

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	Ruhespannung 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

1

Einführung

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 umweltkritische 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 der 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.

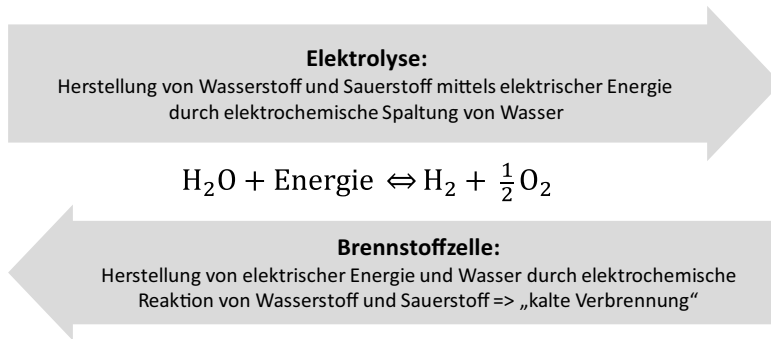


Bild 1.2 Reaktionsgleichung des grundsätzlich umkehrbaren Brennstoffzellenprozesses.

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.

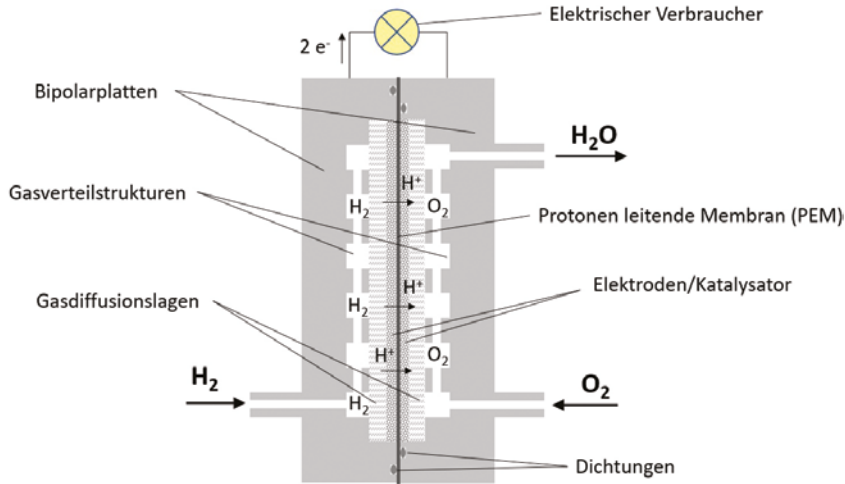


Bild 1.3 Schematische Darstellung einer Brennstoffzelle mit protonenleitender Membran (PEM).

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 Wasserstoffherzeugern 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
- Elektrofahrrad 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
 enoble 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
Gasverteiplatten 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 unbekannt
 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
Methanoxidation 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
purgieren 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
Ruhepotential 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
Störempfindlichkeit 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

Vakuurröhren-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
- Wasserstoffherzeugung
 - 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-Brennstoffzelle 82
 - Wasserstoffsensoren 204
 - Wasserstoffspeicher 307
 - Wasserstoffspeichersysteme
 - separate Zellstapel 308
 - Wasserstoff-Steuerentscheidungen 326
 - Wasserstoffstrategie
 - dezentraler Ansatz 336
 - europäische 325
 - internationale Energiepartnerschaften 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