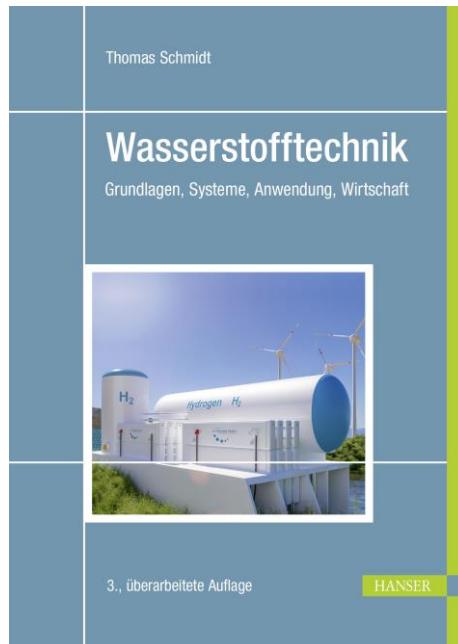


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Wasserstofftechnik

von Thomas Schmidt

Print-ISBN: 978-3-446-47912-8  
E-Book-ISBN: 978-3-446-48074-2

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446479128>  
sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>XI</b>
<b>Die Autoren .....</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Das Interesse am Element Wasserstoff .....	1
1.1.1 Zielvorgaben der Politik .....	5
1.1.2 Strategien zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft ..	7
1.2 Wasserstoff im öffentlichen Diskurs der ökologischen Transformation .....	12
1.3 Der Inhalt dieses Buches .....	16
1.4 Die Form dieses Buches .....	17
<b>2 Eigenschaften des Wasserstoffs .....</b>	<b>19</b>
2.1 Grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften von Wasserstoff .....	24
2.2 Das thermodynamische Verhalten von Wasserstoff .....	28
2.2.1 Zustandsgrößen und 1. Hauptsatz der Thermodynamik ..	29
2.2.2 Die Phasengrenzen .....	39
2.2.3 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik .....	41
2.2.4 Die spezifische Wärmekapazität .....	47
2.2.5 Die polytrope Zustandsänderung .....	54
2.2.6 Wirkungs- oder Nutzungsgrade .....	58
2.2.7 Freiheitsgrade eines Wasserstoffsystems .....	62
2.2.8 Flüssiger und fester Wasserstoff .....	62
2.2.9 Viskosität des n-Wasserstoffs .....	64
2.2.10 Der Thomson-Joule-Effekt des Wasserstoffs .....	66
2.2.11 Die Wärmeleitfähigkeit .....	70
2.2.12 Anteile und Konzentrationen von Mischungen .....	72
2.2.13 Mischungsregeln .....	78

2.3	Die Klassifizierung als Produkt .....	81
2.4	Permeationseigenschaft des Wasserstoffs .....	83
2.4.1	Permeation durch metallische Werkstoffe .....	85
2.4.2	Permeation des Wasserstoffs durch Polymere .....	99
2.5	Metallische Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss .....	104
2.5.1	Gefährdungspotenziale für die Wasserstoffversprödung ..	104
2.5.2	Einschätzung des Gefahrenpotenzials für bestehende Stahlleitungen hinsichtlich Wasserstoffversprödung ..	113
2.5.3	Auslegung von Bauteilen gegen Wasserstoff induzierten Sprödbruch .....	116
2.5.3.1	Spannungs- und Verformungszustände in beanspruchten Bauteilen .....	118
2.5.3.2	Grundregeln zum Betrieb mit rissgefährdeten Bauteilen .....	122
2.5.3.3	Die Grenztragfähigkeit .....	123
2.5.3.4	Die spezifische Riss- oder Bruchenergie .....	127
2.5.3.5	Bruchmechanische Bewertung von Bauteilen unter quasistatischer Beanspruchung .....	130
2.5.3.6	Ermüdungsbruch unter Wasserstoffeinfluss .....	135
2.5.3.7	Bewertung von zyklischen Belastungen unter Wasserstoffeinfluss .....	140
2.5.3.8	Dauerfestigkeitsnachweis für Wasserstoff-Pipelinesysteme .....	142
2.6	Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff .....	144
2.6.1	Explosionsgrenzen von Wasserstoff .....	148
2.6.2	Praktische Anleitung zum Explosionsschutz .....	156
2.6.3	Vermeidung von Sicherheitsrisiken beim Einsatz von Wasserstoff als Energieträger .....	161
2.7	Enthalpieänderung chemischer Reaktionen .....	164
2.7.1	Standardzustände chemischer Reaktionen .....	164
2.7.2	Verbrennung von Wasserstoff .....	169
2.7.2.1	Spezifische Kenngrößen der Verbrennung .....	169
2.7.2.2	Abgaszusammensetzung .....	171
<b>3</b>	<b>Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten .....</b>	<b>181</b>
3.1	Investition .....	183
3.2	Kapitalwertmethode .....	185
3.2.1	Diskontierter Cashflow .....	187
3.2.2	Sensitivitätsanalyse .....	191

<b>4</b>	<b>Technologiepfade mit Wasserstoff .....</b>	<b>193</b>
4.1	Die aktuelle Welt des Wasserstoffs .....	194
4.2	Sektorkopplung .....	198
4.3	Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland .....	202
4.4	Ausbau der Transportwege .....	208
4.5	Potenzial des Wasserstoffs zur Reduzierung der Treibhausgase ..	212
<b>5</b>	<b>Erzeugung von Wasserstoff .....</b>	<b>217</b>
5.1	Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Quellen .....	219
5.1.1	Dampfreformierung .....	220
5.1.2	Partielle Oxidation .....	227
5.1.3	Autotherme Reformierung .....	229
5.1.4	Kohle- und Biomassenvergasung .....	234
5.1.5	Carbon Capture and Storage – die Verwahrung von Kohlendioxid im Untergrund .....	237
5.1.5.1	Grundlagen der Gasspeicherung im porösen Gestein .....	244
5.1.5.2	Verrohrung einer Bohrung .....	247
5.1.5.3	Betrieb und Überwachung von Kohlendioxidspeichern .....	248
5.1.5.4	Transport von Kohlendioxid .....	249
5.1.6	Die thermische Pyrolyse .....	252
5.2	Elektrolytische Verfahren zur Wasserstofferzeugung .....	255
5.2.1	Die elektrochemischen Grundlagen der Elektrolyse .....	257
5.2.2	Die Thermodynamik der Elektrolyse .....	260
5.2.2.1	Temperaturbereich bis 100 °C .....	261
5.2.2.2	Die Bedeutung der freien Enthalpie für die Elektrolyse .....	263
5.2.2.3	Der Hochtemperaturbereich bei der Wasserelektrolyse .....	266
5.2.3	Die Effizienz der Elektrolyse .....	268
5.2.4	Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM) .....	272
5.2.5	Alkalische Elektrolyse (AEL) .....	278
5.2.6	Hochtemperaturelektrolyse (SOEC) .....	285
5.2.7	Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEM) .....	291
5.3	Biologische Wasserstofferzeugung .....	293
5.3.1	Biophotolyse .....	294
5.3.2	Mikrobielle Elektrolyse (MEC) .....	295

5.3.3	Fermentation .....	296
5.3.3.1	Photofermentation .....	299
5.3.3.2	Dunkle Fermentation .....	299
5.4	Verfahren zur Wasserstoffreinigung .....	302
5.4.1	Methoden zur Wasserstoffsauflbereitung .....	304
5.4.2	Besonderheiten bei der Membrantrennung .....	307
<b>6</b>	<b>Transport von Wasserstoff .....</b>	<b>309</b>
6.1	Leitungsgebundener Transport von Wasserstoff .....	309
6.2	Wasserstoffeinspeisung in Rohrleitungsnetze .....	319
6.3	Kompensation des Druckverlustes auf dem Transportsystem ..	324
6.4	Verwendung von nicht ortsfesten Transportbehältern .....	329
6.5	Liquid Organic Hydrogen Carrier .....	331
6.6	Transport von Wasserstoff in Ammoniak .....	334
6.7	Odorierung des Wasserstoffs .....	335
<b>7</b>	<b>Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff .....</b>	<b>341</b>
7.1	Verdichter für die Kompression von Wasserstoff .....	341
7.1.1	Kolbenverdichter .....	343
7.1.2	Membranverdichter .....	352
7.1.3	Schraubenverdichter .....	355
7.1.4	Turboverdichter .....	356
7.2	Gasmotoren und Gasturbinen in der zukünftigen Wasserstoffwelt .....	359
7.3	Expansionsanlagen in Wasserstofftransportsystemen .....	364
<b>8</b>	<b>Verflüssigung von Wasserstoff .....</b>	<b>371</b>
8.1	Grundlagen der Wasserstoffverflüssigung .....	372
8.2	Verflüssigungsprozesse .....	375
8.2.1	Ergänzungen zum Verflüssigungsprozess .....	378
8.2.2	Zur Energiebilanz des Verflüssigungsprozesses .....	380
<b>9</b>	<b>Speicher für den Wasserstoff .....</b>	<b>385</b>
9.1	Untertägige Speicherung von Wasserstoff .....	389
9.1.1	Geologische Voraussetzungen für die untertägige Wasserstoffspeicherung .....	389
9.1.2	Grundlagen der untertägigen Speicherung in Salzkavernen .....	391

9.1.3 Das Solverfahren von Salzkavernen .....	393
9.1.4 Gastechnische Ausrüstung von Speicherkavernen .....	395
9.1.5 Wasserstoff als Blanketmedium und als Speichergut .....	397
9.1.6 Kriterien für die Festlegung der Betriebsparameter .....	400
9.1.7 Obertägige Speicheranlagen .....	407
9.2 Wasserstoff in ortsfesten und beweglichen Druckbehältern .....	413
9.3 Speicherung von flüssigem Wasserstoff .....	416
9.4 Alternative physikalische Speicherverfahren .....	419
9.5 Stoffliche Wasserstoffspeicher .....	421
<b>10 Anwendungen für Wasserstoff .....</b>	<b>425</b>
10.1 Anwendungen im Industriesektor .....	425
10.1.1 Wasserstoff als Schlüssel zum klimaneutralen Stahl .....	426
10.1.2 Wasserstoff als Teil der Ammoniaksynthese .....	429
10.1.3 Wasserstoff wird zu Methanol .....	433
10.1.4 Wasserstoff für Prozesswärme in der metallverarbeitenden Industrie .....	434
10.2 Wasserstoff im Mobilitätssektor .....	434
10.2.1 Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr .....	435
10.2.2 Wasserstoff im Schienenverkehr .....	437
10.2.3 Wasserstoff bei Pkw und Zweirädern .....	439
10.2.4 Wasserstoff im Nutzfahrzeugbereich .....	441
10.2.5 Wasserstoff in Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen .....	443
10.2.6 Wasserstofftankstellen .....	446
10.3 Wasserstoff für Brennstoffzellen .....	449
10.3.1 Die Thermodynamik der Brennstoffzelle .....	450
10.3.2 Die Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC .....	451
10.3.3 Die alkalische Brennstoffzelle .....	455
10.3.4 Die phosphorsaure Brennstoffzelle .....	455
10.3.5 Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle .....	456
10.3.6 Die oxidkeramische Brennstoffzelle .....	456
10.3.7 Wasserstoff in Brennstoffzellen für grünen Ammoniak ..	457
10.4 Wasserstoff zur Umwandlung von Treibhausgasen .....	459
10.5 Wasserstoff in lokalen Netzen .....	465
10.5.1 Beurteilung der Wasserstoffversprödung .....	468
10.5.2 Einfluss der Odorierung auf die Wasserstoffreinheit .....	472
10.5.3 Rohrnetze als Energiespeicher für Wasserstoff .....	473
10.6 Wasserstoff im Wärmemarkt .....	481

<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>483</b>
<b>Anhang A .....</b>	<b>493</b>
1    Stoffdaten des n-Wasserstoffs .....	493
1.1 <i>T,s</i> -Diagramm .....	493
1.2    Realgaszahlen des n-Wasserstoffs .....	494
1.3    Spezifische Wärmekapazität .....	495
1.4    Isentropenexponent .....	495
1.5 <i>h,s</i> -Diagramm .....	496
1.6    Wärmeleitfähigkeit des n-Wasserstoffs .....	496
2    Bruchmechanische Werkstoffkennwerte .....	497
3    Explosionsschutz .....	499
4    Verbrennung von Wasserstoff .....	501
5    Spezifische Energiekosten in der Pkw-Mobilität .....	502
6    Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland und in anderen Ländern .....	502
7    Daten zur Elektrolyse .....	504
8    Zur Verflüssigung von Wasserstoff .....	504
9    Zur Speicherung von Wasserstoff .....	506
10    Grüner Ammoniak .....	507
<b>Anhang B: Einheiten und deren Umrechnungen .....</b>	<b>509</b>
<b>Anhang C: Formelzeichen und Einheiten .....</b>	<b>513</b>
<b>Anhang D: Abkürzungen und Eigennamen .....</b>	<b>521</b>
<b>Index .....</b>	<b>525</b>



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

# Vorwort

Im Zeichen der heutigen politischen und ökologischen Krisen sind zwei Jahre energiepolitisch ein langer Zeitraum. Seit der Veröffentlichung der zweiten Auflage meines Buches im März 2022 sind aus Planspielen über die Bedeutung der Wasserstofftechnologie konkrete Projekte mit grünem Wasserstoff entstanden. Bestehende Gasnetze werden als Kern eines zukünftigen grünen, überregionalen Wasserstoffnetzes umgestellt. Neu errichtete LNG-Terminals werden bereits für den zukünftigen Einsatz mit grünem Wasserstoff und Ammoniak vorbereitet. Elektrolyseanlagen in Deutschland sind Teil konkreter Planungen. Das sind ausreichende Gründe, um eine dritte Auflage zu veröffentlichen. Im Zuge dessen möchte ich auch auf mein zwischenzeitlich erschienenes Buch *Wasserstofftechnik. Aufgaben und Lösungen* (ISBN 978-3-446-47227-3) hinweisen, das eine optimale Ergänzung zum vorliegenden Werk darstellt.

Mein Ziel ist es, ein zusammenfassendes Lehrbuch für die Ausbildung von technischem Fachpersonal zu konzipieren. Ich bin dem Carl Hanser Verlag und insbesondere Frau Julia Stepp für die Unterstützung bei der Umsetzung dieser Idee dankbar.

Die Suche nach der zukünftigen Rolle des Wasserstoffs im Rahmen der Energiewende macht eine umfassende Darstellung notwendig, die einen „roten Faden“ durch das umfängliche Thema aus Sicht eines an der industriellen Praxis orientierten Ingenieurwissenschaftlers liefert. Wasserstoff als explosionsfähiges Gas, als Energieträger und als Grundstoff für die industrielle Anwendung hat viele Gemeinsamkeiten zum Methan und damit zum Erdgas. Wir können dabei auch auf die Erfahrungen aus den ersten hundert Jahren der Gaswirtschaft bis zum Beginn des Erdgaszeitalters Mitte der 1960er-Jahre mit dem wasserstoffhaltigen Stadt- und Kokereigas zurückgreifen. Die sachlichen Überschneidungen, die vorhandenen Erfahrungen im Umgang mit Gasen verschiedenster Herkunft und Zusammensetzung, aber auch die Unterschiede in einem überschaubaren Rahmen interessant und nachvollziehbar darzustellen, sind für mich als Autor eine Herausforderung. Auch in dieser dritten Auflage konnte ich diese Aufgabe nur mit der Unterstützung vieler Menschen und Unternehmen, die sich der Verwirklichung der Wasserstoff-

wirtschaft und einer nachhaltigen Energiewende in Deutschland verschrieben haben, gerecht werden.

Es ist mir ein Bedürfnis, an dieser Stelle die unterstützenden Unternehmen zu nennen, die im Zuge der Weiterentwicklung des Buches neu hinzugekommen sind oder ihre in früheren Auflagen gelieferten Informationen aktualisiert haben. Hierzu zähle ich die Unternehmen und Institutionen Aerzener Maschinenfabrik GmbH, Robert Bosch GmbH, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Emcel GmbH, Enapter S.r.l., Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Hoeller Elektrolyzer GmbH, Hydrogenious LOHC Technologies GmbH, MAN Energy Solutions SE, McPhy Energy Deutschland GmbH, MTU Aero Engines AG, Nowega GmbH, Sauer & Sohn Maschinenbau GmbH, Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, Sunfire GmbH, thyssenkrupp Steel Europe AG, Thyssengas GmbH, Vopak Terminal Europoort (Rotterdam) sowie Wystrach GmbH.

Steinfurt, Mai 2024

*Thomas Schmidt*

# Die Autoren



**Thomas Schmidt**, Dr.-Ing. (Maschinenbau),  
FH Münster, Fachbereich Energie · Gebäude · Umwelt



**Maximilian Schmidt**, Dr. rer. nat. (Physik),  
Abschnitt 1.2, Abschnitt 10.5.1



**Andrea Wilkening**, M.Sc. (Wirtschaftsingenieurwesen), Abschnitt 10.5.3



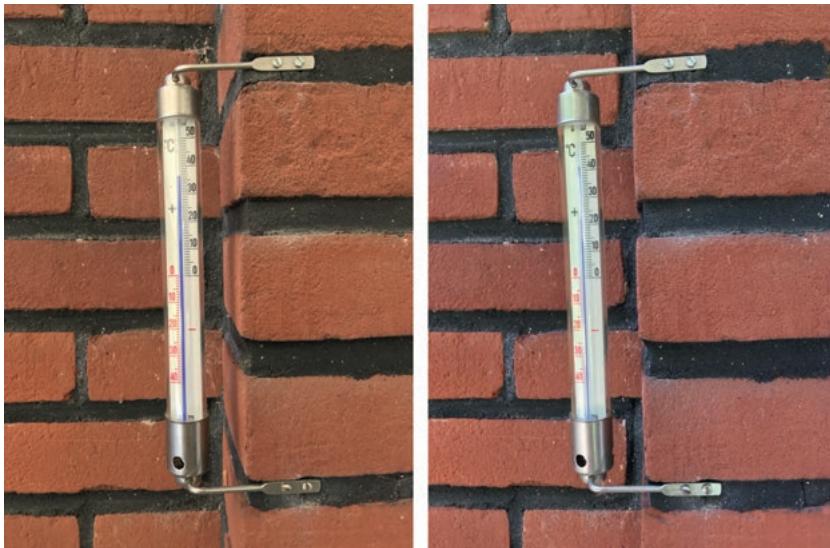
# 1

# Einführung

In diesem Kapitel geht es zunächst um die Frage, warum das Thema Wasserstoff von Interesse ist. Was bewegt mich, zu Erzeugung, Transport, Speicherung, Verflüssigung, Anwendung von Wasserstoff und weiteren Sachthemen ein viele Facetten umfassendes Fachbuch zu schreiben, obwohl es bereits Literatur gibt, die sich vornehmlich mit Wasserstoff beschäftigt, und die Anzahl der weltweit in den letzten Jahren erschienenen Studien und Untersuchungen schon unübersichtlich groß ist?

## ■ 1.1 Das Interesse am Element Wasserstoff

Die Idee, dieses Fachbuch zu schreiben, ist mir im heißen Sommer 2018 gekommen. Da sich die ungewöhnlich lang andauernde Hitze auch im Jahr 2019 und den darauffolgenden Jahren wiederholte, möchte ich mit einer Reminiszenz beginnen. Zwei Jahre hintereinander litt Europa über Wochen unter einem extrem heißen Sommer mit Temperaturen knapp unter vierzig Grad. Der Sommer 2018 mit seinen extremen Wetterverhältnissen war also kein singuläres Ereignis, wie in Bild 1.1 dokumentiert.



**Bild 1.1** Temperaturmessungen in Bad Oeynhausen (Westfalen) am 27.Juli 2018 gegen 17 Uhr (links, 36,5 °C) und am 19.Juli 2022 gegen 16 Uhr (rechts, 41,5 °C)

Bereits drei Jahre zuvor stöhnte der Süden Deutschlands unter Temperaturen bis 40 °C (Kitzingen am Main, 7. August 2015). Die Sommermonate 2018 waren verbunden mit einer bis dahin ungewöhnlichen, sich über Monate erstreckenden Trockenheit. Bild 1.2 lässt dies deutlich am geringen Wasserstand der Weser an der Porta Westfalica mit nur noch knapp 90 cm Anfang September 2018 erkennen. Um diesen Wert einschätzen zu können, sei darauf verwiesen, dass der über Jahrzehnte ermittelte niedrigste Wert der Wasserstände an der Mittelweser etwa um die Hälfte höher war. In den Sommern danach wiederholten sich die extremen Wetterverhältnisse und die über Monate währende Trockenheit bedrohte in Teilen Westdeutschlands neben der Flora auch die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung. Zum Jahreswechsel 2023/2024 stellte ich fest, dass die Extremwetterlagen mit Hitze und Starkregen und ihre Folgen wie weit verbreitete Dürre und Flächenbrände, aber auch Zeiten mit extremem Hochwasser in Europa stark zugenommen haben. Die von der Wissenschaft in unzähligen Untersuchungen getroffene Aussage über die von Menschen verursachte Klimaveränderung auf unserer Erde wird unter den geschilderten Umständen zur Gewissheit.

Die Frankfurter Allgemeine Zeitung veröffentlichte am 26.Juni 2019 in ihrer Mittwochsausgabe unter der Rubrik „Natur und Wissenschaft“ unter einer beeindruckenden Farbgrafik von Ed Hawkins (2019) folgenden kurzen, aber bestechend zutreffenden Artikel von Müller-Jung (2019, S. N1):

*„So einfach wie möglich, aber auch nicht einfacher – der Aufruf an die Wissenschaftler, die immer komplexer scheinenden Vorgänge in der Natur verständlich*

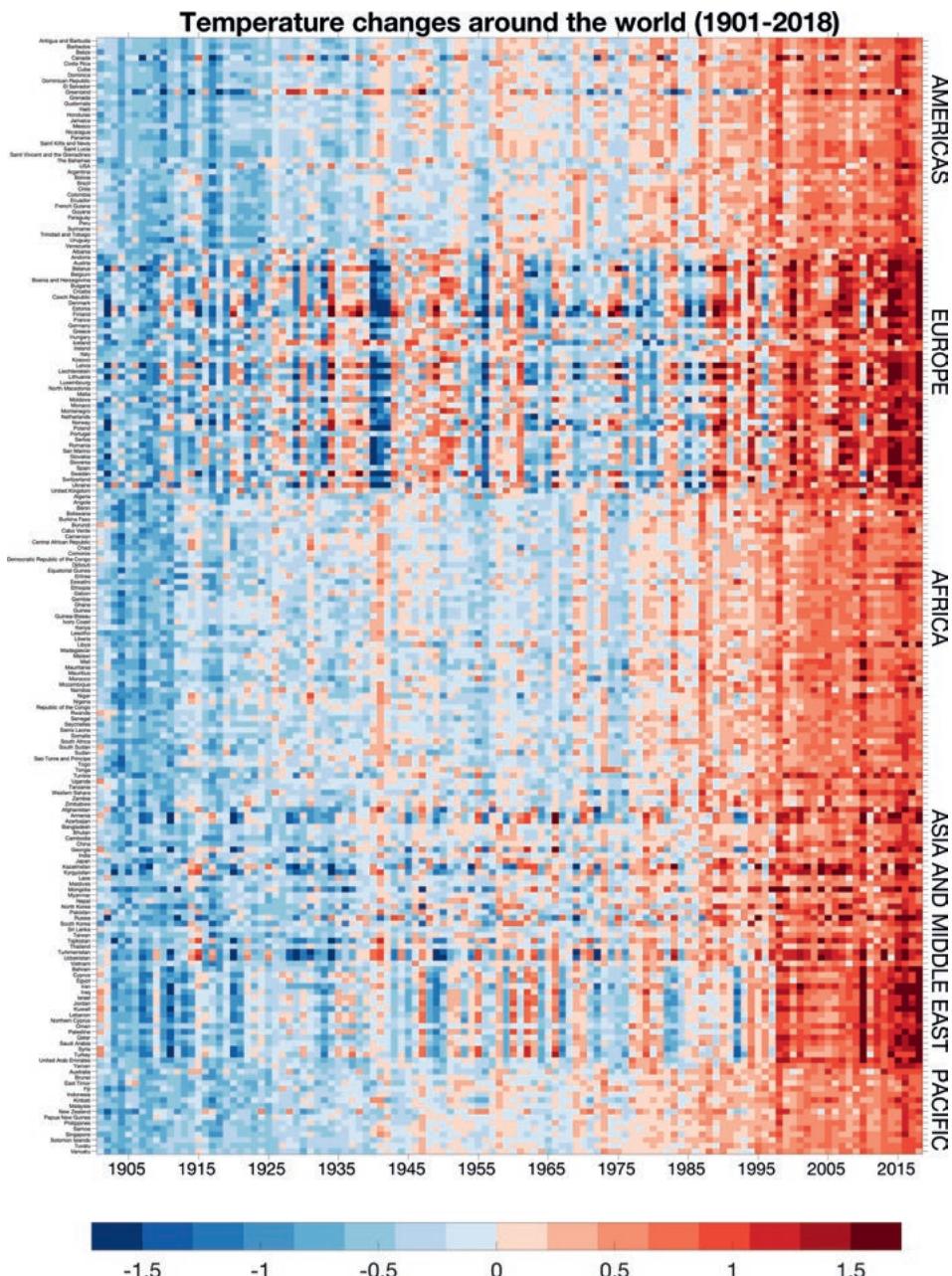
und zugleich korrekt zu erklären, wird Albert Einstein zugeschrieben. Und es stimmt ja, heute wie damals: Die Wissenschaft macht es ihrem Publikum nicht immer einfach. Auf den ersten Blick einleuchtend ist sie selten, und sie ist es umso weniger, je abstrakter ein Phänomen daherkommt. Auch die globale Erwärmung ist für viele ein solches Abstraktum. Und wären da nicht die sich häufenden Ausreißer wie die Hitze dieser Tage, die lange als reines Wetterphänomen wahrgenommen wurden, viele würden wohl weiter zweifeln, ob Klimaschutz und Klimapolitik sinnvoll sind.

Dass sich das geändert hat, dass die ökologische Gefahr heute mehrheitlich gesehen wird, wie sie zivilisatorisch gesehen werden muss, nämlich als rasende Bedrohung für Mensch und Natur, das ist auch dem britischen Klimaforscher Ed Hawkins von der University of Reading mit seinen ikonografischen Farbgrafiken zu verdanken. Hawkins visualisiert Jahresschnittstemperaturen in Streifenmustern. Die Daten stammen von Wetterdiensten oder dem Berkeley-Messdatensatz. Dargestellt in blauen oder roten Farbtönen sind die Temperaturabweichungen vom langjährigen Mittel, gemessen zwischen 1970 und 2000. Datenlücken sind weiß. In diesem Jahr nun hat Hawkins die Jahresstreifen aus allen Ländern der Erde seit dem Jahr 1990 zu einem gewaltigen Farbmosaik zusammengestellt. Auf den ersten Blick und für jeden ist die Dramatik der jüngsten Erwärmung erkennbar – mehr als eigentlich: der „Notstand“, das Krisenhafte, das die Klimaaktivisten und Forscher heute gleichermaßen beklagen, sticht sofort ins Auge: Es ist die beispiellose Beschleunigung des Klimawandels in der jüngsten Vergangenheit. Viele Zahlen braucht es nicht, die Farben sprechen hier eine klare Sprache.“



**Bild 1.2** Die Weser als Rinnsal am 2. September 2018 mit einem Wasserstand von 90 cm bei Bad Oeynhausen (Westfalen)

„Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“ wäre die treffende Einführung in die Beschreibung von Bild 1.3, für das als Überschrift auch gelten könnte: „Der Planet glüht“.



**Bild 1.3** Visualisierte Abweichungen der Jahresdurchschnittstemperaturen der Jahre 1901 bis 2018 in der FAZ-Ausgabe vom 20. Juni 2019 (© Ed Hawkins)

### 1.1.1 Zielvorgaben der Politik

Dieser Einsicht folgend hat sich die Bundesregierung mit der Unterschrift zur Pariser Klimakonferenz verpflichtet, den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen ( $\text{CO}_2\text{-äq.}$ ) gegenüber dem Stand von 1990 um 95% zu senken. Nach dem Klimaschutzplan 2050 des Umweltbundesamtes (UBA) nach T. Schmeja et al. (2016, S.7) haben die Beschlüsse der Pariser Klimakonferenz Ende 2015 zur Folge, dass bei konsequenter Umsetzung die gesellschaftliche und wirtschaftliche Zukunft der Weltgemeinschaft kohlenstoffarm und klimaverträglich sein muss. Das Ziel weltweiten Handelns muss sein, maximal  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , besser  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  Temperaturerhöhung gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau nicht zu überschreiten. Andernfalls droht der Gattung Mensch die Unbewohnbarkeit des Planeten.

Bereits nach der 3. Internationalen Klimakonferenz von Kyoto 1997 (COP 3) wurde eine Klimarahmenkonvention mit Begrenzungsverpflichtungen international vereinbart. Seitdem haben sich in Deutschland Politik, Gesellschaft und Wirtschaft aufgemacht, die zuvor genannten Ziele in Umsetzungsvorhaben zu beschreiben.

Um die Ziele aus dem Klimaschutzgesetz 2021 zu erreichen, müssen die einzelnen Sektoren jeweils ihren Beitrag zur Reduzierung der noch weiter zunehmenden schädlichen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen aus Kohlendioxid, Methan und Lachgas) beisteuern, deren ansteigende Konzentration seit Mitte des letzten Jahrhunderts Bild 1.4 zu entnehmen ist. Schaut man auf den Emissionsanteil der einzelnen Sektoren wie Energiewirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft etc. in Bild 1.5, sind im Sektor Verkehr keine wirklich signifikanten Reduktionen gegenüber dem Stand von 1990 zu erkennen. Der technische Fortschritt in der Abgas- und Motoren-technik wird durch den Anstieg des Pkw-Verkehrs und Schwerlastverkehrs in den vergangenen 30 Jahren und durch ein verändertes privates Käuferverhalten – steigender Anteil verbrauchsintensiver SUV am Pkw-Bestand – hinsichtlich der Abgasmengen konterkariert. Auch der Rückgang der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor stagniert. Wie in Zukunft die Wohnhäuser und gewerblich genutzten Gebäude mit Wärme versorgt werden sollen, wenn Erdgas und Erdöl nicht mehr zur Verfügung stehen, ist in Deutschland Gegenstand der kommunalen Wärmeplanung. Ein „Weiter so“ – also die Fortschreibung des bisherigen Tempos bei der THG-Reduzierung – wird zu einem Scheitern der deutschen Klimapolitik führen. Nun muss sich also der Blick in die Zukunft und auf die Jahre 2030 und 2045 richten. Spätestens dann will Deutschland über alle Sektoren kohlenstofffrei sein.

Um das in Paris anvisierte  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Ziel zu erreichen, sind zukünftig erhebliche jährliche THG-Reduktionen erforderlich, die die bisher im Zeitraum von 1990 bis 2022 erreichten jährlichen Reduktionen von etwa 16 Mill. t  $\text{CO}_2$  um den Faktor 2,1 übertreffen. Die Zahl macht deutlich, welche Anstrengungen in Zukunft notwendig sind.

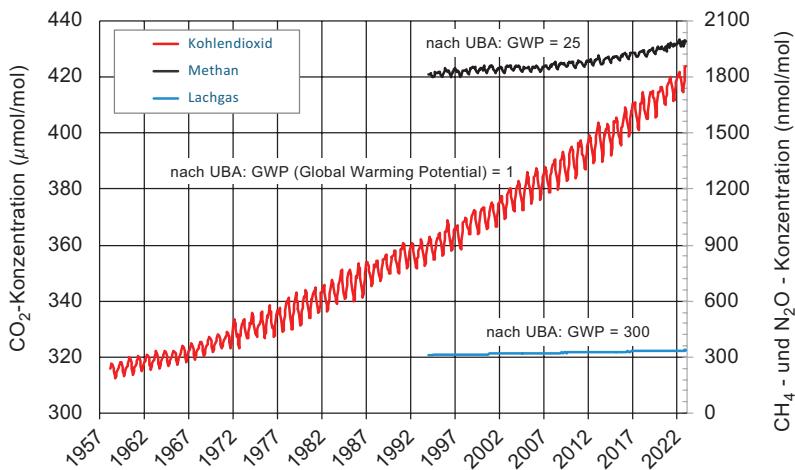


Bild 1.4 Entwicklung der weltweiten Treibhausgasemissionen nach dem Umweltbundesamt

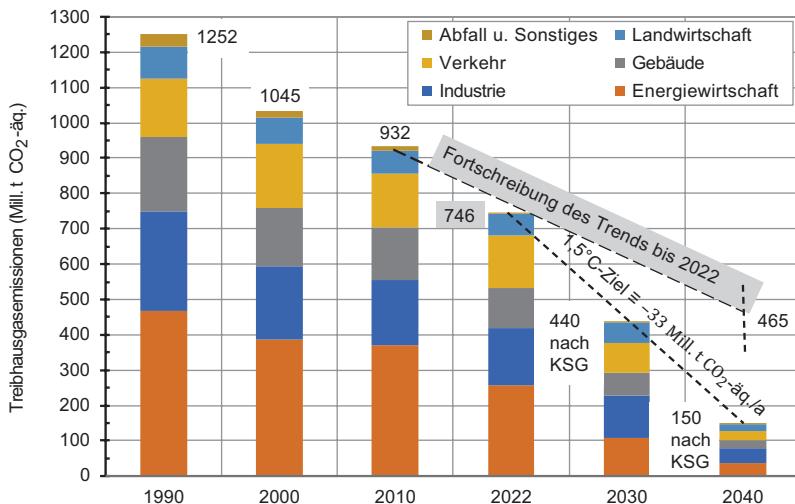
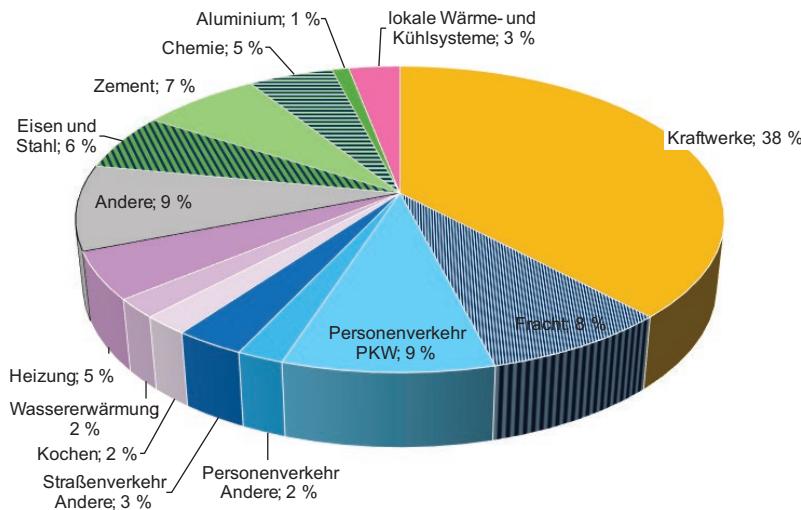


Bild 1.5 Ziele, historische Entwicklung und Trends der deutschen Treibhausgasemissionen nach dem Umweltbundesamt

Bei der Betrachtung der weltweiten THG-Emissionen nach Sektoren nach einer Studie der internationalen Energieagentur für erneuerbare Energien IRENA von R. Mirande et al. (2018, S. 12) in Bild 1.6 wird deutlich, dass insbesondere in den Sektoren Fracht (Schwerlastverkehr) und Personenverkehr Andere (Bus, Bahn auf nicht elektrifizierten Strecken), in den Bereichen Eisen, Stahl und Chemie, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), aber auch teilweise in den Sektoren Heizung und lokale Wärmesysteme die bislang verwendeten fossilen Brenn- und Grundstoffe nicht eins zu eins durch Strom zu ersetzen sind.



**Bild 1.6** Weltweite THG-Emissionen nach Sektoren (2015)

Der durch erneuerbare Energien erzeugte Wasserstoff kann in den genannten Bereichen als Substitut der fossilen Stoffe und darüber hinaus als Bindeglied zwischen dem Strom- und Gasnetz zum Zwecke der Speicherung von regenerativ erzeugtem Strom (PtG) einen wesentlichen Beitrag zum Abbau der weltweiten THG-Emissionen leisten.

Neben dem Aspekt des klimaverträglichen Umbaus der Sektoren spielt das Motiv, vornehmlich für die deutsche Industrie eine größere Unabhängigkeit von Rohstoffimporten zu erreichen, eine nicht unerhebliche Rolle bei der Gestaltung einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft. In der im Jahr 2023 aktualisierten Nationalen Wasserstoffstrategie sollen insbesondere die Sektoren Energie (Kraftwerke) und Industrie (Eisen und Stahl, Chemie) von der Wasserstoffwirtschaft profitieren.

### 1.1.2 Strategien zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft

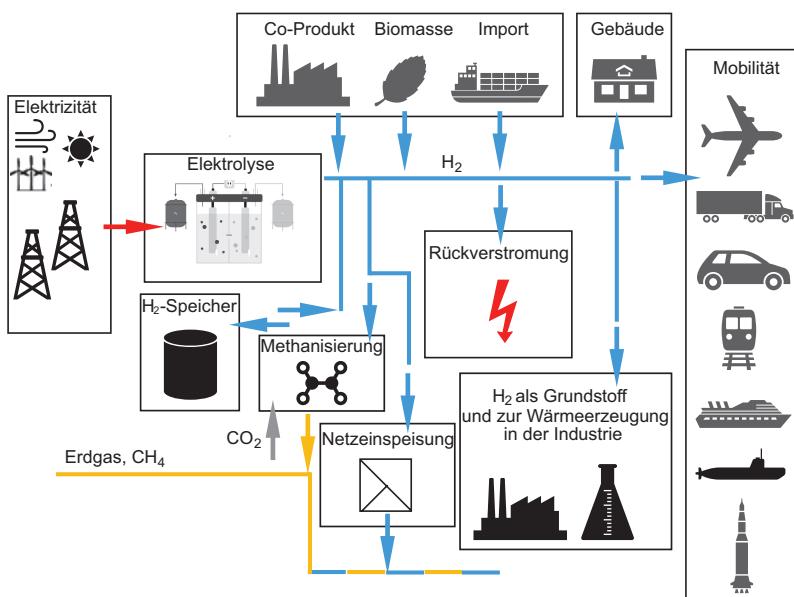
In den führenden Industriestaaten hat man die Chancen und Möglichkeiten, die im Element Wasserstoff als Energieträger und Grundstoff stecken, erkannt und erste Strategien zur Implementierung einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft entwickelt. So ließ eine Nachricht des 9. deutsch-japanischen Umwelt- und Energiedialogforums zu emissionsarmen Transportsystemen und Möglichkeiten zur effektiven Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor (NEDO, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit & Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2018, S.23) aufhorchen. Die japanische Regierung hat im Dezember 2017 die „Basic Hydrogen Strategy“ ins Leben gerufen. Das Ziel der Japa-

ner ist die Schaffung einer Wasserstoffgesellschaft bei gleichzeitiger Reduzierung der Herstellungskosten von Wasserstoff auf dem Niveau der fossilen Energieträger. Japan konzentriert sich auf die Implementierung der Wasserstoffnutzung in Brennstoffzellen (BZ) und im Verkehrsbereich und beabsichtigt, die weltweit führende Nation mit erprobter Wasserstofftechnik zu werden. Die nach einer Studie der NEDO (2015, S.79) beeindruckende Zahl von über 500 000 BZ-Einheiten im Betrieb im Jahr 2025 – das entspräche etwa 50 % der dann weltweit im Einsatz befindlichen BZ – unterstreicht diese Absicht.

Auch Deutschland verfolgt in der weiteren Entwicklung der Wasserstofftechnik das Ziel, Forschung und Entwicklung zu intensivieren sowie Standardisierung und Regelwerke voranzutreiben, damit Wasserstofftechnologien in Industrie und Gesellschaft eine breite Anwendung finden. In dem im Juli 2023 erfolgten Update der Nationalen Wasserstoffstrategie sollen im Land bis spätestens 2030 Elektrolyse-Kapazitäten von zehn Gigawatt geschaffen werden, was der Leistung von zehn Atomkraftwerksblöcken entspricht. Die damit im Inland herstellbaren Wasserstoffmengen reichen aus, um etwa 30 bis 50 % des Wasserstoffbedarfs zu decken. Der nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) für die Regelwerkssetzung im Gasbereich verantwortliche Deutsche Verein für die Gas- und Wasserversorgung (DVGW) erarbeitet ein neues Regelwerk für die Anlagentechnik mit Wasserstoff. Weltweit werden derzeit auf der Basis fossiler Stoffe je nach Quelle Wasserstoffvolumina in einer Größenordnung von 570 bis 730 Mrd. m<sup>3</sup> im Normzustand produziert. Dieses Volumen entspricht einem Energieinhalt von 2017 TWh bis 2584 TWh bezogen auf den vollständigen Energieinhalt des Gases. Zur besseren Einordnung erfolgt hier der Vergleich mit dem in der Bundesrepublik Deutschland, der nach den USA, China und Japan viertgrößten Volkswirtschaft, festgestellten Primärenergieverbrauch (PEV). Dieser entsprach 2022 nach Auskunft des Umweltbundesamtes einer Größe von ca. 3300 TWh und gibt den Energiegehalt aller im Inland eingesetzten Energieträger wie zum Beispiel Erneuerbare Energien, Braun- und Steinkohle, Mineralöl oder Erdgas, die entweder direkt genutzt oder in sogenannte Sekundärenergieträger wie zum Beispiel Kohlebriketts, Kraftstoffe, Strom oder Fernwärme umgewandelt werden, wieder.

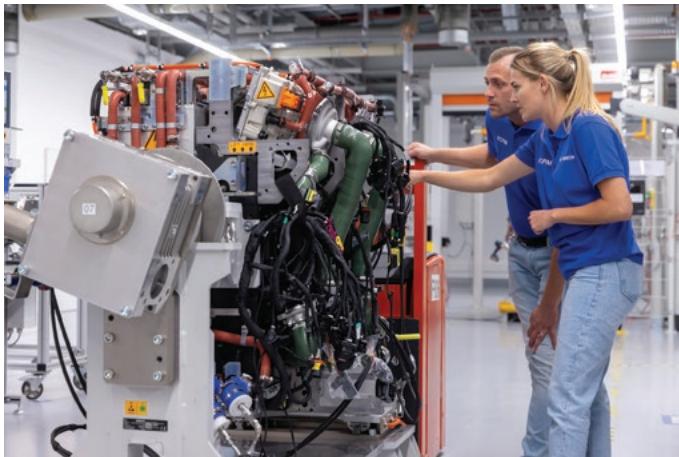
Die skizzenhafte Darstellung in Bild 1.7 beschreibt die verschiedenen Optionen, die mit dem Begriff Wasserstoffwirtschaft verbunden sind. Hier ist zunächst die Verknüpfung der Sektoren Strom und Gas über eine Elektrolyseanlage zu nennen. Windkraft, PV-Anlagen und Wasserkraft sind die Technologien, die das Stromnetz zukünftig fluktuiert speisen. Durch den Umstand, dass der Saldo der Strom einspeisung und Stromausspeisung in die verschiedenen elektrischen Übertragungsnetze vom Windangebot sowie der Intensität der lokalen Sonneneinstrahlung und auch vom Verbrauchsverhalten der Haushalts-, Industrie- und Gewerbekunden abhängt, ist es zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität notwendig, negative und positive Regelleistung vorzuhalten. Elektrolyseanlagen und Anlagen zur Rückver-

stromung in Verbindung mit elektrischen Speichersystemen können einen wesentlichen Teil dieser Aufgabe erfüllen. Dies gilt gleichermaßen auch für die erforderlichen Regelleistungen in einem Mischgasnetz über die direkte Einspeisung von Wasserstoff bis zu einer festgelegten Beimischungsgrenze des Wasserstoffs oder durch die Injektion von synthetischem Methan nach einem verfahrenstechnischen Prozess unter der Beteiligung von Wasserstoff und Kohlendioxid. Wasserstoff ist also in der Lage, kurzfristig zur Bereitstellung von Regelenergielieistung, aber auch saisonal über einen längeren Zeitraum über vorhandene Gasspeicherelemente die Aufgabe der indirekten Stromspeicherung zu gewährleisten. Somit wird das wiederholt gegen die regenerative Energiewandlung vorgebrachte Argument einer nicht vorhandenen Speicherfähigkeit des Gesamtsystems entkräftet.



**Bild 1.7** Technologiepfade einer Wasserstoffwirtschaft

Wasserstoff ist zukünftig nicht nur in Japan, sondern auch in Europa grundsätzlich in der Lage, über die Brennstoffzelle Antriebsenergie auch für die Mobilität zur Verfügung zu stellen. Im Stuttgarter Werk Feuerbach der Robert Bosch GmbH werden seit über 100 Jahren Teile für die Mobilität gefertigt. 1910 startete die Fertigung von Magnetzündteilen, 1927 war der Fertigungsbeginn von Diesel-Einspritzpumpen für Nutzfahrzeuge. Im Juli 2023 hat hier die Serienfertigung des Brennstoffzellen-Antriebssystems (Fuel-Cell-Power-Module; FCPM), wie in Bild 1.8 zu sehen, auf einer Fläche aktuell fast so groß wie ein halbes Fußballfeld begonnen.



**Bild 1.8** Serienfertigung des Brennstoffzellenmoduls FCPM der Robert Bosch GmbH im Stuttgarter Werk Feuerbach (© Robert Bosch GmbH)

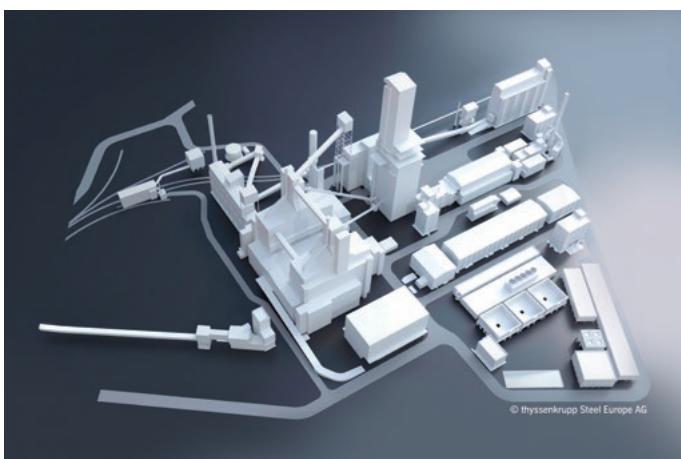
Besondere Bedeutung wird Wasserstoff für den Verkehrssektor haben. Vergleichbar lange Wartezeiten für das Auftanken einer Lithiumionen-Batterie im stromange triebenen Bus (BEV) und die logistische Anstrengung zum Aufbau einer flächendeckenden Ladesäuleninfrastruktur entfallen bei den mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen. Kurze Betankungszeiten an Wasserstoftanksäulen und höhere Speicherdichten im Tanksystem sowie eindeutig längere Fahrtstrecken mit einer Tankfüllung gegenüber der Batteriekapazität im BEV sind eindeutige Vorteile der Wasserstofffahrzeuge. Dies ist insbesondere für den öffentlichen Personennahverkehr mit Bussen und Schienenfahrzeugen auf nicht elektrifizierten Strecken von großem Interesse. Seit sechs Jahren fährt das in Bild 1.9 dargestellte Brennstoffzellenzugsystem Coradia iLint des Herstellers Alstom Transport Deutschland GmbH auf der ca. 100 km langen Strecke zwischen Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde und Buxtehude der Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Weser-Elbe GmbH (EVB). In Norddeutschland – und mit vergleichbarer Technik auch in Japan im Großraum Tokio – haben Brennstoffzellenzüge mittlerweile große Aufmerksamkeit erlangt.

Die deutsche Stahlindustrie leidet unter der Konkurrenz aus Fernost, die zu völlig anderen Bedingungen und Kosten produzieren kann. So hat sich die thyssenkrupp Steel Europe AG aufgemacht, die Stahlproduktion in Duisburg mit einer neuen Strategie bis 2050 klimaneutral zu gestalten. Das Unternehmen bekennt sich ausdrücklich zum Pariser Klimaschutzabkommen von 2015. Als ersten Schritt hat thyssenkrupp Steel sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 die Emissionen aus Produktion und Prozessen im eigenen Unternehmen sowie die Emissionen aus dem Bezug von Energie gegenüber dem Referenzjahr 2018 um 30 Prozent zu senken, und sieht im Einsatz von Wasserstoff beispielsweise bei der Direktreduzierung von Eisen mithilfe von Wasserstoff zu Eisenschwamm und dessen Weiterverarbei-

tung im Hochofen eine der Schlüsseltechnologien. Der hierfür benötigte Wasserstoff wird langfristig über Pipelinesysteme bezogen oder direkt vor Ort elektrolytisch gewonnen. Eine erste Anlage zur Direktreduzierung entsteht bis 2026 auf dem Werksgelände am Duisburger Südhafen zwischen den Stadtteilen Alt-Walsum und Fahrn. Einen Eindruck vom Umfang der Anlage zeigt Bild 1.10.



**Bild 1.9** Mit Wasserstoff betriebener Brennstoffzellenzug Coradia iLint der Alstom Transport Deutschland GmbH auf der Strecke Cuxhaven – Buxtehude der EVB (© Alstom Transport Deutschland GmbH)



**Bild 1.10** Modell der geplanten Duisburger Anlage zur Direktreduzierung mit dem Zweck der Stahlerzeugung mithilfe von Wasserstoff (© thyssenkrupp Steel Europe AG)

Ein vergleichbares Ziel verfolgt die niedersächsische Salzgitter AG beispielsweise in der Glüherei und in Feuerverzinkungsanlagen, in denen Wasserstoff als Schutzgas zum Einsatz kommt. Auch bei der Salzgitter AG wird der mit Wasserstoff angetriebene Direktreduktionsprozess von Eisen vorangetrieben. In diesem Unternehmen setzt man bei der Wasserstoffproduktion auch auf die Hochtemperaturelektrolyse, in der statt mit flüssigem Wasser mit Wasserdampf bei etwa 150 °C, der mittels Abwärme aus der Stahlproduktion erzeugt wird, der elektrolytische Prozess zur Erzeugung von Wasserstoff und Sauerstoff unterstützt wird. Auch der österreichische Technologiekonzern Voestalpine geht mit modernen Elektrolyseanlagen der deutschen Siemens AG diesen Weg.

Die Shell Deutschland Oil GmbH arbeitet in ihrem Werk Wesseling bei Köln an der Verwendung von elektrolytisch hergestelltem „grünen“ Wasserstoff zur Produktion von synthetischen Kraftstoffen und setzt dabei auf die PEM-Technologie von ITM Power. Ziel des Unternehmens ist es, die CO<sub>2</sub>-Intensität des Standortes zu reduzieren. Für den Verkehrsraum Köln erwartet Shell den Aufbau einer neuen Wasserstoff-Modellregion, die auf Technologie rund um Tankstellen sowie den Auto- und Buseinsatz setzt.

Wasserstoff wird im Inland erzeugt oder von außen importiert und an anderen Stellen im Land verwertet. Um die verschiedenen Akteure der Wasserstoffwirtschaft zu verbinden, wird innerhalb eines Zeitraums von etwa 20 Jahren ein Transportnetz geknüpft, das als Wasserstoffkernnetz ehemalige Erdgasleitungssysteme und neu errichtete Leitungen sowie für den Import Hafenstrukturen und geeignete Seewege umfasst.

Bei der Energiewandlung und im industriellen Einsatz kann Wasserstoff die Transformation der Industriegesellschaft hin zu einer klimaneutralen Zukunft wirkungsvoll unterstützen. In diesem Buch werden die physikalischen und technischen Grundlagen im Umgang mit Wasserstoff dargestellt, Szenarien und Mengengerüste einer Wasserstoffwirtschaft vorgestellt und die relevanten Technologien der Erzeugung, des Transportes und der Speicherung sowie in der Anwendung behandelt.

## ■ 1.2 Wasserstoff im öffentlichen Diskurs der ökologischen Transformation

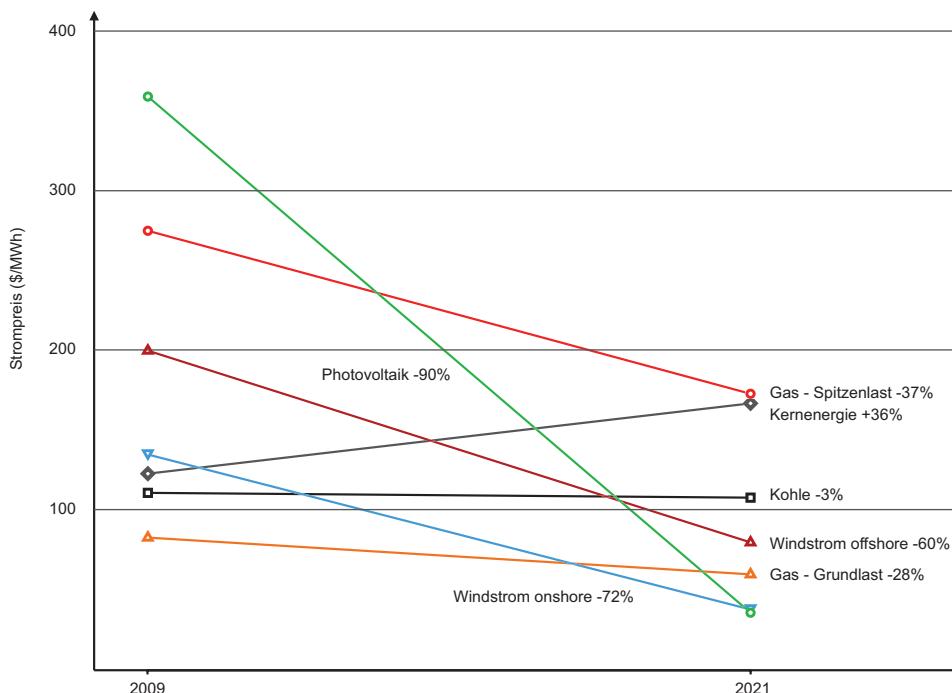
An dieser Stelle wird die Rolle von Wasserstoff in der ökologischen Wende diskutiert. Verschiedene Aspekte der öffentlichen Diskussion um Wasserstoff, insbesondere die skeptische Grundhaltung der Umweltbewegung gegenüber Wasserstoff, werden beleuchtet. Ziel ist es, die verschiedenen Kritikpunkte darzustellen und ihre Hintergründe zu erklären.

Die ökologische Wende, eine Transformation der gegenwärtigen, auf fossilen Brennstoffen basierenden Wirtschaft zu einer nachhaltigen Wirtschaftsform, beinhaltet die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) als Kernkonzept. Die Circular Economy begreift die Wirtschaft als eingebettet in natürliche Kreisläufe, im Gegensatz zur vorherrschenden linearen Form des Wirtschaftens. Eine lineare Wirtschaft funktioniert als Einbahnstraße: Natürliche Ressourcen werden extrahiert, in Produkte umgewandelt, konsumiert und schließlich als Abfall entsorgt. Im Gegensatz dazu will die Circular Economy Stoffkreisläufe schließen, sodass kein Abfall mehr entsteht. Dabei werden Materialien grundsätzlich unterschieden in natürliche, regenerative Materialien und technische, nicht-regenerative Materialien. Zu Letzteren gehören zum Beispiel alle Produkte, die auf Erdölbasis hergestellt werden.

Wie passt Wasserstoff in dieses Konzept? Wasserstoff wird mitunter auch als „das neue Öl“ bezeichnet, womit man sich in erster Linie auf das enorme ökonomische Potenzial bezieht. Doch bei genauerer Betrachtung ist diese Bezeichnung irreführend, denn Wasserstoff als Speichermedium könnte kaum verschiedener von Erdöl sein. Erdöl, wie Erdgas und Kohle, entsteht durch langwierige Prozesse und ist daher, zumindest auf menschlichen Zeitskalen, nicht regenerierbar und zerfällt am Ende der Verwertung in verschiedene Endstoffe. Zudem ist es auf der Erde sehr ungleich verteilt. Wasserstoff hingegen kann aus Wasser, das man überall auf der Erde findet, hergestellt werden und nach seiner Verwertung, das heißt nach der Rückumwandlung in Strom in der Brennstoffzelle, erhält man Wasser zurück. Es handelt sich also um einen Kreislauf. Hinzu kommt, dass es bei Austreten von Wasserstoff zwar zu Verbrennungsprozessen kommen kann, jedoch im Gegensatz zu Erdöl keine giftigen Stoffe die Umwelt verschmutzen. Wasserstoff passt deshalb gut in das Konzept der Circular Economy und kann zur Verdrängung der fossilen Brennstoffe aus der Wirtschaft beitragen.

Doch es gibt auch viele Vorbehalte gegen den großkaligen Einsatz von Wasserstoff. Da wären zum einen die möglichen Anwendungsbereiche von Wasserstoff. Diese sind weit gefächert – vom Einsatz in Industrieanlagen über den Mobilitätsbereich bis zu stationären Großspeichern. Insbesondere der Einsatz im Mobilitätsbereich wird kontrovers diskutiert. Die Ökonomin Claudia Kemfert vom Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung hat dabei den Begriff vom Wasserstoff als „Champagner der Energiewende“ geprägt (2020). Damit ist gemeint, dass sein Einsatz in Fahrzeugen aufgrund des geringeren Gesamtwirkungsgrades solchen Fahrzeugtypen vorbehalten sein sollte, in denen der Einsatz von Akkus aufgrund ihrer geringeren Energiedichte nicht plausibel ist, zum Beispiel in Flugzeugen und Schiffen. Auf der anderen Seite steht hier das Argument, dass man mit Wasserstoff-basierten Antrieben die vorhandene Infrastruktur von Tankstellen auch im Individualverkehr nutzt. Dadurch könnten die konventionellen Verbrenner schneller vom Markt verdrängt werden als mit einer Fokussierung auf elektrische Fahrzeuge, für die noch aufwendig eine Infrastruktur von Ladesäulen aufgebaut werden muss.

Ein weiterer Punkt ist die Erzeugung von Wasserstoff. Zwar sind sich alle Beteiligten einig, dass am Ende der Energiewende nur noch grüner, also aus regenerativen Energiequellen erzeugter Wasserstoff zum Einsatz kommen wird. Auf dem Weg dorthin werden jedoch wahrscheinlich Übergangstechnologien, bei denen grauer, blauer oder türkiser Wasserstoff (Abschnitt 5.1) erzeugt wird, zur Anwendung kommen. Diesen Technologien begegnet die Umweltbewegung mit großem Misstrauen. Warum ist das so? Der Verdacht lautet, dass hier die Industrie ihre Geschäftsmodelle bewahren will. So würde durch Investitionen in Übergangstechnologien der eigentliche Übergang zu rein regenerativer Erzeugung letztlich verlangsamt oder sogar verhindert. In den letzten zwanzig Jahren ist der Preis von regenerativer Stromerzeugung durch die Investitionen in die Technologien und ihre breitere Anwendung extrem gefallen. Bild 1.11 nach M. Roser (2024) zeigt dies für den Zeitraum von 2009 bis 2021 für Photovoltaik und Onshore-Windstrom im Vergleich zu fossilen Erzeugungsformen. Diese Dynamik kann durch Übergangstechnologien ausgebremst werden. Das Misstrauen gegenüber der Industrie basiert auf den Erfahrungen der letzten Jahrzehnte, in denen immer wieder Einfluss auf die Politik genommen wurde, um auf fossilen Energieträgern basierende Geschäftsmodelle zu bewahren oder zu fördern.



**Bild 1.11** Preisentwicklung der Stromerzeugung aus Investitionen und Betriebskosten nach M. Roser (2024)

# Index

## A

- Ammoniak 334, 429
  - Cracker 432
  - Stickstoffgewinnung 431
  - Synthese 429
- autotherme Reformierung 229

## B

- Betriebsfahrweise 110
  - quasistationär 110
  - schwelend 110
  - wechselnd 110
- Biogas 297
- biologische Wasserstofferzeugung 294
  - Biophotolyse 294
  - dunkle Fermentation 299
  - mikrobielle Elektrolyse 295
  - Photofermentation 299
- Brennstoffzelle 10, 258, 449
  - alkalische 455
  - für grünen Ammoniak 457
  - PEMFC 451f.
  - phosphorsaure 455
  - Stack 453
  - Wirkungsgrad 451
- Brennstoffzellenfahrzeug
- FCEV 439
- Brennstoffzellenzug 11, 414, 435ff.
  - Rekuperationsbetrieb 438
- Brennwert 177f.
- Bruchmechanik 116
  - Belastungsfall Mode I 117

- Bruchzähigkeit 129
- ebener Dehnungszustand 122
- ebener Spannungszustand 119f.
- Ermüdungsbruch 135
- kritische Lastwechselzahl 140, 470
- Leck-vor-Bruch-Kriterium 133
- linear-elastische 108
- Paris-Erdogan-Gesetz 138
- räumlicher Spannungszustand 121
- Spannungsintensitätsfaktor 124
- spezifische Riss- oder Bruch-energie 127
- zyklische Beanspruchung 136

## C

- Carbon2Chem 429
- Carnot-Faktor 450
- CCS (Carbon Capture and Storage) 237ff.
  - BECCS (Bioenergy with Capture and Storage) 238
  - CCU (Carbon Capture and Utilization) 238
  - DACCS (Direct Air Capture and Carbon Storage) 238
  - Porenspeicher 245
  - Speicherbohrung 247
  - Speichergestein 246
  - Speicherkapazität 243
- Circular Economy 13

**D**

- Dampfdruckkurve 40
- Dampfreformierung 21, 220
  - Mengenbilanz 225
  - Treibhausgase 227
- Deuterium 25
- Direkt-Eisenreduktionsanlage 11, 426
  - HBI 428
- Dispenser 447
- Dissipation 45
- Druck
  - Absolutdruck 35
  - Betriebsdruck 35
  - Systemdruck 35
  - Umgebungsdruck 35
- Druckverlust 311, 314

**E**

- Einspeiseanlage 320
- Elektrolyse 255, 273
  - AEM 291
  - alkalische 279
  - Bipolarplatte 273
  - Degradation 288, 442
  - Fließbild 256
  - Hochtemperurelektrolyse 21, 286
  - Nernst-Spannung 260
  - PEM 273
  - Teillast und Effizienz 271
  - theoretische Zellspannung 262
  - thermoneutrale Spannung 262
  - Verluste 269
  - Wirkungsgrade 270
  - Zellspannung 260
- Energiedichte
  - gravimetrische 386 f.
  - volumetrische 386 f.
- Enthalpie 42
  - freie 46
- Entropie 43
- Expander 364
- Explosionsschutz
  - Deflagration 146
  - Detonation 146

- Explosion 145
- Explosionsbereich 146
- Explosionsgrenzen für Gemische 150
- Explosionsgruppe 146
- Explosionsschutzzdokument 157
- Ex-Schutzzonen 157
- Gesetz von Le Chatelier 150
- Löschabstand 146
- Luftgrenzkonzentration 146
- maximaler Explosionsdruck 146
- Mindestzündenergie 147
- obere Explosionsgrenze 146
- Sauerstoffgrenzkonzentration 147
- untere Explosionsgrenze 146
- Verpuffung 147
- Zündtemperatur 147
- Explosionstemperatur
  - Temperaturklasse 147

**F**

- Fermentation 296 ff.
- Biomasse 300 f.
- Flugzeug
  - Antrieb 443
  - Flying Fuel Cell (FFC) 445

**G**

- Gaskonstante
  - allgemeine 53
  - spezielle 53
- Gasmotor 362
- Gasturbinen 359
- Geschwindigkeit
  - Grenzgeschwindigkeit 311
- Gusseisen 85

**H**

- Heizwert 177 f.

**I**

- ideales Gas 29
- Inertgas 146
- ingenieurmäßige Plausibilitätsrechnung 38
- innere Energie 42
- Inversionskurve 69
- ionische Flüssigkeit 347
- isenthalpe Drosselung 68
- Isentropenexponent 53

**K**

- kalorische Zustandsgleichung 42
- Kavernenspeicher
  - Arbeitsgasvolumen 205, 405
  - Blanket 394, 397
  - Bohrung 393
  - Kissengas 205, 404f.
  - Konvergenz 401
  - maximale Ausspeicherrate 205
  - maximaler Speicherinhalt 205, 405
  - Salzlagerstätte 389
  - Sicherheitskriterien 401
  - Solung 394
  - Untertageausrüstung 396
  - VES 407
- Kesselformel 92, 101
- Klimakonferenz
  - Kyoto 1997 5
  - Paris 2015 5
- Klimaschutzgesetz 5
- Klimaschutzplan 5
- Kohlendioxid-Ströme 242
  - Leitungstransport 251
  - Phasenverhalten 250
- Kohlevergasung 234
  - Festbettvergaser 235

**L**

- LNG 459
- LOHC 331
  - ETS 331
- Luftverhältnis 170

**M**

- Magnesiumhydrid 423
- Massenanteil 72
- Massenkonzentration 75
- Membrantrennung 307
- Metall-Hydridspeicher 421
- metallische Werkstoffe 85
  - hexagonal 86, 123
  - kristalliner Aufbau 86
  - kubisch-flächenzentriert 86, 123
  - kubisch-raumzentriert 85, 123
  - Wasserstoffkrankheit 105
- Metallverarbeitung
  - Prozesswärme 434
- Methanisierung 256, 460
- Methanol 433
- Methanpyrolyse 252
- Microgrid 465
- Mikroorganismen 296
- Mischgassystem 322
- Mischungsregeln 79
- Molanteil 74

**N**

- Nationale Wasserstoffstrategie 8, 203
- Nennlast 282
- Normzustand 25
- Nutzfahrzeuge 441

**O**

- Oberflächenspeicher 423
- Odorierung 335, 472
  - K-Wert 338
  - Mindestkonzentration 339
  - Odoriermittel 336
- oxidkeramische Brennstoffzelle 456

**P**

- Palladium 306
- Partialdruck 79
- partielle Oxidation 21, 227

Permeation 85, 90, 93, 100f.  
 - Chemisorption 87, 112  
 - Desorption 88  
 - Diffusion 87, 90  
 - Dissoziation 87  
 - Löslichkeit 87, 90  
 - Physisorption 87  
 - Rekombination 88, 112  
 PFAS 274  
 Platinggruppenmetalle 274  
 Polymere 99  
 - Elastomere 100  
 - Thermoplasten 99  
 Prozessgaschromatographie 320

## R

reales Gas 29  
 Realgaszahl 33f.  
 Rissänderungsrate 469  
 Risslänge 123  
 - Ausgangs- 141  
 - kritische 134, 468  
 - maximal zulässige 468  
 - Mindest- 140

## S

Satz von Hess 165  
 Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle 456  
 Sektorkopplung 198, 201  
 seltene Erden 287  
 Stahl 85  
 Standardzustand 25  
 - Reaktionsenthalpie 166  
 - Verbrennungsenthalpie 164  
 Stoffmenge 34  
 Stoffmengenanteil 73  
 Stoffmengenkonzentration 75  
 Switchkunden 479

## T

Tankbehälter 330, 413  
 - Kryotank 418  
 technische Arbeit 44  
 Technologiepfad 9  
 thermodynamisches System 31  
 Thomson-Joule  
 - Effekt 67  
 - Koeffizient 67  
 Traps 89  
 Treibhausgasemissionen 6f.  
 Tritium 25

## V

Verdichter 341  
 - axialer 356  
 - Booster 355ff.  
 - Getriebeverdichter 357  
 - ionischer 95, 347  
 - Kolbenverdichter 343  
 - Membranverdichter 352  
 - radialer 356  
 - Schraubenverdichter 355  
 - Turboverdichter 356  
 - Verdichterkennfeld 326  
 - Wirkungsgrad 349  
 Verdichterstation 325  
 Verflüssigung von Wasserstoff 372  
 - Brutto-Energieaufwand 383  
 - Effizienzgrad 384  
 - Hochdruck 374  
 - Linde-Hampson-Prozess 377ff.  
 - Mindestverflüssigungsenergie 374  
 - Niederdruck 374  
 - Temperatur 372  
 - Umwandlung des ortho-Wasserstoffs in para-Wasserstoff 373  
 Versprödung  
 - Delayed Fracture 108  
 - Drucktheorie 107  
 - kathodische Spannungsrikkorrasion 107  
 - Kohäsionstheorie 107  
 - wasserstoffinduzierte Kaltrisse 107

Viskosität  
– dynamische 64f.  
Volumenänderungsarbeit 46  
Volumenanteil 73  
Volumenkonzentration 75

## W

Wandstärke 133, 468  
– Mindest- 92, 101, 468  
Wärmekapazität  
– isobare 49  
– isochore 48  
Wärmeleitfähigkeit 71  
Wasserstoff  
– blauer 218  
– Druck- 83f., 87  
– fester 63  
– flüssiger 62  
– geogener 19  
– grauer 218  
– grüner 218  
– normal- 26  
– ortho- 26  
– para- 26  
– Reinheit 81  
– Reinigung 303ff.  
– roter 218  
– sicherheitstechnische  
  Kenngrößen 147  
– Tankstelle 446  
– türkiser 218  
– Versprödung 105, 468  
Wasserstoffbus 435, 440  
Wasserstofftankstelle 416  
Wirkungsgrad  
– an der Kupplung 60  
– der Elektrolyse 60  
– der galvanischen Zelle 60  
– innerer 60

– isentroper 60  
– mechanischer 60  
– von Antrieben 60  
Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojek-  
ten 188  
– Afa 187  
– diskontierte Cash-Flow Rechnung 185  
– Diskontierung 185  
– Finanzierung 187  
– Investition (CAPEX) 183  
– Kosten (OPEX) 189  
– Mindestverzinsung 186  
– Nettobarwert 185  
– Netto-Cash-Flow 185  
– Sensitivitätsrechnung 191  
– Terminplan 183

## Z

Zustandsänderung  
– adiabate 46  
– irreversible 46  
– isentrope 46, 54  
– isobare 54  
– isochore 54  
– isotherme 54  
– polytrope 54  
– reversible 46  
Zustandsdiagramm  
– h,s- 59 ff., 64, 496  
– T,s- 41f., 493  
Zustandsgleichung  
– Gleichung von Peng und Robinson 33  
– ideale Gasgesetz 29  
– reales Gasgesetz 29  
Zustandsgröße  
– extensive 31  
– intensive 31  
– spezifische 31  
Zweiphasengebiet 64