im Einklang mit der Natur und bewirtschafteten sie wenig rücksichtsvoll. Die Tatsache, dass die Mittelmeerregion heute praktisch waldfrei ist, hat ihren Ursprung vermutlich in der Zeit, als die Griechen und später die **Römer** die Jahrtausende alten Eichen-Urwälder kurzerhand abholzten, um ausreichend Bauholz für ihre mächtigen Kriegsflotten zu gewinnen. Sie griffen praktisch erstmals auf ein Zeitkonto der Natur zurück. Zudem ist der Reichtum im antiken Rom unter anderem darauf zurückzuführen, dass sehr große umliegende Gebiete ausgebeutet wurden, die halb Europa durchzogen. Eine aufwendig zu unterhaltende Infrastruktur an Verkehrswegen, Fahrzeugen und Sicherungsposten war erforderlich, um Rohstoffe, landwirtschaftliche Erzeugnisse und sonstige erbeutete Güter über weite Entfernungen nach Rom zu transportieren. Als das Klima im dritten Jahrhundert nach Christus wechselhafter und kühler wurde, geriet vermutlich auch die Stabilität der Infrastruktur ins Wanken, und das riesige Reich konnte nicht mehr richtig versorgt werden.

Die unruhigen Zeiten der Völkerwanderung fallen wohl zusammen mit einer Phase starker Klimaschwankungen. Erst im siebten Jahrhundert stabilisierte sich das Klima offensichtlich wieder, was den kulturellen Aufstieg des Mittelalters begünstigte. Es lassen sich also Indizien dafür erkennen, wie sehr die frühen Hochkulturen von klimatischen Verhältnissen abhängig waren. Doch auch die eher dezentralen mittelalterlichen Strukturen mit verhältnismäßig kleinen Fürstentümern schienen stabiler als die großräumig angelegten zentralistischen Imperien zu sein. Die Versorgung mit Nahrungsmitteln, Kleidung, Werkzeugen und Baumaterialien konnte überwiegend in der Region erfolgen. Lediglich bestimmte kostbare Güter wie Salz, Gewürze, Edelmetalle usw. wurden über die weitreichenden Handelswege importiert, teils aus dem Orient oder sogar aus China.

Mit dem **aufblühenden Handwerkswesen** konnten immer bessere Geräte und Maschinen entwickelt werden, um dem Menschen die Arbeit zu erleichtern. Der Pflug zum Aufbrechen des Erdbodens durch Zugtiere, aber auch die ersten Windmühlen zum Antreiben der schweren Mühlsteine sind Beispiele hierfür. In besonders vorteilhafter Weise ist die **Nutzung der Wasserkraft** zu nennen (Bild 2.2). Durch die Fähigkeit des Waldbodens, Regenfälle über Wochen und Monate zu speichern und das Wasser dabei in einem weitestgehend gleichmäßigen Strom wieder abzugeben, stand eine sehr zuverlässige erneuerbare Kraftquelle zur Verfügung, die mittels Staubecken und Wasserrädern erschlossen werden konnte. Hochwertigste mechanische Energie stand somit für den Betrieb von Sägewerken und anderen Maschinen zur Verfügung.

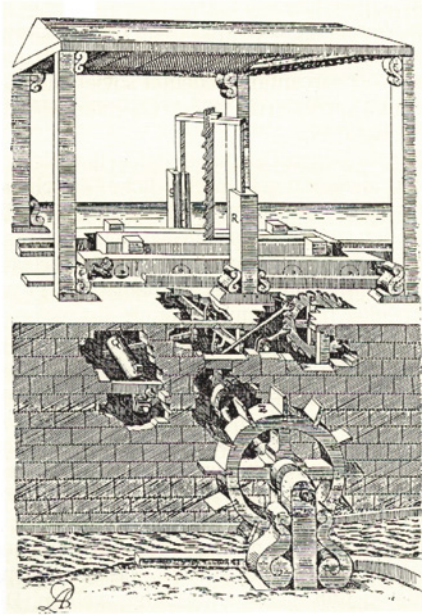


Bild 2.2 Mit Wasserkraft angetriebene Werkzeugmaschinen wurden im 16. und 17. Jahrhundert immer ausgefeilter. In der Abbildung ist eine Gattersäge zum Schneiden von Dielen und Brettern aus dem Jahr 1620 zu sehen. Das Wasserrad treibt nicht nur die Hubbewegung des Sägeblattes, sondern auch den Vorschub des zu bearbeitenden Holzstückes (Bildquelle: Paturi et al. 1997).

Die **Holzwirtschaft** wuchs stark an, denn neben Natursteinen und ersten qualitativen Eisenwerkstoffen wurde Holz zum begehrten solaren Baustoff des Mittelalters. Nicht nur Scheunen, Schutzzäune, Wohnhäuser und Kirchen wurden daraus gebaut, auch Brücken und Fahrzeuge sowie Werkzeuge und komplexe Maschinen konnten damit konstruiert werden. Mit an Förderbändern aufgehängten Wasserbehältern konnten so automatisch laufende Pumpsysteme gebaut werden – eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb von Bergwerksstollen, in die fortlaufend Grundwasser einsickerte. Folglich konnten nun metallische Erze für die immer wichtiger werdenden **Eisen- und Stahlerzeugnisse** abgebaut werden. Doch auch Kohle wurde auf diese Weise erschlossen, denn für die Herstellung von Roheisen waren sehr große Mengen an Holzkohle erforderlich. Eisen und Stahl wurden immer wichtigere Rohstoffe. Im Jahr 1687 veröffentlichte der britische Naturwissenschaftler **Isaac Newton** (1642–1727) seine *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, kurz *Principia*, und legte damit die Grundsteine der klassischen Mechanik, indem er die Bewegungssätze formulierte und die Infinitesimalrechnung erfand, was vor allem für Maschinen und für die Baukunst von Bedeutung war.

Gegen Ende des 17. Jahrhunderts kam es dann offensichtlich erneut zu starken klimatischen Schwankungen. Nach mehreren sehr trockenen Sommern und anschließenden Borkenkäferplagen brachen die wirtschaftlich wichtigen Fichtenholzbestände dramatisch ein, sodass es zu einer Rohstoffknappheit kam. In dieser Zeit formulierte der sächsische Forstwirtschaftler Carl von Carlowitz zum ersten Mal den Begriff der **Nachhaltigkeit**.



Nachhaltigkeit

Hans Carl von Carlowitz (1645–1714), Oberberghauptmann am kursächsischen Oberbergamt in Freiberg, gilt als Begründer des Prinzips der Nachhaltigkeit. Angesichts einer drohenden Holzverknappung am Ende des 17. Jahrhunderts formulierte von Carlowitz 1713 in seinem Werk „*Sylvicultura oeconomica*“ erstmals, dass immer nur so viel Holz geschlagen werden sollte, wie durch planmäßige Aufforstung wieder nachwachsen kann. Damit legte er den Grundstein für die deutsche Forstwirtschaft und das Prinzip des nachhaltigen Umgangs mit Rohstoffen (Deutscher Forstwirtschaftsrat e. V. 2021).

Im Anschluss hieran erfolgte dann eine deutliche Klimaabkühlung, die als kleine Eiszeit bekannt ist. Vor allem kühle andauernde Niederschläge in den Sommermonaten, gefolgt von langen schneereichen Wintern ließen die bereits zurückgegangenen Gletscher in den Alpen wieder stark anwachsen. Man kann sich gut vorstellen, wie mühsam und kräftezehrend selbst im Flachland der Transport von Gütern mittels Pferdewagen und Ochsenkarren auf den tief verschlammten Waldwegen gewesen sein muss. Der neue Rohstoff Kohle, mit seiner hohen Energiedichte, aber auch einem hohen spezifischen Gewicht, ließ sich auf den mittelalterlichen Holzkarren nicht mehr angemessen transportieren. Eine neue Antriebsmaschine und eine komplett neue Infrastruktur mussten für den neuen Energierohstoff erfunden werden.

■ 2.2 Fossiles Industriezeitalter

Vor rund 300 Millionen Jahren kam es im sogenannten Karbon (auch Steinkohlezeitalter) zu einer weitflächigen Ausbreitung der Pflanzenwelt auf den frühen Kontinenten der Erde, verbunden mit einer exponentiellen Artenzunahme. Im damals tropischen Klima brachen tief wurzelnde Wälder erstmals den Erdboden auf und banden große Mengen Kohlendioxid aus der Atmosphäre, was letztlich auch zu einer deutlichen Klimaabkühlung führte. Die Biomasse wurde durch Erosion mit Erde zugedeckt und unter Druck sprichwörtlich versteinert. Die hierbei entstandenen Reserven an **Braun- und Steinkohle** sind so immens, dass diese selbst bei gleichbleibend hoher aktueller Förderung den weltweiten Bedarf noch über 250 Jahre decken könnten. Die erstmalige großtechnische Erschließung dieses gewaltigen Energiesparkontos der Erdgeschichte ist mit dem Beginn der Industrialisierung in Europa gleichzusetzen und wurde durch die Erfindung einer technisch nutzbaren Verbrennungskraftmaschine eingeleitet.

2.2.1 Kohle, Eisen und Dampf

Die erste verwendbare **Dampfmaschine** stammte von Thomas Newcomen aus dem Jahr 1712 und wurde für das Abpumpen des Wassers aus einem Kohlebergwerk eingesetzt. Hierbei wurde ein Kolben zunächst durch Wasserdampf aus einem kohlenbefeuerten Kessel nach oben gedrückt. Anschließend wurde kaltes Wasser in den Kolben gespritzt, wodurch der Wasserdampf auskondensierte und der Kolben wieder nach unten gezogen wurde. Der Kondensator befand sich also im Kolben, wodurch die damit einhergehende Materialbeanspruchung durch das thermische Wechselbad immens gewesen sein muss. Der Wirkungsgrad dieser ersten Dampfmaschine wird auf 0,5 Prozent geschätzt.

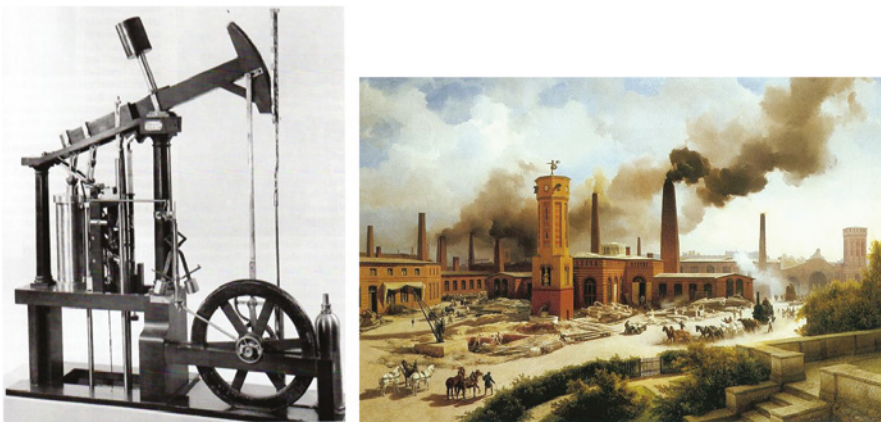


Bild 2.3 Industrialisierung: Watt'sche Dampfmaschine als doppelwirkende Niederdruckmaschine mit Schwungrad (links) und Fabrik zur Fertigung von Lokomotiven (rechts); Bildquellen: Paturi et al. 1997 (links) und https://www.kinderzeitmaschine.de/fileadmin/user_upload/Neuzeit/Nationalstaaten/industrialisierung_01.jpg (rechts).

James Watt (1736–1819) verbesserte die Dampfmaschine entscheidend durch einen doppelwirkenden Kolben, der für beide Bewegungsrichtungen mit Dampf beaufschlagt werden konnte (Bild 2.3). Weiterhin verlegte er den Kondensator nach außen und erfand ein Kurbelgetriebe, sodass erstmals eine Kreisbewegung mit einem Schwungrad erzeugt werden konnte. Die **Watt'sche Dampfmaschine** kam auf einen Wirkungsgrad von rund 3 Prozent. Diese enorme Einsparung an Brennstoff gegenüber den Modellen von Newcomen verschaffte der Dampfmaschine damit erstmals einen großen wirtschaftlichen Erfolg. Zunächst wurden die neuen Maschinen im **Bergbau** eingesetzt. Durch weiter verbesserte Pumpen und Förderanlagen konnten so die fossile Steinkohle und Eisenerz in immer größeren Mengen erschlossen werden. Das **Hüttenwesen** zur Herstellung von technischem **Eisen und Stahl** blühte auf. Über die Dampfschifffahrt und das großräumige Entstehen

der Eisenbahngesellschaften konnte schließlich eine komplett neue Infrastruktur aufgebaut werden, die für den neuen Energierohstoff Kohle sowie schweres Eisen-erz in idealer Weise geschaffen war. Stählerne Schienen ermöglichten das problemlose Bewegen von tonnenschweren Güterwagen, und in Kombination mit geschlossenen Personenwaggons machte man sich vom Wetter unabhängig. Jetzt wurden ganze **Großstädte** aus dem Boden gestampft, die über das neue Transportsystem sicher mit der leistungsstarken Energiequelle Kohle versorgt wurden. Die Stahlindustrie wurde zum wichtigsten Wirtschaftszweig unter anderem als Zulieferer für das **Eisenbahnwesen** und den entstehenden Maschinenbau.

Die **Industrialisierung** der Warenproduktion begann zunächst im Bereich der Tuchherstellung durch automatisierte Spinnereien und mechanische Webstühle. Andere Produktionsbetriebe zogen nach. Mit massenhaft hergestellten Ziegelsteinen, Stahlträgern und Glasfenstern konnten jetzt riesige industrielle Produktionshallen aufgebaut werden. Mit der Erfindung der elektrischen Glühbirne und des elektrotechnischen Systems durch Alva Edison (1847–1931) war man jetzt sogar von der Tageszeit unabhängig. Für die hart arbeitenden Menschen waren diese Errungenschaften zunächst nicht unbedingt positiv. Hatten sie im feudalen System des Mittelalters zwar den zehnten Teil ihrer Ernte an den Lehnsherren abgeben müssen, so lebten und arbeiteten sie doch meist eigenständig, im Kreis der Familie, in dörflichen Sozialstrukturen und weitestgehend in der freien Natur. In den industrialisierten Großstädten lebten oft ganze Großfamilien eingepfercht in winzige Zimmer, unter teils katastrophalen hygienischen Bedingungen. Ihre Lohnarbeit in den Fabriken beanspruchte praktisch den gesamten Tag und sicherte gerade mal das pure Überleben, sodass es den Arbeitern unmöglich war, eigenes Kapital aufzubauen. Die Besitzenden bildeten nun eine neue Schicht, die mit vorhandenen Geldmitteln und Bildung aus Adel und Kirche hervorgegangen war: das Bürgertum, die Bourgeoisie (das Besitzbürgertum). Mit einer neuen Ökonomieform, dem **Kapitalismus**, konnten die Besitzenden mit ihren Produktionsanlagen durch die Ausbeutung der Arbeitskraft und durch die enormen Energiemengen, die aus den fossilen Brennstoffen freigesetzt wurden, große Profite erwirtschaften, wodurch wiederum ihr eigenes Kapital vermehrt wurde. Die Lehren von Karl Marx (1818–1883) und Friedrich Engels (1820–1895) und die Gesellschaftsformen des **Sozialismus** waren Versuche, gegen diese inhärente Ungerechtigkeit anzugehen. Erst mit den modernen Gewerkschaften konnten die Bedingungen der Arbeiter auch in den westlichen Industrienationen deutlich verbessert werden. Die Klassengesellschaft gibt es ihn ihren Grundzügen jedoch weiterhin.

Mit der starken Konzentration von Menschen, Material und Energie auf engstem Raum wuchs auch das **Entsorgungsproblem** in den Städten dramatisch an. Es zeigte sich schnell, dass eine gesunde und reibungslos funktionierende Wirtschaft nur gegeben ist, wenn einerseits die Zufuhr von Rohstoffen, Frischwasser und Energie und andererseits die Abfuhr von Abgasen, Abfällen und Abwasser tech-

nisch geregelt ist. Gedacht wurde allerdings lediglich bis an die Stadtgrenze. Es herrschte die Politik der hohen Schornsteine vor. Dass Böden, Flüsse und die Atmosphäre nicht unbegrenzt Schadstoffe aufnehmen können, lag damals noch außerhalb der Vorstellungskraft. Neben der dezentralen Beheizung der neuen Wohnblöcke durch Kohleöfen mit mehrzügigen Kaminschächten entwickelte sich folglich auch der **Rohrleitungsbau** zu einem neuen unverzichtbaren Industriezweig, mit dem die immer komplexere Ver- und Entsorgung sichergestellt wurde. Aufbereitetes Trinkwasser musste jederzeit bis in die obersten Stockwerke der Gebäude gepumpt werden können und das Abwasser zuverlässig abgeführt werden. Rohre eigneten sich aber auch für das Leiten von Dampf und Flüssigkeiten wie Chemikalien – und vor allem Öl, dem neuen und noch besseren Energierohstoff.

2.2.2 Erdöl und Erdgas

Mit der Erschließung der großen Erdölfelder erreichte das fossile Energiezeitalter eine weitere Stufe der technischen Zivilisation. **Erdöl** hat seinen Ursprung in Meereskleinstlebewesen, hauptsächlich abgestorbene Algen, die sich in ruhigen Senken auf dem Meeresboden ansammelten. Durch Wärmeeinwirkung in tiefen Erdschichten bildeten sich hier bei Temperaturen zwischen 60 und 170 °C langkettige Öle und **Methan (Erdgas)**, die wiederum aufgrund der geringen Dichte durch das poröse Gestein aufsteigen können. Unterhalb dichter Gesteinsschichten, sogenannter geologischer Fallen, können sich dann Blasen aus Öl und Gas ausbilden, die aufgrund der großen Tiefe nur aufwendig technisch zu erschließen sind. An schräg verlaufenden Sperrschichten können Öl und Gas bis an die Erdoberfläche aufsteigen, wo sie teils direkt aus dem Gestein sickern. Auf diese Weise ist das sogenannte „Steinöl“ schon seit Jahrtausenden bekannt. Es wurde vornehmlich als Lampenöl für Beleuchtungszwecke genutzt. Im Laufe der Industrialisierung stieg der Bedarf an Öl vor allem als Schmiermittel massiv an, sodass neben der rapide ansteigenden Verwendung von Walöl intensiv nach Fördermöglichkeiten für das fossile Rohöl gesucht wurde. Doch auch in der Weiterverarbeitung machte man große Fortschritte. Im frühen 19. Jahrhundert gelang im damaligen Österreich, wo das „Bergöhl“ in Stollen gewonnen wurde, durch Destillation die Herstellung des leicht brennbaren Lampenöls „Naphtha“. Abraham Gesner (1797–1864) meldete 1855 ein US-Patent zur Herstellung von **Petroleum** aus Erdöl an, das als Leuchtmittel große Bedeutung erlangte.

Daraufhin begannen die großtechnische Suche und Erschließung des begehrten Rohstoffes. Um das Jahr 1860 gelangen weltweit erste gezielte Bohrungen nach Öl, in Wietze bei Hannover und praktisch zeitgleich in Titusville, Pennsylvania, wo in nur 24 Meter Tiefe eine ergiebige Lagerstätte angebohrt wurde. Die technische Erschließung dieser Vorkommen katapultierte die **Erdölindustrie** sprichwörtlich in die Zukunft (Bild 2.4). Mit der Erfindung eines leichten **Verbrennungsmotors**