

HANSER



Leseprobe

zu

Das System Brennstoffzelle

von Enno Wagner

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472600>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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 CO_2 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.

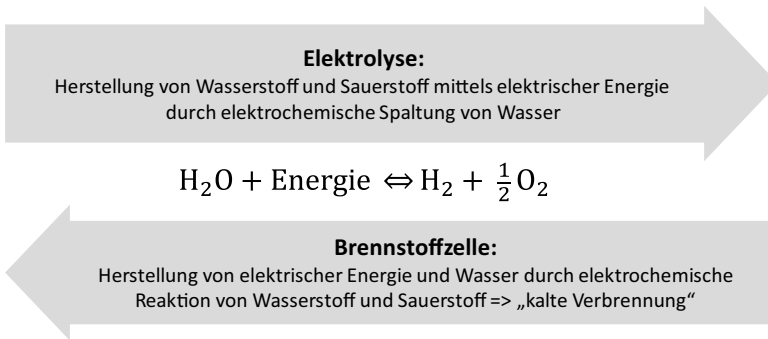


Bild 1.2 Reaktionsgleichung des grundsätzlich umkehrbaren Brennstoffzellenprozesses.

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.

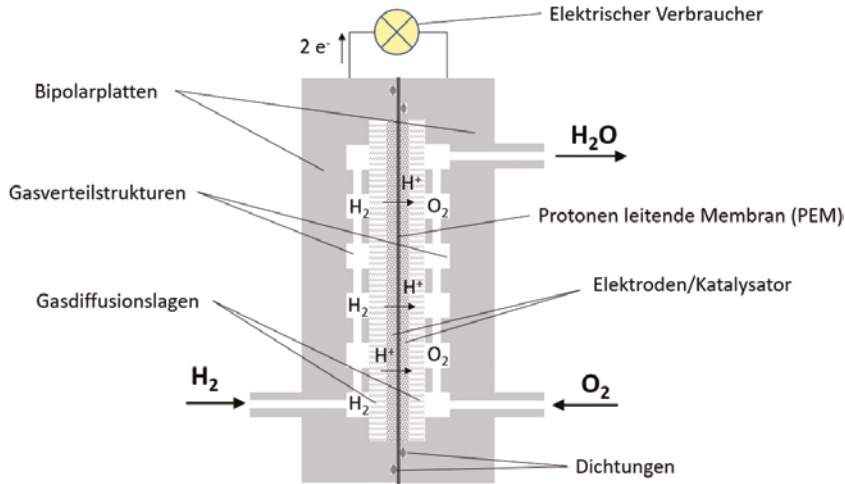


Bild 1.3 Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle mit protonenleitender Membran (PEM).

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 aufgespreßt. 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 geätzt 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-

Index

A

- Abgasturbolader 209
- Abtastfrequenz 218
- Abwärme
 - nutzlose 38
- Abwärmennutzung 302
- Adsorption 244
- Agfa 136
- Agri-Photovoltaik 277, 290
- Aktuelle Information 57
- Alkalische Brennstoffzelle (AFC) 110
 - Betrieb mit reinem Sauerstoff 111
 - Space Shuttle 124
 - Veröffentlichungen 133
 - Wirkungsgrad 111
 - Zukunftspotenzial 119
- Alkalische Elektrolyse
 - klassische 127
- Alkalische Membranen 134, 136
 - Differenzdruck 137
 - Gasdichtigkeit 136
 - metallische Stützstruktur 139
- Alkalischer Elektrolyseur 111
- Alkalischer Elektrolyt 79
- Alkalische Separatoren 134
- Alkalische Technologie 8, 9, 120
 - Wirkungsgrad 8
 - zukunftssträchtiges Potenzial 9
- Alstom 260
- Ammoniaksynthese 297
- Ammoniumverbindungen
 - quartäre 137
- Analog-Digital-Wandler 216, 218
- Anergie 47
- Anforderungen definieren 172
- Anforderungsliste 172
- Anion-Exchange-Membran (AEM) 9, 133
 - Molekülstruktur 9
- Anlagenbau 180
- Anlagensicherheit 222
- Anode 72
- Antike
 - Gärten 16
 - Griechenland 16
 - Stabilität der Infrastruktur 17
 - wissenschaftliche Disziplinen 16
- Antrieb
 - von Naturgesetzen 51
- Antriebssysteme 158
- Antwortamplitude 99
- Apollo-Raumfahrtprogramm 123
- Apparatebau 179
- Arbeitsfähigkeit
 - Exergie 38
- Arbeitsteilung 16
- Artenexplosion
 - im Kambrium 63
- Astronomischen Fragen 337
- ATEX-Richtlinien 210
- Atombomben 27
- Atomkern 79
- Aufforstung 289
- Aufheizvorgang
 - Simulation 223
- Aufschwung
 - technologischer 25

Ausgangssignale
 – analoge 219
 – digitale 219
 Ausstieg aus Kernenergie und Kohleverstromung 267
 Austauschstromdichte 86
 Autarkiegrad
 – hoher 329
 – Industrie 329
 – Mittelstand 329
 Automatisierungstechnik 221
 Automobil
 – Fließbandfertigung 23
 Automotive-Bereich 154
 Avogadro-Konstante 79

B

Bacon, Francis Thomas 121
 Batteriebank 193
 Batteriefahrzeug
 – Biogasverstromung 327
 – Ladung an PV-Anlage 328
 Batterien 101, 287
 – Energiewende 102
 Batteriespeicher 278
 Befeuchter 152, 226
 Behälterbau 181
 Benz, Carl 23
 Bergbau 20
 Beschichtungstechniken 155
 Betankungskomponenten 256
 Betriebsarten
 – Brennstoffzelle 72, 78
 – Elektrolyse 72, 78
 Betriebsweise
 – Brennstoffzelle 81
 – galvanostatische 89
 – potentiostatische 88
 Bevorratung
 – saisonale 31
 BHKW 281
 Bildungsbürgertum 23
 Bimetall-Thermometer 199
 Biochemie
 – organische 333
 Biodiversität 289
 Biogas 291
 Biogasanlage
 – Stromerzeugung 291
 Biokraftstoffe 327
 Biomasse 30, 289
 – Verstromung 282, 323
 Biomethan
 – Verwendungsmöglichkeiten 292
 Biosphäre 26, 339
 Bipolarplatten 7
 – metallische 157
 Blasendynamik 95, 96, 97, 98
 Blei-Gel-Akku 103
 Blei-Säure-Akku 102
 Blindwiderstände 99
 Blockbatterie 102
 Blockdiagramm
 – Programmierung 222
 – Symbole 222
 Blockheizkraftwerke (BHKW) 281
 Boltzmann, Ludwig 42, 48
 Borkenkäferplagen 18
 Bottom-up-Ansatz 328
 Braunkohle 19
 Brennstoff
 – flüssiger 114
 Brennstoffzelle 1, 3, 336
 – Betriebsweise 81, 89
 – Chancen 334
 – Charakteristik 81
 – Definition 5
 – DMFC 113
 – kostengünstige Produktionsweise 335
 – Leistungsdichte 112
 – MCFC 116
 – Modell 71
 – Modellierung 80
 – PAFC 114
 – PEFC 89, 111
 – PEMFC 89
 – physikalische Mechanismen 84

- Produktlebenszyklus 4
- reversibler Prozess 5
- Risiken 334
- Rückverstromung 295
- Schiffsverkehr 260
- Schwächen 334
- Senkung der Herstellkosten 8
- Serienfertigung 7
- SOFC 117, 283
- Stärken 334
- Systemkomplexität 9
- Umweltverträglichkeit 9
- unter Strom 78
- Verbesserung der Effizienz 8
- verlustbehaftete 74
- Brennstoffzellenantrieb 228
- Brennstoffzellenbetrieb 132
- Brennstoffzellenforschung 7
 - Optimierung der Zellmaterialien 7
- Brennstoffzellenheizgeräte 262, 303
- Brennstoffzellenheizungen 307
- Brennstoffzellen-Lkw 328
- Brennstoffzellen-Pkw 158, 258, 327
 - Technologievorsprung 10
- Brennstoffzellenschiffe 260
- Brennstoffzellenzüge 260
- Brennwert 74
- Brillouin, Léon 54
- Brückentechnologie 335
- Bubble Point 135
- Bürgertum 21
- Bussysteme 220
- Butler-Volmer-Gleichung 87

C

CAD 174
CAE 176
CAN-Bus 220
Carbon Black 149
Carlowitz, Carl von 19
Carnot-Prozess 39
Carnot, Sadi 39
Carnot-Wirkungsgrad 46

- technische Grenzen 46

CE-Kennzeichen 210
Cellcentrix 259
Celsius, Anders 199
Chemikalien

- Kohlendioxidaufnahme 298

Chemische Arbeit 73
Chemische Energie 73

- Sektor 2 268

Chemische Grundstoffe

- nachhaltige 290

Chemische Industrie

- Landwirtschaft 289

Chemische Sensoren 204
Chemisches Potenzial 73
Chemische Stoffe

- solare Herstellung 299

Chemische Verfahrenstechnik 298
Clausius, Rudolf 43
CO₂-Emissionen 335
Coefficient of Performance (COP) 305
Computer-Aided Design (CAD) 174
Computer-Aided Engineering (CAE) 176
Containerbauweise 257
COP 305

D

Daimler Truck 259
Dämmung

- von Gebäuden 316

Dampfkraftnutzung 38
Dampfkraftprozess 280
Dampfmaschine 20, 38

- James Watt 20
- ökonomisches Wachstum 39
- Wirkungsgrad 20

Dampfreformierung

- Erdgas 115
- interne 116

Dampfturbinen 27
Datenkomprimierung 57
Dehnungsmessstreifen 203
Dekarbonisierung 333

- der Grundstoffchemie 263

Demokrit 17

- Desorption 244
 - Deutsches Stromnetz 269
 - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) 126
 - DHV 206
 - Diaphragmen 134
 - Dichtungskonzept 156
 - Dichtungsmaterialien 184
 - Dichtungstechnik 183
 - Dielektrikum 203
 - Differentialgleichung
 - thermodynamische 223
 - Diffusion 92
 - Gedankenexperiment 92
 - Diffusionsgeschwindigkeit 42
 - Diffusionshemmung 101
 - Diffusionsimpedanz 100
 - Diffusionsschicht 150
 - Diffusionsüberspannung 84
 - Digital-Analog-Wandler 216
 - Dioxide Materials 137
 - Direktbrennstoffzelle
 - interne Reformierung 284
 - Direktmethanolbrennstoffzelle (DMFC) 113
 - Dissipation 55
 - Exergie 62
 - Gedankenexperiment 56
 - Dissipationsenergie 56
 - Dissipative Strukturen 53
 - DLR 126
 - DMFC 113
 - Doppelschichtkapazität 100
 - Doppelschichtmodell 99
 - Doppelspaltexperiment 60
 - Drehspulinstrument 196
 - Drehstrom 269
 - Drei-Phasen-Kontaktlinie 95, 97
 - Druckabhängigkeit 77
 - Druckbehältertypen 243
 - Druckfestigkeit
 - Behälter 183
 - Druckgasspeicher 241
 - Druckgeräterichtlinie 182, 210
 - Druckhalteventile (DHV) 206
 - Druckmessgeräte 202
 - Druckschalter 203
 - Druckverlust
 - Pipeline 250
 - Druckwasserkraftwerke 272
 - Düngemittel
 - umweltfreundliche Herstellung 264
 - Dunkelflaute 279
 - Durchtrittsimpedanz 100
 - Durchtrittsströmdichte 87
 - Durchtrittsüberspannung 84, 86
 - Durchtrittswiderstand 156
 - Dürren 318
 - Dürr, Hans-Peter 53
 - Dyson, Freeman 34
 - Dyson-Sphäre 34
- E**
- EC-Motoren 209, 227
 - Edison, Alva 21
 - EEG 278, 324
 - Effizienzverluste 328
 - e-Funktion 58
 - komplexe 60
 - Einfrierschutz 160
 - Eingangssignale
 - analoge 218
 - digitale 219
 - Einschnitte
 - persönliche 316
 - Eisenbahnwesen 21
 - Eisen und Stahl 20
 - Eisen- und Stahlerzeugnisse 18
 - Eisen- und Stahlherstellung 309
 - Eiszeit
 - kleine 19
 - Elastizitätsgesetz 177
 - Elektrische Arbeit 73, 75
 - Elektrische Energie 73
 - Sektor 1 267
 - Elektrische Ladungen 85
 - Elektrische Leitfähigkeit 205
 - Elektrische Leitungen 186
 - Elektrischer Schlag 214

- Elektrochemische Spannungsreihe 82
- Elektrochemischer Verdichter 239
- Elektrochemisches Potenzial 75
- Elektroden 6
 - Katalysator 71
 - korrosionsbeständige 122
 - Teilreaktionen 6
- Elektrodenband
 - flexibles 97
 - homogenes 124
- Elektrodenbogen 101, 156
- Elektrodenfertigung
 - Messermühle 97
 - Walzenstuhl 97
- Elektrodenimpedanzen 100
- Elektrodenreaktion
 - Geschwindigkeit 84
- Elektrodenstruktur
 - Grenzbereich 98
- Elektrofahrzeug 158
- Elektrolyse 2
 - Großanlage 231
 - Konkurrenzsituation 4
 - verlustbehafteter Gesamtprozess 5
- Elektrolysebetrieb 130
- Elektrolyseforschung 96
- Elektrolyseur
 - Megawatt 127
 - netzentkoppelter Inselbetrieb 293
 - Verbesserung der Effizienz 8
 - Versuchsstand 229
- Elektrolysezelle
 - hohe Leistungsdichte 112
 - kostengünstige Produktionsweise 335
 - reversibler Prozess 5
 - Senkung der Herstellkosten 8
 - Serienfertigung 7
 - umweltverträgliche Herstellung 9
- Elektrolyt
 - flüssiger 98
 - saurer 76
- Elektrolytbogen 101
- Elektrolytströmung
 - freie 125
- Elektrolytstruktur 109
- Elektrolytwiderstand 101
 - ohmscher 100, 155
- Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) 194
- Elektromobilität 287
- Elektronen 6, 72
- Elektronenaufnahme 72
- Elektronische Last 88
- Elektrotechnik 184
 - Schaltzeichen 185
 - System 21
- ELUFLUX-Brennstoffzelle 125
- EMV 194
- EMV-gerechte Konstruktion 218
- EMV-Maßnahmen 195
- EMV-Richtlinie 194, 210
- Energie
 - flexible zelluläre Struktur 288
 - freigesetzte 72
 - nutzbare 74
 - starre Baumstruktur 288
 - strömungsmechanische 37
- Energieanlage für Haustechnik 193
- Energie-Atlas Deutschland 268
- Energieautarkie 336
- Energieeffizienz
 - Steigerung 51
- Energieertrag
 - pro Hektar 327
- Energieform
 - Güte 46
 - Wertigkeit 267
- Energiekrise 278, 315
- Energielandschaft
 - technologieoffene 329
- Energiepark Mainz 163
- Energiepartnerschaften
 - internationale 326
- Energiepflanzen 327
 - in der Landwirtschaft 290
 - Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion 293
- Energieproduktion
 - dezentrale 329

Energiespeicher
 – Wasserstoff 127
 Energiesystem
 – ganzheitliches 336
 Energieübertragung
 – elektrische 270
 Energieumsatz
 – Differentialgleichung 80
 Energieverbrauch
 – exponentieller 54
 Energiewende 324
 – mentale Hürden 327
 Energie-Werteskala 47
 Energiewertigkeit 38
 – Farbskala 46
 ennobel power 129, 257
 Enthalpie 41
 Entropie 337
 – maximale 50
 – niedrige 48, 50, 55
 Entropieänderung 73
 Entropieerzeugung 45, 56
 Entropieproduktion 74
 Entropischer Tod 52, 67
 Entropische Systeme 65
 Entwicklungsmethodik 170
 Erderwärmung
 – Begrenzung 318
 Erdgas 2, 22, 333
 – flüssiges 315
 Erdgasheizungen 302
 Erdgasnetz
 – Einspeisung 163, 242, 294
 Erdöl 22, 333
 Erdölderivate 24
 Erdölindustrie 22, 24
 Erfahrungssatz 49
 Erfindungen
 – 40 Millionen pro Tag 339
 Erkenntnisgewinn 61, 337
 – exponentieller Zusammenhang 58
 Erneuerbare Energien 267
 – bürokratische Beschränkungen 326
 – Stand der Technik 313

Erneuerbare-Energien-Gesetz
 (EEG) 278, 324
 Erntefaktor 289
 Erwachsenwerden
 – energetisches 334
 EtherCAT 221
 European Hydrogen Backbone 253
 Exergie 37, 47
 – bilanzierte 62
 Explosionsdarstellungen 175
 Explosionsfähige Atmosphäre 213
 Explosionsschutz
 – Maßnahmen 214
 Exponentielles Wachstum 54

F

FAAM20 136
 Fachleute für Risikobeurteilung 211
 Fahrenheit, Daniel Gabriel 198
 Fahrzeuge
 – Sicherheit 244
 Fantappiè, Luigi 53
 Faraday-Gesetz 79, 241
 Federkraft 206
 Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
 (FMEA) 215
 Feldbus 220
 FEM 176
 Ferngasnetzbetreiber (FNB) 250
 Fernwärme 281, 302
 Fertigungstechnologie 156
 Festoxidbrennstoffzelle (SOFC) 117, 283
 Feuchtesensoren 204
 Fick'sches Gesetz 92
 Finite-Element-Methoden (FEM) 176
 Fischer-Tropsch-Synthese 298
 Flächenheizungen 304
 Flanschverbindung 181
 Flaschendruckminderer 206
 Fleischkonsum 322
 Flow Fields 150
 Flugverkehr 261
 Fluidmechanik 177
 Fluorierte Kohlenstoffe 134

Fluorverbindungen 9
Flüssigkeitsthermometer 198
Flüssig-Wasserstoff 297
Flutkatastrophe
– Pakistan 320
FMEA 215
FNB 250
Ford, Henry 23
Formiergas 242
Forschungszentrum
– solares 337
Fossile Energiespeicher
– erdgeschichtliche Sparkonten 334
Fossile Energieträger 288
Fossilwirtschaft
– hohe Profite 51
Fotoaktive Katalysatoren 301
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) 120, 153
Freie Reaktionsenthalpie 74
Frequenzgang 141
Freudenberg 150
Frontalzone
– Klima 320
Fuller, Calvin 31
Fuller, Richard Buckminster 54
Füllstandsmessung 205
Fumatech 138
Fundamentalsätze
– Physik 37
Funktionsblöcke 222
Funktionsstruktur 172
Futurium (Berlin) 289

G

Galilei, Galileo 198
Gasblasen
– Elektrolyse 94
Gasdiffusionselektrode (GDE) 97, 122
– Sauerstoffseite 98
Gasdruck 206
Gasgleichung
– allgemeine 42, 80, 241
Gaskatel 82, 125
Gasreinigung 240
Gastheorie
– kinetische 41
Gastransport 251
Gastrocknung 294
Gasturbinen 279
Gasturbinenkraftwerke 3
Gasverteilplatten 150
Gasverteilstrukturen 7
Gedankenexperiment
– Dissipation 55
Gefahrenanalyse 210
Gefahren durch Sauerstoff 214
Genehmigungsverfahren 275
Generationenraumschiffe 34
Gerätesteuerung 215
Gesamtreaktion 72
Gesamtspannung
– Zelle 81
Geschlossenes System 71
Gesteinsschichten 22
Gesundheit stärken 322
Gibbs-Energie 74
Glasfaserverbundkunststoffe 273
Gleichgewicht
– elektrochemisches 76
– hydrostatisches 98
– thermisches 51
– thermodynamisches 49
Gleichgewichtspotenzial 86
Gleichstromübertragung
– Hochspannung 270
Gleichstromumrichter (DC-DC) 192
Gletscher 19
Globaltemperaturen
– dramatischer Anstieg 318
Global Warming Potential (GWP) 306
GPG Gase Partner 243
Greenwashing 11, 314
Großkraftwerke 286
Großprojekte, internationale 335
Grove'sches Element 143
Grove, Sir William 143
Grundstoffchemie
– Dekarbonisierung 263

Grüner Stahl 264, 309
 GRZ Technologies 245
 GWP 306
 Gyorgy, Albert Szent 53

H

H2-Netz 2050 250
 Haber-Bosch-Verfahren 298
 Hahn, Otto 27
 Halbleiterrelais 189
 Halbzellenspannung 82
 Handwerk 329
 Heavy Duty-Bereich 238
 Heimspeicher 287
 Heißleiter-Temperaturfühler (NTC) 200
 Heißpressen 148
 Heizkessel 24
 Heizungskreislauf 305
 Heizwert
 – oberer 74
 Heizwertspannung 76
 Helmholtz, Hermann von 40
 Helmholtz-Modell 84
 Herangehensweise
 – ganzheitliche 12
 Herstellererklärung 210
 Hexagon Purus 244
 Hitzedrahtmesswerk 198
 Hitzewellen 318
 Hochdruckspeicher 255
 Hochdruckverflüssigung 247
 Hochkulturen 17
 Hochleistungszellen 154
 Hochschule RheinMain 164
 Hochspannung 270
 Hofmann-Eliminierung 137
 Holzpellet-Brenner 304
 Holzpellets 289
 Holzwirtschaft 18
 HPS Home Power Solutions 262
 Hubkolbenverdichter 236
 Hüttenwesen 20
 Hydrierung
 – von Kohlenwasserstoffen 264

Hydrocracking 298
 Hydroxid-Ionen 79
 – dissoziierte 85
 – solvatisierte 85
 HyET Hydrogen 241
 Hysolar 127
 Hyundai 158

I

Impedanz 99, 100
 Impedanzspektren 155
 Impedanzspektroskopie 99
 Import
 – von grünem Wasserstoff 329
 – von Strom 329
 Impuls 42
 Impulssatz 43
 Industrialisierung 19, 21
 – Arbeiter 21
 – Entsorgungsproblem 21
 – Großstädte 21
 – hygienische Bedingungen 21
 – Produktionsbetriebe 21
 Industriestaaten 64
 Industriezeitalter
 – technisch fruchtbarer Boden 63
 Infinitesimalrechnung 18
 Information 337
 Informationsdichte
 – Anstieg 25
 Informationsgehalt einer unbekannten
 Nachricht 57
 Informationsmangel 48
 Informationsverarbeitung 168
 Informationszeitalter 25, 54, 333
 Informationszuwachs 60
 Innenwiderstand
 – Zelle 81
 Innere Energie 80
 Innovationen 65
 Innovationsprogramm
 – nationales 325
 Intelligenzstruktur
 – künstliche 337, 339

Internet of Things (IoT) 221
Ionen
– elektrisch geladene 85
Ionen-Strom 78
Ionische Verdichter 239
IoT 221
Iridium
– Katalysator 153
Irreversibilitäten 44
Isentropen-Koeffizient 236
Isolatoren
– elektrische 187
Iteratives Vorgehen 176

J

Jetstream 320
Joule, Prescott 40

K

Kabel 186
Kalilauge
– konzentrierte 214
– wässrige 79
Kalium-Ionen 85
Kältemittelkreislauf 305
Kapitalismus 21
Kapitalwirtschaft
– fossile 31
Kaplan-Turbine 272
Kaplan, Viktor 272
Karbonatbildung 110
Kardaschow, Nicolai 33
Kardaschow-Skala 33
Katalysatoren 6
– Aktivität 101
– günstige 111
Katalysatorvergiftung 112, 159
Katalytische Brenner 308
Kathode 72
Kavernenspeicher 252
Kennzahl
– allgemeingültige 61
Kernenergie
– Ausstieg 28, 267
Kernfusion 32
Kernkraft
– friedliche Nutzung 27
Kernkraftwerke 324
Kernschmelze 28
Kernspaltung 27
Kernspin 234
Kesselformel 182
Kettenreaktion
– atomare 27
KI 25
Kinetische Gastheorie 41
Kleinsteuerungen 216
Klemmenspannung 81
Klemmringverschraubungen 180
Klimakrise 316
Klimaprojektionen 317
Klimaschwankungen 17
Klimawandel 313
– menschengemachter 316
Knallgas 6
Kohlefaserpapiere 7
Kohlekraftwerke 324
Kohlendioxid 318
– Abtrennung 281
– Einlagerung 29
Kohlendioxidemissionen 25, 29
Kohlenstoffkreisläufe 333
Kohlenstoffstrukturen 149
Kohlenwasserstoffe 333
– langkettige 298
Kohleverstromung
– Ausstieg 267
Kolbenkompressor 237
Kondensator 203
Konformitätserklärung 210
Konstruktion
– EMV-gerechte 218
– inhärent sichere 212
Konstruktionslehre 174
Kontaktschalter 187
Kontaktwinkel 94

Kontamination
 – Elektroden 161
 Konzentrierte Information 54
 Korrosion 103
 Korrosionsprobleme 115, 117
 Korrosionsschutz 157
 Kraftstoff
 – solarer 16
 Kraft-Wärme-Kopplung 281, 302
 Kreativität
 – förderliche Entwicklungsumgebung 68
 Krebserkrankungen 322
 Kreislaufwirtschaft mit Wasserstoff 333
 Kreisprozess 38
 Kriegsfolgen 315
 Krisen
 – globale 314
 Künstliche Intelligenz (KI) 25

L

Ladungstransfer 156
 Ladungstransport
 – Teilchen 84
 Landwirtschaft
 – fossil-synthetische Unterstützung 24
 – mittelalterliche 327
 Langer, Charles 121
 Langzeitstabilität 135
 Lastspannung 81
 Laststromkreis 189
 Laufwasserkraftwerke 271
 LC-Display 216, 220
 Lebensgrundlage
 – einzigartige 50
 Leerlaufspannung 81
 Lehnswesen 21
 Linde 164, 259
 Linde-Hampson-Prozess 248
 Lithium-Eisenphosphat-Akku 106
 Lithium-Ionen-Akku 105, 287
 Lithium-Ionen-Batterien 31
 Litzen 186
 Lohnarbeit 21
 Luftbetrieb 112
 Luftmassenstrom
 – Regelung 209
 Luftüberschuss 160
 – geregelter 6
 Luftversorgung 160
 Luftvorwärmung 284

M

Mainzer Stadtwerke 164, 243
 Managementwerkzeug 215
 Marketingkonzepte 51
 Maschinenrichtlinie 210
 Massenstrom 79
 Materialversprödung
 – im Umgang mit Wasserstoff 182
 Materialwissenschaft 122
 Maxwell, James Clerk 42
 Mayer, Robert 40
 MCFC 116
 MEA 147
 – Herstellung 148
 Mechanische Strömungsenergie 273
 Mechanische Ventile 206
 Mechanische Wärmetheorie 39, 43
 Mechatronik 167
 Mechatroniksystem 169
 Mechatronische Konstruktion 168
 Meere
 – Verdunstung 319
 Membran
 – Anion-Exchange-Membran (AEM) 9
 – gasdichte 6, 71
 Membran-Elektroden-Einheiten
 (MEA) 147
 – Herstellung 148
 Membranpumpe 207
 Membranwiderstand 141
 Menschheitsgeschichte
 – Aufgabe 67
 Merit-Order-Effekt 280
 Mesopotamien 16
 Mess- und Regelungstechnik 221
 Metallhydride 244
 Metallhydrid-Speicher 244

Metallmembran-Kompressor 237
Metalloxid 102
Metaphysisches Know-how 54
Methan 2, 22, 291, 318
Methanoloxidation 114
Methanolsynthese 299
Methan-Pyrolyse 264
Methylimidazolium 138
Mikro-Grids 286
Mikroprozessor 215, 217
Mikrostruktur
– Katalysator 84
Mikrozonen-Modell 95
Mindestzündenergie 213
Mittelalter
– dezentrale Strukturen 17
– dörfliche Sozialstrukturen 21
– Handwerkswesen 17
– kultureller Aufstieg 17
– Nutzung von Wasserkraft 17
Modbus 220
Modellvorstellung von Stephan und Hammer 95
Model Predictive Controller (MPC) 225
Molekularbewegung
– ungeordnete 92
Moleküle
– Eigenbewegung 49
Molmasse 79
Molvolumen 80
Mond, Ludwig 121
Mooresches Gesetz 54
Morphologischer Kasten 172
MPC 225

N

Nachhaltige Baustoffe 289
Nachhaltigkeit
– Definition 18, 327
– Kennzeichen 65
Nafion 93, 144
Nafion-117
– Membrandicke 146
Nahrungsmittelproduktion 289

Nahrungsquelle
– proteinreiche 15
Nahwärmenetze 303
Negative Entropie 53, 58
Negentropie 54, 58
Nernst-Gleichung 240
Nettostromerzeugung
– erneuerbare Energien 323
Netzbildende Systeme 286
Netzfrequenz 285
Netzstabilisierung 285
Netzstrom
– Dunkelflaute 306
Neuerungen 62
Newcomen, Thomas 20
Newton, Isaac 18
Newton'sche Mechanik 38
NiC-Elektroden 132
Nickelelektrode
– glatte 96, 98
Nickelgewebe 121
Nickel-Metallhydrid-Akku 103
Nickelstruktur
– hochporöse 97
Niederdruckverflüssigung 247
Niederspannungsrichtlinie 210
NordLink 273
Normal-Wasserstoffelektrode 82
Normkubikmeter 242
Notabschaltung 209, 215
Notausschalter 188
NTC 200
Nuklearkatastrophe 28
Nutzarbeit
– maximale 76
Nutzfahrzeuge 258

O

Oberfläche
– Eigenschaften 94
Oberflächenspannung 94
Oberleitungsfahrzeuge 328
Offene Systeme 53
Offshore-Windkraftanlagen 323

Offshore-Windparks 275
 Ökologische Bedingungen
 – unverantwortbare 31
 Onshore-Windkraftanlagen 323
 Onshore-Windparks 275
 Ortho-Wasserstoff 234
 Oxidkeramische Brennstoffzelle
 (SOFC) 117, 283

P

PAFC 114
 Palladium 132
 Pandemien 314
 Parabelflug
 – Schwerelosigkeit 96
 Parabolrinnen-Kraftwerken 282
 Para-Wasserstoff 234
 Partialdruck 73
 Pasten 148
 Patentanmeldungen 54
 – exponentieller Anstieg 64
 Patente
 – pro Gigawattstunde 63
 – Spitzenreiter 65
 PBI 136
 PEFC 89, 111
 – Bedingungen 148
 Pelton-Turbine 272
 PEM 6, 93, 111, 143, 144, 240
 – hohe Stromdichte 144
 – Leistungsdichte 8
 – Zukunftspotenzial 119
 PEM-Elektrolyse
 – Stromdichte 155
 PEM-Elektrolyseur 160
 PEMFC 89, 111
 – Bedingungen 148
 Perowskite 337
 Perowskit-Solarzellen
 – Veröffentlichungen 337
 Petrochemische Industrie 251
 Petroleum 22
 Phasengrenze
 – Krümmungsänderung 95
 Phasenverschiebung 99
 Phasenwinkel 99
 Phosphorsäurebrennstoffzelle (PAFC) 114
 Photosynthese 289
 Photovoltaik 31, 323
 – bürokratische Hürden 278
 – Konkurrenz zur Landwirtschaft 277
 Photovoltaikindustrie
 – Zusammenbruch 324
 Photovoltaikmodule 193, 276
 Physik
 – theoretische 23
 PID-Regler 225
 Piezoelektrischer Effekt 203
 Planck, Max 59
 Planck'sches Strahlungsgesetz 59
 Plasmaspritzen 126
 Plastikmüll 26
 Platin
 – Katalysator 83, 153
 Platinbeladung 149
 Platinenlayout 217
 Platinmetalle 149
 Poly-Benzimidazol (PBI) 136
 Polymerelektrolytbrennstoffzelle (PEFC,
 PEMFC) 89, 111
 – Bedingungen 148
 Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) 6,
 93, 111, 143, 240
 – hohe Stromdichte 144
 – Leistungsdichte 8
 – Zukunftspotenzial 119
 Polystyrol
 – sulfoniertes 144
 Poren
 – hydrophobe 97
 Postwachstumsökonomie 314
 Potenzialdifferenz
 – elektrische 75
 Potenzielle Information 57
 Power to Liquid (PtL) 298
 Primärenergiekosten 281
 Primärenergiequelle 269
 Primärenergieverbrauch 302
 Produktentwicklung nach VDI 2221 173

Produkt-Lebenszyklus-Engineering 170
Produktstruktur 172
Profinet 221
Protonen 6, 71, 72, 144, 240
Protonen-Austausch-Membran (PEM) 111, 144
Prozesswärme 309
– Bereitstellung 302
Prüfinstitut
– unabhängiges 215
PtL 298
Puls-Weiten-Modulation (PWM) 220
Pumpsysteme 18
purgen 228
pV-Diagramm 236
PWM 220

Q

Quantentheorie 23

R

Radioaktiver Müll 27
Raketenantriebe 34
Raney-Nickel
– aktive Oberfläche 98
– Katalysator 97
Raney-Silber 133
Raumfahrttechnologie 25
Reaktionsenthalpie 74
Reaktionskinetik 84, 87
Reaktionsladungszahl 75
Reaktionsüberspannung 86
Reaktionswasser 6
Reaktive Mixing 124
Rechnerunterstütztes Konstruieren 174
Redoxpotenziale 83
Referenzelektrode 82
Regelenergiemärkte 287
Reibung 45
Reichtum 54
Relais 188
– fluidtechnisches 207
Reverse Water Shift Reaction 298

Reversible alkalische Brennstoffzelle 130
– Elektrolysebetrieb 130
– geringe Überspannung 131
– hochporöse Nickelstruktur 131
– Wirkungsgrad 131
Reversible Brennstoffzelle 307
Reversible Nutzarbeit 74
Reversible PEM-Brennstoffzelle 153
Reversible Zellspannung 76
R&I-Fließschema 180
Risikobeurteilung 210, 211
– im Team 211
Risikominimierung 212
Risikoprioritätszahl (RPZ) 211
Rohreibungszahl 250
Rohrfeder-Manometer 202
Rohrleitungen 179
Rohrleitungsbau 22
Rohrleitungs- und Instrumenten-Fließschema 180
Rohrverbinder 180
Rolle-zu-Rolle-Verfahren 149
Römer 17
Round-Trip Efficiency 154
RPZ 211
Rückdiffusion 93
Rückverstromung mittels Brennstoffzelle 295
Ruhespannung 76, 77, 240

S

Satellitentechnologie 31
Sättigungstemperatur 226
Sättigungszustand
– des Wassers 152
Sauerstoff
– Gefahren 214
Sauerstoffelektrode 83, 133
Schaffensergebnisse
– Energieumsatz 61
Schaltelemente 187
Schalter
– automatisierter 188
– manueller 187

- Schaltplan
 - Symbole 185
- Schaltschrank 194
- Schichtspeicher 304
- Schmelzkarbonatbrennstoffzelle (MCFC) 116
- Schmelzpunkt 234
- Schnittdarstellungen 175
- Schönbein, Christian Friedrich 143
- Schrödinger, Erwin 53
- Schütze 188
- Schutzmaßnahmen
 - technische 212
- Schwefelsäure
 - konzentrierte 102
- Schwefelsäure-Iod-Verfahren 300
- Schwerindustrie
 - gesamtgesellschaftlicher Nutzen 329
- Schwertransporte mit Brennstoffzellenantrieb 259
- Seebeck-Effekt 200
- Sektor 1 – elektrische Energie 267
- Sektor 2 – chemische Energie 268
- Sektor 3 – Wärmeenergie 268
- Sektorenkopplung 163, 267, 293
- Sensor
 - für die Detektion von Kohlenwasserstoff 204
- Separator 102
- Sera Hydrogen 238
- Shannon-Entropie 57
- Shift-Reaktor 263
- Shunt
 - zur Strommessung 198
- Sicherer Betrieb 209
- Sicherheit von Fahrzeugen 244
- Siebdruck 149
- Siedepunkt 234
- Siemens 119
- Siemens-Zelle 125
- Silberelektrode 133
- Silizium 314
- Simulation 168
- Sklaven 16
- Smolinka, Tom 119
- SOFC 117, 283
- Solarchemie 299, 337
- Solarenergie 336
- Solares Forschungszentrum 337
- Solare Zivilisation 15
- Solarkollektoren 304
- Solarthermie 316
- Solarthermische Kraftwerke 282
- Solartronik 337
- Solarturm-Kraftwerke 282
- Solarwasserstoff 127
- Solarzeitalter 32
- Solarzellen
 - Funktionsweise 276
 - Herstellung 276
- Solvat-Hülle 85
- Sonne 32
 - Strahlungsleistung 33
- Sozialismus 21
- Spannungsteiler 197
- Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) 222
- Speichersystem 313
- Speicherung von erneuerbaren Energien
 - effektive 335
- Spezifikation 223
- Spezifische Dichte 234
- Spontane Vermischung 92
- SPS 222
- Sputtern 155
- Stack 7, 151
- Starkregenereignisse 318
- Steinkohle 19
- Stephan und Hammer
 - Modellvorstellung 95
- Steueranweisungen 217
- Steuerstromkreis 189
- Steuerungsplatine 216
- Steuerungsprogramm 217
- Stoffströme 205
- Stofftransportbogen 101
- Stofftransportprobleme 84, 100
- Stoffumsatz 79

Störaussendung 194
 Störfeldempfindlichkeit 194
 Stromdichte 83
 Stromerzeugung 269
 Stromerzeugung mit Biogasanlagen 291
 Stromhandel, Nachbarländer 273
 Stromlaufplan 185
 Strommessung 197
 Stromnetze 316
 Strompreis 11
 Stromrichter 190
 Strom-Spannungs-Kennlinie 81, 88
 Strömungsmaschinen 239
 Stücklisten 178
 Subventionen
 – Industrie 328
 – staatliche 328
 Sulfoniertes Polystyrol 144
 Suspensionen 148
 Sustainion 137
 Synchronmaschine 227
 Synthesegas 298
 – Aufbereitung 300
 Synthetische Kraftstoffe 264
 Syntropie 56, 337
 – Definition 53
 – exponentieller Zusammenhang 58
 Syntropie-Kennzahl (SK) 61
 Syntropie-Konstante 62
 Syntropische Systeme 66
 Systementropie 56
 Systementwicklung
 – interdisziplinäre 170
 Systemgrenze 62
 Systemintegration 170
 Systemstruktur
 – Güte 62
 Systemtechnik 156
 Systemtemperatur 73
 Szenario
 – RCP 2.6 318
 – RCP 8.5 318

T

Tafel-Darstellung 87
 Technische Chemie 179
 Technische Zeichnungen 178
 Technologie
 – unwirtschaftliche 328
 Technologieoffenheit 68
 Technologischer Fortschritt 51
 Teilchen
 – einzelne 60
 Teilchenzahl 74
 Teilwiderstände 100
 Temperaturabhängigkeit 77
 Temperaturdifferenz
 – Subtropen 320
 Temperaturgegensätze 273
 Temperaturschalter 199
 Temperatursensoren
 – elektronische 199
 Temperatur-Vergleichsstelle 201
 Thermischer Verdichter 245
 Thermisches Gleichgewicht 48
 Thermochrome Flüssigkristalle 96
 Thermodynamik 39
 – erster Hauptsatz 40, 73
 – zweiter Hauptsatz 44, 49, 73
 Thermodynamischer Ansatz 55
 Thermodynamisches Optimum 240
 Thermodynamisches Potenzial 74
 Thermodynamische Wahrscheinlichkeit 57
 Thermoelektrischer Effekt 200
 Thermoelement-Temperaturfühler 200
 Thermoneutrale Spannung 76
 Thermotronik 167
 ThyssenKrupp Steel 264
 Tiefkalter Wasserstoff 249
 Top-down-Ansatz 328
 Trailer-Abfüllung 243
 Transformator 269
 Transistor 189
 Treibhauseffekt 26
 Treibhausgase
 – Konzentration 317

Treibhausgaspotenzial 306
Trimethylamid 137
Trinkwasserspeicher 271
Tschernobyl 28
Turbinendrehzahl 272
Turbomaschinen 209, 239

U

Überbevölkerung 314
Überspannung 81, 94
– geringe 123
– Katalysatoren 83
Umdenken 11
– generelles 327
Umsatz
– gesteigerter 51
Umweltbelastungen 328
Umweltgifte 26
Umweltwärme 305
Unordnung 52
– Moleküle 49
Unterwasser-Seekabel 270
Uran 26
U-Rohr-Manometer 202
Urwälder
– Eichen 17
UV-Strahlung
– hochwertige 52

V

Vakuumröhren-Kollektoren 304
Varta 125
VDI-Richtlinie 2221 171
Verbrennung
– kalte 3
– von Wasserstoff 235
Verbrennungsenthalpie 235
Verbrennungskraftmaschinen 280
Verbrennungsmotor 22
Verdampfungsenthalpie 74
Verdichterleistung 238
Verdichtungsprozess 236
Verfahrensfließschema 179

Verfahrenstechnik
– chemische 179
– Symbole 179
Verflüssigung von Wasserstoff 246
Verlustleistung 270
Verschiebearbeit 236
Versuchsstand 227
Vis Vitalis 53
V-Modell 170
Völkerwanderung 17
Volumenänderungsarbeit 41, 236

W

Wachstum
– ökonomisches 314
Wachstumsgrenzen 314
Wachstumskritik 314
Wahrscheinlichkeit
– thermodynamische 48, 50
Walöl 22
Wandüberhitzung 94
Wärmebilanz 44
Wärmeenergie
– Güte 44
– niederwertige 52
– Sektor 3 268
Wärmeerzeugung mit Wasserstoff 308
Wärmefluss
– Austauschvariable 44
– irreversibler 43
Wärmekraftanlagen 279
Wärmekraftmaschine 38
Wärmepumpen 305, 316
– elektrisch betriebene 261
Wärmestromdichte 96
Wärmetheorie
– mechanische 39, 43
Wärmeübertragung
– isotherme 41
Wärmeverlust 74
Wärmeversorgung
– regionale 316
Wärmewende 305
Warmwassernutzung im Haushalt 304

- Warnhinweise 212
- Waschflasche 226
- Wasser 333
 - sauberes 335
- Wasseraufbereitung 294
- Wasserausbeutung 321
- Wasserbildung 72
- Wasserdampf
 - Atmosphäre 319
- Wasserentnahme
 - Grundwasser 320
- Wasserkraft 30, 323
- Wasserkraftnutzung 271
- Wassermanagement 272
- Wassermangel 320
- Wassermoleküle
 - Polarität 85
- Wasserspaltung
 - fotochemische 338
- Wasserstoff 1, 2, 233, 332, 336
 - Abfüllung in Stahlflaschen 296
 - Anlieferung per Trailer 256
 - Auswirkungen auf Atmosphäre 335
 - blauer 29
 - Champagner der Energiewende 1
 - Chancen von grünem Wasserstoff 334
 - eigene Herstellung 262
 - Eigenschaften 234
 - Energiemenge 246
 - Energieträger 29
 - Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch 3
 - geringe Gesamteffizienz 5
 - Gesamtwirkungsgrad 296
 - grauer 2, 29, 335
 - grüner 2, 10, 30, 315
 - grüner Wasserstoff im Transportwesen 296
 - häuslicher Gebrauch 257
 - Hoffnungsträger 1
 - hohe Kosten 335
 - Import von grünem Wasserstoff 253
 - in Stahlflaschen 242
 - komplexe Systemtechnik 5
 - kostenintensiv 5
 - Kreislaufwirtschaft 333
 - Materialversprödung 182
 - molekularer 233
 - Nachteile 4
 - politische Vorgaben 10
 - purgen 228
 - Qualität 5.0 230
 - regionale Produktion von grünem Wasserstoff 257
 - Risiken von grünem Wasserstoff 334
 - roter 30
 - saisonale Speicherung 3, 250
 - Schwächen von grünem Wasserstoff 334
 - Speicherkapazität 245
 - Stabilisierung von Stromnetzen 3
 - Stärken von grünem Wasserstoff 334
 - tiefkalter 249
 - Transport von flüssigem Wasserstoff 335
 - türkiser 29
 - Überseetransport 253
 - Umlage 10
 - Verbrennung 235
 - verdichteter 2
 - Verflüssigung 246
 - Vorteile 4
 - Wärmeerzeugung 308
- Wasserstoffaufnahme 205
- Wasserstoffbehälter
 - gewichtsreduzierter 243
- Wasserstoff-Bioreaktor 301
- Wasserstoffbündel
 - in Gitterboxen 242
- Wasserstoffelektrode 83
- Wasserstoff-Energieanlage
 - hoher Autarkiegrad 262
- Wasserstofferzeugung
 - Baustein für Energiewende 10
 - dezentraler Ansatz 10
- Wasserstofffahrzeuge 2
 - große Reichweite 2
- Wasserstoffgas
 - hochentzündliches 213
- Wasserstoffgasnetze 295

- Wasserstoffimport
 - grüner Wasserstoff 10
- Wasserstoffinfrastruktur 250
- Wasserstoff-Landkarte 257
- Wasserstoff-Lkw 259
- Wasserstoffpreis 328
- Wasserstoff-Sauerstoff-Brennstoff-
 zelle 82
- Wasserstoffsensoren 204
- Wasserstoffspeicher 307
- Wasserstoffspeichersysteme
 - separate Zellstapel 308
- Wasserstoff-Steuerentscheidungen 326
- Wasserstoffstrategie
 - dezentraler Ansatz 336
 - europäische 325
 - internationale Energiepartner-
 schaften 326
 - nationale 325
 - nationales Innovationsprogramm 325
- Wasserstoffsysteme
 - interne Rückkopplungen 223
 - komplexes Verhalten 223
- Wasserstofftank 158
- Wasserstofftankgerät
 - kompaktes 240, 246
- Wasserstofftankstellen 2, 255
 - Henne-Ei-Problem 255
 - internationale Anbindung 256
- Wasserstoffversorgung 159
- Wasserstoffwirtschaft 326
 - solare 334
- Wasserverbrauch
 - Lithiumgewinnung 322
 - virtueller 321
- Watt, James 20, 38
- Wechselrichter 190, 209
 - elektronischer 286
 - netzbildender 191
 - netzfolgender 191
- Wechselstrom
 - dreiphasiger sinusförmiger 269
 - sinusförmiger 99
- Wechselstromumrichter (AC-AC) 192
- Wechselstromwiderstand
 - komplexer 99
- Wellen
 - kontinuierliche 60
- Welle-Teilchen-Dualismus 60
- Weltklimarat 316
- Weltraum
 - Besiedelung 339
 - Sprung in den 33, 336
- Weltwirtschaft 314
- Wetterdynamik 320
- Widerstandsthermometer 200
- Wildgetreide 16
- Windenergie 273
- Windgeschwindigkeit
 - durchschnittliche 274
- Windkraft
 - offshore 323
 - onshore 323
- Windkraftanlagen 31, 274
- Wirkprinzipien
 - physikalische 172, 203
- Wirkungsgrad
 - idealer (Brennstoffzelle) 74
 - maximaler 46
 - thermischer 39, 46
- Wirkungsquantum
 - Planck'sche 59
- Wirkwiderstände 99
- Wirtschaftssystem
 - kapitalistisches 51
- Wirtschaftswachstum
 - rückläufiges 313
- Wirtschaftsweise
 - nachhaltige 334
 - Umstrukturierung 309
- Wirtschaftswissenschaft 24
- World Wide Web 25

Y

- Young-Laplace-Gleichung 94

Z

- Zahnradpumpen 208
- Zeigerinstrument
 - Druck 202
 - Spannungsmessung 196
- Zeitkonto
 - der Natur 17
- Zellkonstruktion 7
- Zellstapel 7, 151
- Zementindustrie 309
- Zentrifugalkompressor 209
- Zero-Gap-Konstruktion 134
- Zersetzungsspannung 83
- Zirfon 136
- Zirkonoxid 135
- Zubauleistung
 - Photovoltaik 324
- Zündfähige Gemische 213, 235
- Zusammenbau von Bauteilen 175
- Zusammenhänge
 - exponentielle (zwischen Syntropie und Erkenntnisgewinn) 58
 - physikalisch-chemische 88
 - thermochemische 84
- Zustandsdichte 59
- Zyklusfestigkeit 103, 106