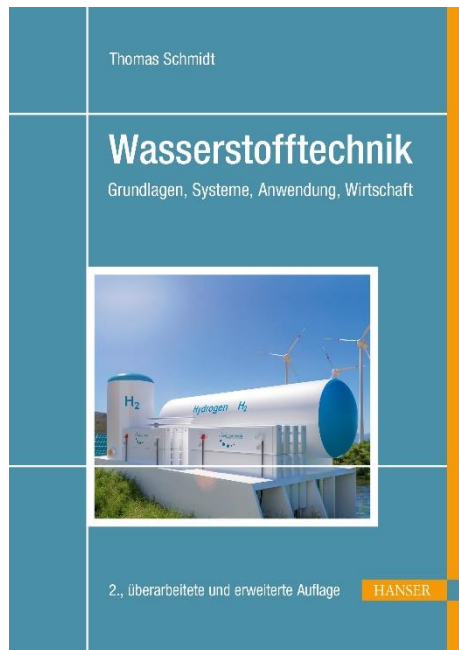


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Wasserstofftechnik

von Thomas Schmidt

Print-ISBN: 978-3-446-47228-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47353-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446472280>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Inhalt

<b>Die Autoren</b> .....	<b>XI</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Das Interesse am Element Wasserstoff .....	1
1.1.1 Die Zielvorgaben der Politik .....	5
1.1.2 Strategien zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft	8
1.2 Wasserstoff im öffentlichen Diskurs der ökologischen Transformation .....	13
1.3 Inhalt des vorliegenden Buches .....	16
1.4 Die Form des 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	28
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 .....	59
2.2.7 Die Freiheitsgrade eines Wasserstoffsystems .....	62
2.2.8 Der flüssige und feste Wasserstoff .....	63
2.2.9 Die Viskosität des n-Wasserstoffs .....	65
2.2.10 Der Thomson-Joule-Effekt des Wasserstoffs .....	67
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	Gefährdungspotentiale für die Wasserstoffversprödung	105
2.5.2	Einschätzung des Gefahrenpotentials für bestehende Stahlleitungen hinsichtlich Wasserstoffversprödung	113
2.5.3	Auslegung von Bauteilen gegen Wasserstoff induzierten Sprödbruch	117
2.5.3.1	Spannungs- und Verformungszustände in beanspruchten Bauteilen	120
2.5.3.2	Grundregeln zum Betrieb mit rissgefährdeten Bauteilen	124
2.5.3.3	Die Grenztragfähigkeit	125
2.5.3.4	Die spezifische Riss- oder Bruchenergie	129
2.5.3.5	Bruchmechanische Bewertung von Bauteilen unter quasistatischer Beanspruchung	132
2.5.3.6	Ermüdungsbruch unter Wasserstoffeinfluss	137
2.5.3.7	Bewertung von zyklischen Belastungen unter Wasserstoffeinfluss	142
2.6	Die Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff	145
2.6.1	Explosionsgrenzen von Wasserstoff	148
2.6.2	Praktische Anleitung zum Explosionsschutz	155
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	Die Verbrennung von Wasserstoff	168
2.7.2.1	Spezifische Kenngrößen der Verbrennung	169
2.7.2.2	Die Abgaszusammensetzung	171
<b>3</b>	<b>Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten</b>	<b>181</b>
3.1	Die Investition	183
3.2	Die Kapitalwertmethode	186
3.2.1	Der diskontierte Cashflow	188
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	Die Sektorkopplung	201
4.3	Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland	206
4.4	Maßnahmen zur Wettbewerbsstärkung	215
4.5	Potential des Wasserstoffs zur Reduzierung der Treibhausgase	217
4.6	Der Entwicklungsstand der Wasserstofftechnologien	221
<b>5</b>	<b>Die Erzeugung von Wasserstoff</b>	<b>225</b>
5.1	Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Quellen	227
5.1.1	Die Dampfreformierung	228
5.1.2	Die partielle Oxidation	235
5.1.3	Die autotherme Reformierung	237
5.1.4	Kohle- und Biomassenvergasung	243
5.1.5	Carbon Dioxide Capture and Storage – die Verwahrung von Kohlendioxid im Untergrund	246
5.1.5.1	Grundlagen der Gasspeicherung im porösen Gestein	251
5.1.5.2	Die Verrohrung einer Bohrung	255
5.1.5.3	Betrieb und Überwachung von Kohlendioxid- speichern	257
5.1.5.4	Der Transport von Kohlendioxid	258
5.1.6	Die thermische Pyrolyse	259
5.2	Elektrolytische Verfahren zur Wasserstofferzeugung	262
5.2.1	Die elektrochemischen Grundlagen der Elektrolyse	264
5.2.2	Die Thermodynamik der Elektrolyse	267
5.2.2.1	Temperaturbereich bis 100 °C	269
5.2.2.2	Die Bedeutung der freien Enthalpie für die Elektrolyse	270
5.2.2.3	Der Hochtemperaturbereich bei der Wasserelektrolyse	275
5.2.3	Die Effizienz der Elektrolyse	277
5.2.4	Die Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM)	282
5.2.5	Die alkalische Elektrolyse (AEL)	288
5.2.6	Die Hochtemperaturelektrolyse (SOEC)	295
5.2.7	Zusammenfassung der Eigenschaften von Elektrolyseanlagen	301

5.3	Die biologische Wasserstoffherzeugung .....	302
5.3.1	Die Biophotolyse .....	303
5.3.2	Die mikrobielle Elektrolyse (MEC) .....	303
5.3.3	Die Fermentation .....	304
5.3.3.1	Die Photofermentation .....	307
5.3.3.2	Die dunkle Fermentation .....	308
5.4	Verfahren zur Wasserstoffreinigung .....	311
5.4.1	Methoden zur Wasserstoffaufbereitung .....	313
5.4.2	Besonderheiten bei der Membrantrennung .....	316
<b>6</b>	<b>Der Transport von Wasserstoff</b> .....	<b>319</b>
6.1	Leitungsgebundener Transport von Wasserstoff .....	319
6.2	Wasserstoffeinspeisung in Rohrleitungsnetze .....	329
6.3	Kompensation des Druckverlustes auf dem Transportsystem ...	335
6.4	Verwendung von nicht ortsfesten Transportbehältern .....	340
6.5	Liquid Organic Hydrogen Carrier .....	342
6.6	Die Odorierung des Wasserstoffs .....	345
<b>7</b>	<b>Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff</b> .....	<b>351</b>
7.1	Verdichter für die Kompression von Wasserstoff .....	351
7.1.1	Kolbenverdichter .....	353
7.1.2	Membranverdichter .....	362
7.1.3	Turboverdichter .....	365
7.2	Gasmotoren und Gasturbinen in der zukünftigen Wasserstoffwelt .....	366
7.3	Expansionsanlagen in Wasserstofftransportsystemen .....	372
<b>8</b>	<b>Die Verflüssigung von Wasserstoff</b> .....	<b>379</b>
8.1	Die Grundlagen der Wasserstoffverflüssigung .....	380
8.2	Verflüssigungsprozesse .....	383
8.2.1	Ergänzungen zum Verflüssigungsprozess .....	386
8.2.2	Zur Energiebilanz des Verflüssigungsprozesses .....	389
<b>9</b>	<b>Speicher für den Wasserstoff</b> .....	<b>395</b>
9.1	Die untertägige Speicherung von Wasserstoff .....	398
9.1.1	Geologische Voraussetzungen für die untertägige Wasserstoffspeicherung .....	399

9.1.2	Grundlagen der untertägigen Speicherung in Salzkavernen .....	401
9.1.3	Das Solverfahren von Salzkavernen .....	403
9.1.4	Gastechnische Ausrüstung von Speicherkavernen .....	406
9.1.5	Wasserstoff als Blanketmedium und als Speichergut ...	408
9.1.6	Kriterien für die Festlegung der Betriebsparameter ...	411
9.1.7	Die obertägigen Speicheranlagen .....	418
9.2	Wasserstoff in ortsfesten und beweglichen Druckbehältern ...	423
9.3	Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff .....	427
9.4	Alternative physikalische Speicherverfahren .....	429
9.5	Stoffliche Wasserstoffspeicher .....	430
<b>10</b>	<b>Anwendungen für Wasserstoff .....</b>	<b>435</b>
10.1	Anwendungen im Industriesektor .....	435
10.1.1	Wasserstoff als Schlüssel zum klimaneutralen Stahl ...	436
10.1.2	Wasserstoff als Teil der Ammoniaksynthese .....	439
10.1.3	Wasserstoff wird zu Methanol .....	441
10.1.4	Wasserstoff für Prozesswärme in der metallverarbeitenden Industrie .....	442
10.2	Wasserstoff im Mobilitätssektor .....	442
10.2.1	Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr .....	443
10.2.2	Wasserstoff im Schienenverkehr .....	444
10.2.3	Wasserstoff im PKW-Bereich .....	447
10.2.4	Wasserstoff im Nutzfahrzeugbereich .....	450
10.2.5	Wasserstoff in Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen ...	451
10.2.6	Wasserstofftankstellen .....	453
10.3	Wasserstoff für Brennstoffzellen .....	457
10.3.1	Die Thermodynamik der Brennstoffzelle .....	457
10.3.2	Die Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC .....	459
10.3.3	Die alkalische Brennstoffzelle .....	464
10.3.4	Die phosphorsaure Brennstoffzelle .....	464
10.3.5	Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle .....	464
10.3.6	Die oxidkeramische Brennstoffzelle .....	465
10.4	Wasserstoff zur Umwandlung von Treibhausgasen .....	466
10.5	Wasserstoff in lokalen Netzen .....	472
10.5.1	Beurteilung der Wasserstoffversprödung .....	475
10.5.2	Der Einfluss der Odorierung auf die Wasserstoffreinheit .....	479
10.5.3	Rohrnetze als Energiespeicher für Wasserstoff .....	480

<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>489</b>
<b>Anhang A</b> .....	<b>499</b>
1    Stoffdaten des n-Wasserstoffs .....	499
1.1 $T, s$ -Diagramm .....	499
1.2    Realgaszahlen des n-Wasserstoffs .....	500
1.3    Spezifische Wärmekapazität .....	501
1.4    Isentropenexponent .....	501
1.5 $h, s$ -Diagramm .....	502
1.6    Die Wärmeleitfähigkeit des n-Wasserstoffs .....	502
2    Bruchmechanische Werkstoffkennwerte .....	503
3    Explosionsschutz .....	506
4    Verbrennung von Wasserstoff .....	507
5    Spezifische Energiekosten in der PKW-Mobilität .....	508
6    Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland .....	509
7    Daten zur Elektrolyse .....	510
8    Zur Verflüssigung von Wasserstoff .....	514
9    Zur Speicherung von Wasserstoff .....	515
10   Technische Regeln im Rahmen der Wasserstoffanwendungen ..	517
<b>Anhang B: Einheiten und deren Umrechnungen</b> .....	<b>521</b>
<b>Anhang C: Formelzeichen und Einheiten</b> .....	<b>523</b>
<b>Anhang D: Abkürzungen und Eigennamen</b> .....	<b>531</b>
<b>Index</b> .....	<b>535</b>

# 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), FH Münster, Fachbereich Energie · Gebäude · Umwelt, Abschnitt 10.5.3

# Vorwort

Im Zeichen der ökologischen Krise ist ein Jahr energiepolitisch ein langer Zeitraum. Seit der Erstveröffentlichung meines Buches im Oktober 2020 sind aus Planspielen über die Bedeutung der Wasserstofftechnologie konkrete Projekte mit grünem Wasserstoff entstanden. Bestehende Gasnetze werden als Kern eines zukünftigen, grünen, überregionalen Wasserstoffnetzes gehandelt. Lokale Wasserstoffnetze werden realisiert, um die neue Wasserstoffwelt im Pilotmaßstab auszuprobieren. Das sind ausreichende Gründe, um das bestehende Buch zu aktualisieren. Die Erstveröffentlichung ist eine Kombination aus Fachbuch und Lehrbuch. Diese Qualität soll in dieser zweiten Auflage weiter gestärkt werden, in dem zusätzlich ein neues Buch aus Aufgaben mit Bezug zum Hauptbuch und den dazu ausgearbeiteten Lösungen erscheint.

Die ursprüngliche Idee zu diesem Buch kam mir im heißen Sommer 2018 in der Vorbereitung einer neuen Vorlesungsreihe an der Fachhochschule Münster mit dem Arbeitstitel „Grundlagen der Wasserstoffverwendung“. Es war in der Verfolgung dieser Aufgabe so gut wie unmöglich, ein aktuelles umfassendes Sachbuch oder Nachschlagewerk für alle wesentlichen Fragestellungen, die mit Erzeugung, Verteilung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff verbunden sind, in deutscher Sprache zu finden. Es gibt außerordentlich gut geschriebene, verständliche und aussagekräftige Fachbücher von Kollegen zu einzelnen Aspekten der Wasserstoffwirtschaft, wie zur Anwendung im Verkehrssektor oder zur Technik der Brennstoffzelle. Ein nützliches und informatives Nachschlagewerk zur Verwendung technischer Gase ist viele Jahrzehnte alt und nicht mehr auf dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik. So war es für mich naheliegend, ein zusammenfassendes Lehrbuch für die Ausbildung von technischem Fachpersonal zu konzipieren und dem Carl Hanser Verlag in München die Herausgabe vorzuschlagen. Ich bin dem Verlag und insbesondere Herrn Herzberg für die Unterstützung bei der Umsetzung dieser Idee dankbar.

Die anhaltende Diskussion im öffentlichen Raum um das Für und Wider der Wasserstoffnutzung im Rahmen der Energiewende sowie die unzähligen Studien und Expertisen aus den Reihen der deutschen Energie- und Forschungsinstitute sowie

von „Denkfabriken“ der Politik zum Thema Wasserstoff machen eine umfassende Darstellung mit dem „roten Faden“ durch das umfängliche Thema aus Sicht eines an der industriellen Praxis orientierten Ingenieurwissenschaftlers notwendig. Wasserstoff als explosionsfähiges Gas, als Energieträger und Grundstoff für die industrielle Anwendung hat übrigens 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 für den Leser interessant und nachvollziehbar darzustellen, ist für den Autor eine wahre Herausforderung. Dieser konnte ich nur mit der Unterstützung vieler Menschen und Unternehmen, die sich der Verwirklichung der Wasserstoffwirtschaft und einer nachhaltigen Energiewende in Deutschland verschrieben haben, gerecht werden.

Es ist mir ein Bedürfnis, sie an dieser Stelle zu nennen. Hierzu zähle ich unter anderem die Herren C. Stabenau und I. Löbbert vom Netzbetreiber Westnetz GmbH, Ph. Behmer, B. Koch, A. Heim und S. Tenholter von der Thyssengas GmbH, E. Rahe von der Westfalen AG, M. Wolf von Viessmann GmbH & Co. KG, J. Jungsbluth von der ZBT GmbH, K. Seewald und M. Walther von der Andreas Hofer Hochdrucktechnik GmbH, A. Zschocke von thyssenKrupp Uhde Chlorine Engineers GmbH, F. Grewe von der 2G Drive GmbH, S. Niehoff von der BEN-Tec GmbH, W. Wolter von der Wystrach GmbH, C. Mc Connel von der ITM Power GmbH, Frau I. Dickschas von der Siemens AG, N. Zösch von den Stadtwerken Haßfurt GmbH, Ch. Effing von der RWE Gas Storage West GmbH, T. Akertek von der e-gas GmbH und T. Weide und Ch. Wetter von der FH Münster. Ganz besonders danke ich Frau H. Hashemi Farzaneh für ihre Unterstützung im Abschnitt 2.5.

Neu ist die Mit-Autorenschaft von Frau A. Wilkening im Abschnitt Anwendungen und von Herrn M. Schmidt in den Abschnitten Einführung und Anwendungen.

Steinfurt, Dezember 2021

*Thomas Schmidt*

# 1

## Einführung

Im einführenden Teil 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

Im Vorwort zu diesem Buch erwähne ich, dass mir die Idee, dieses Fachbuch zu schreiben, im heißen Sommer 2018 kam. Da sich die ungewöhnlich lang andauernde Hitze auch im darauffolgenden Jahr 2019 wiederholte, möchte ich mit einer Reminiszenz beginnen.



**Bild 1.1**

Temperaturmessung in Bad Oeynhausen (Westfalen) am 27. Juli 2018 gegen 17 Uhr

Zwei Jahre hintereinander litt Europa über Wochen unter einem extrem heißen Sommer mit Temperaturen knapp unter vierzig Grad, wie in Bild 1.1 dokumentiert. Doch der Sommer 2018 mit seinen extremen Wetterverhältnissen war kein singuläres Ereignis. 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. Im Sommer 2019 wiederholten sich die extremen Wetterverhältnisse und die über Monate währende Trockenheit bedrohte in Teilen Westdeutschlands neben der Flora auch die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung. 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.



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

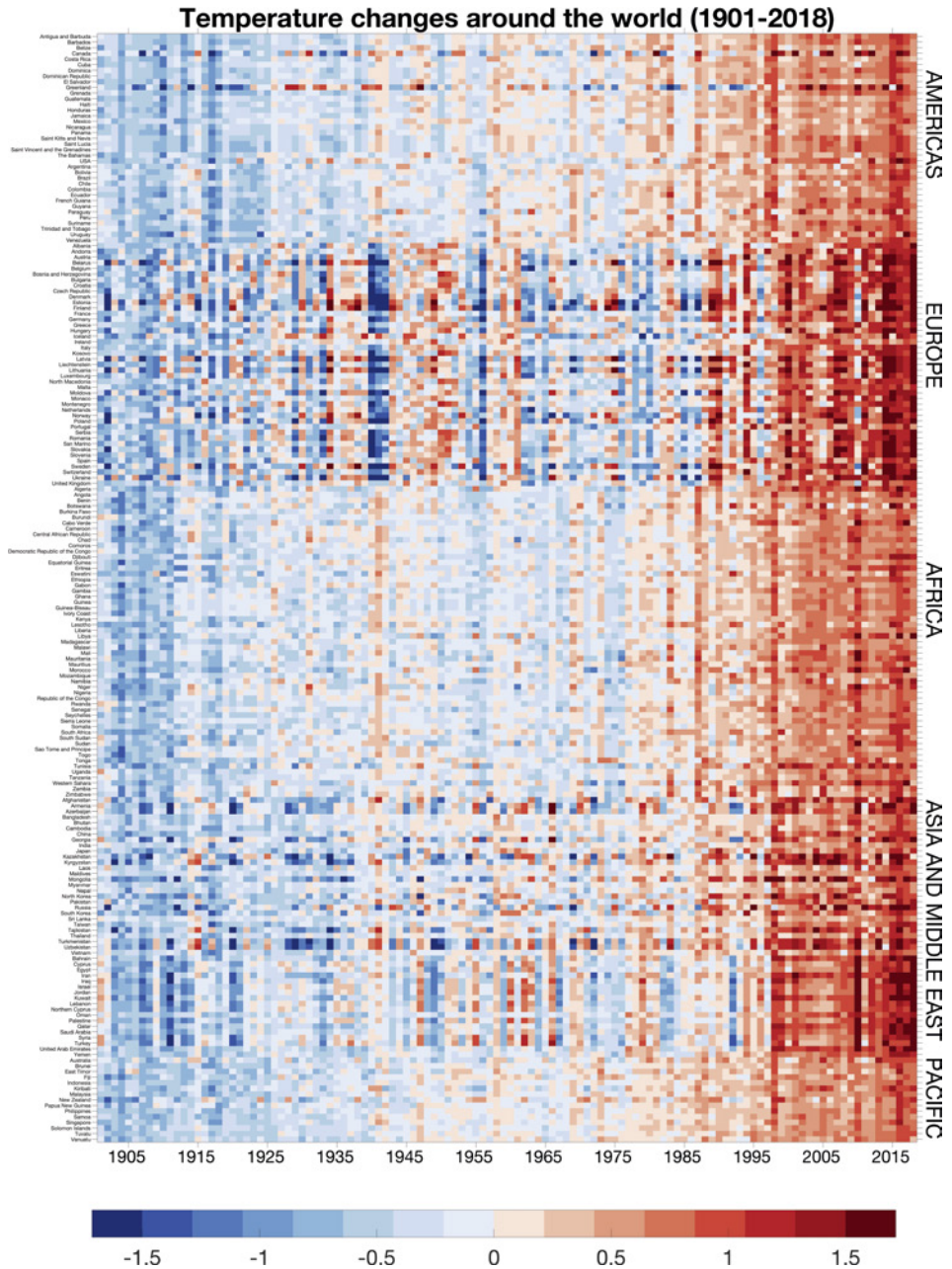
Die Frankfurter Allgemeine Zeitung veröffentlichte am 26. Juni 2019 in ihrer Mittwochsausgabe unter der Rubrik „Natur und Wissenschaft“ unter einer beeindruckenden Darstellung von Ed Hawkins (2019) von Müller-Jung folgenden kurzen, aber bestechend zutreffenden Artikel (2019, S. N1):

*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 Jahresdurchschnittstemperaturen 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.*

„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“.



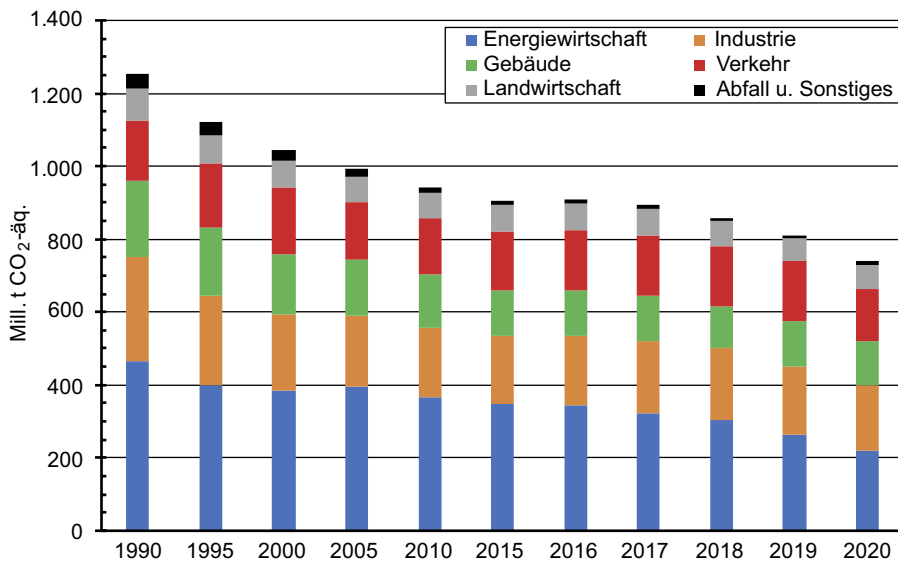


**Bild 1.3** Visualisierte Abweichungen der Jahresdurchschnittstemperaturen der Jahre 1901 bis 2018 in der FAZ-Ausgabe vom 20. Juni 2019 © Ed Hawkins

### 1.1.1 Die Zielvorgaben der Politik

Dieser Einsicht folgend hat sich die Bundesregierung mit der Unterschrift zur Pariser Klimakonferenz verpflichtet, den Ausstoß von klimaschädlichen Gasen (CO<sub>2</sub>-äq.) gegenüber dem Stand von 1990 um 95% zu senken. Nach dem Klimaschutzplan 2050 des Umweltbundesamtes (UBA) nach Tobias 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 Handels muss sein, maximal 2 °C, besser 1,5 °C Temperaturerhöhung gegenüber dem vorindustriellen Temperaturniveau nicht zu überschreiten. Anderenfalls 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.



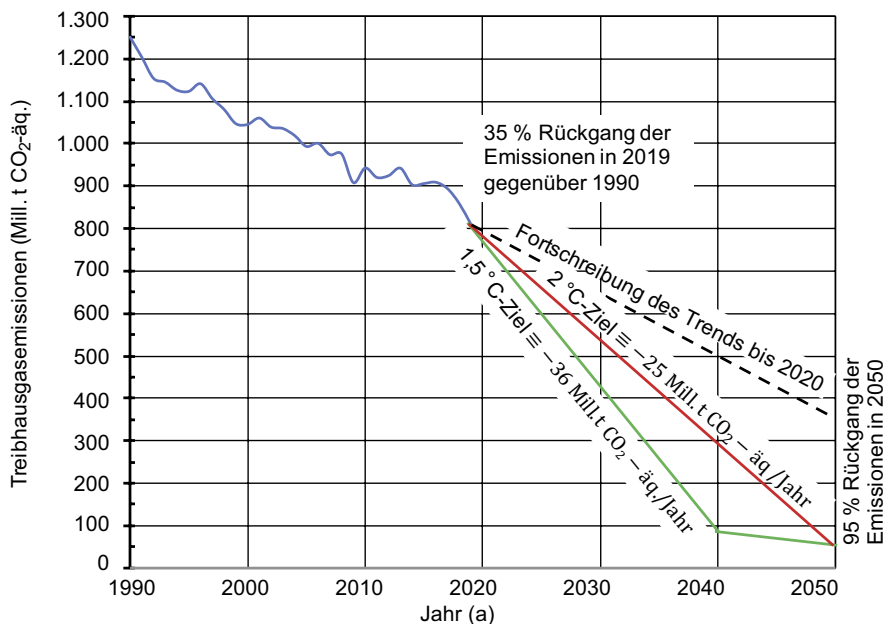
**Bild 1.4** Aufteilung der deutschen Treibhausgasemissionen auf Sektoren in äquivalenten Mill. t CO<sub>2</sub> nach Erhebung des Umweltbundesamtes 2021

Um die Klimaziele zu erreichen, müssen die einzelnen Sektoren jeweils ihren Beitrag zur Reduzierung der schädlichen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), deren größter Anteil Kohlendioxid-Emissionen sind, beisteuern. Schaut man auf den Emissionsanteil der einzelnen Sektoren wie Energiewirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft u. a. in Bild 1.4 nach dem UBA, sind beispielsweise im Sektor Verkehr



keine wirklich signifikanten Reduktionen gegenüber dem Stand von 1990 zu erkennen. Der technische Fortschritt in der Abgas- und Motorentechnik 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 Abgasmengen konterkariert. Auch stagniert der Rückgang der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor. Wie in Zukunft die Wohnhäuser und gewerblich genutzten Gebäude mit Wärme versorgt werden sollen, wenn Erdgas und Erdöl nicht mehr zur Verfügung stehen, ist ungewiss.

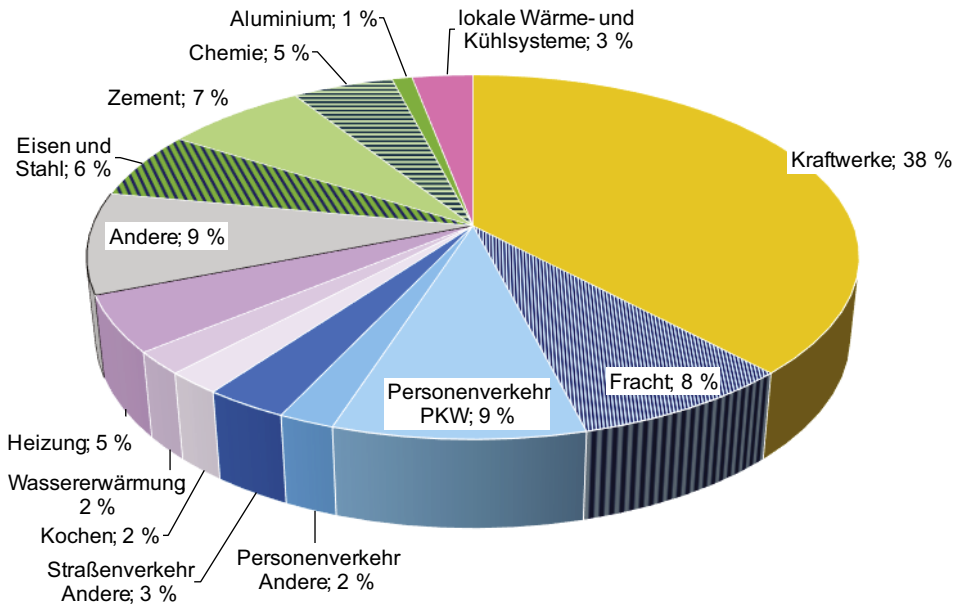
Es fällt der überproportionale Rückgang der Treibhausgasemissionen im Jahr 2020 auf. Dies ist dem Rückgang der Wirtschaftsleistung in Deutschland in der Covid-19-Pandemie geschuldet. Nach dem ersten Halbjahr 2021 zeigt sich, dass beispielsweise im Verkehrssektor dieser vermeintliche Erfolg wieder durch steigenden Verkehr und Zunahme der Emissionen zunichte gemacht wird. Ein „Weiter so“ – also die Fortschreibung des bisherigen Tempos bei der THG-Reduzierung – wird zu einem Scheitern der deutschen Klimapolitik führen (Bild 1.5). Nun muss sich also der Blick in die Zukunft und auf die Jahre 2030 und 2050 richten.



**Bild 1.5** Ziele, historische Entwicklung und Trends der deutschen Treibhausgasemissionen

Um das in Paris anvisierte 1,5 °C-Ziel zu erreichen, sind zukünftig erhebliche jährliche THG-Reduktionen erforderlich, die die bisher im Zeitraum 1990 bis 2019 erreichten jährlichen Reduktionen von 15 Mill. t CO<sub>2</sub> um den Faktor 2,4 übertreffen. Die Zahl macht deutlich, welche Anstrengungen in Zukunft notwendig sind.

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 sind insbesondere in den Sektoren Fracht (Schwerlastverkehr), Personenverkehr Andere (Bus, Bahn auf nicht elektrifizierten Strecken), in den Bereichen Eisen, Stahl und Chemie, Kraftwärmekopplung (KWK), auch teilweise in den Sektoren Heizung und lokale Wärmesysteme die bislang verwendeten fossilen Brenn- und Grundstoffe nicht eins zu eins durch Strom zu ersetzen.



**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.

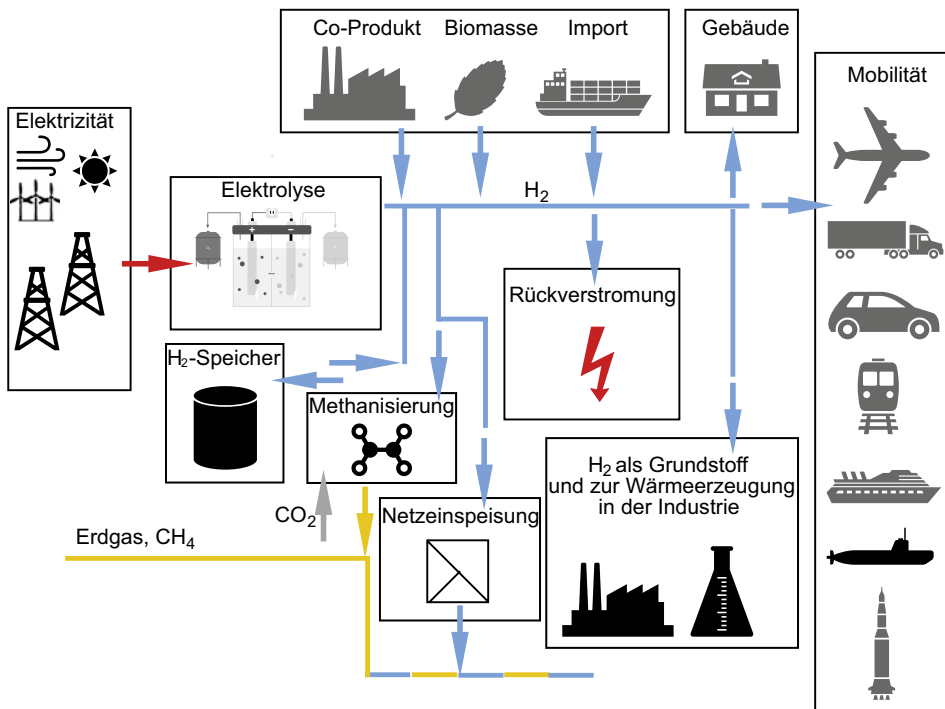
### 1.1.2 Strategien zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft

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 (2018, S. 23) aufhorchen. Die japanische Regierung hat im Dezember 2017 die „Basic Hydrogen Strategy“ ins Leben gerufen. Das Ziel der Japaner 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 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 in 2025 – das entspräche etwa 50 % der dann weltweit im Einsatz befindlichen BZ – unterstreicht ihre 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 am 07. 12. 2021 unterzeichneten Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung wird die auf Deutschland zugeschnittene nationale Strategie zum Aufbau einer Wasserstoff-Industrie aus dem Jahr 2020 nochmal bekräftigt. Bis spätestens 2030 sollen Elektrolyse-Kapazitäten von zehn Gigawatt geschaffen werden, was der Leistung von zehn Atomkraftwerksblöcken entspricht. Der nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) für die Regelwerkssetzung im Erdgasbereich verantwortliche Deutsche Verein für die Gas- und Wasserversorgung (DVGW) erarbeitet beispielsweise seit 2019 mit der G 220 ein neues Arbeitsblatt für die Anlagentechnik von Power-to-Gas (PtG). 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 hier der Vergleich mit dem in Deutschland, der nach den USA, China und Japan viertgrößten Volkswirtschaft, festgestellten Primärenergieverbrauch (PEV). Dieser entsprach 2019 nach Auskunft des Umweltbundesamtes einer Größe von ca. 3500 TWh und gibt den Energiegehalt aller im Inland eingesetzten Energieträger wie zum Beispiel 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. Da ist zunächst die Ver-

knüpfung der Sektoren Strom und Gas über eine Elektrolyseanlage. Windkraft, PV-Anlagen und Wasserkraft sind die Technologien, die das Stromnetz zukünftig fluktuierend speisen. Durch den Umstand, dass das Saldo der Strom einspeisung und Strom ausspeisung in die verschiedenen elektrischen Übertragungsnetze vom Windangebot und der Intensität der lokalen Sonneneinstrahlung auf der einen Seite und andererseits 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 Rückverstromung 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 Regelleistung, 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 Wärme und Strom in den Haushalten zur Verfügung zu stellen. Das in Bild 1.8 dargestellte Brennstoffzellengerät ist für Erdgas und für ein Mischgas mit einer maximalen Beladung von 10 mol-% Wasserstoffanteil konzipiert. Serientaugliche Geräte für den reinen Wasserstoffbetrieb mit ausreichender Leistung müssen in Zukunft auch auf den europäischen Märkten angeboten werden.



**Bild 1.8**  
Brennstoffzellengerät der Firma Viessmann GmbH & Co. KG in Allendorf

Besondere Bedeutung wird Wasserstoff für den Verkehrssektor haben. Vergleichbar lange Wartezeiten für das Auftanken einer Lithiumionen-Batterie im stromangetriebenen PKW (BEV) und die logistische Anstrengung zum Aufbau einer flächendeckenden Ladesäuleninfrastruktur entfallen bei mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugen. Kurze Betankungszeiten an Wasserstofftanksäulen 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 drei Jahren fährt das in Bild 1.9 dargestellte Brennstoffzellenzugsystem Coradia iLint vom Hersteller Alstom Transport Deutschland GmbH auf der ca. 100 km langen Strecke zwischen Cuxhaven, Bremerhaven, Bremerförde und Buxtehude der Eisenbahnen und Verkehrsbetriebe Weser-Elbe GmbH (EVB). In Norddeutschland mit einer zurückgelegten Streckenleistung von weit

mehr als 100 000 km und in Japan im Großraum Tokio mit vergleichbarer Technik haben Brennstoffzellenzüge mittlerweile große Aufmerksamkeit erlangt.



**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

Die deutsche Stahlindustrie leidet unter der Konkurrenz aus Fernost, die zu völlig anderen Bedingungen und Kosten produzieren kann. So hat sich thyssenkrupp Steel Europe aufgemacht, mit einer neuen Strategie bis 2050 die Stahlproduktion in Duisburg 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 mit Hilfe von Wasserstoff zu Eisenschwamm und dessen Weiterverarbeitung im Hochofen eine der Schlüsseltechnologien. Der hierfür benötigte Wasserstoff wird langfristig über Pipelinesysteme bezogen oder direkt vor Ort elektrolytisch gewonnen (Bild 1.10).



**Bild 1.10** Elektrolytische Anlagen im Industriemassstab – hier die alkalische Elektrolyseanlage von thyssenkrupp Uhde Chlorine Engineering GmbH im Duisburger Stahlwerk von thyssenkrupp Steel – helfen bei der klimaneutralen Umstellung der europäischen Stahlproduktion  
© thyssenkrupp AG, Carbon2Chem®

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 ausdrücklich 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 einer neu konzipierten Elektrolyseanlage 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. Das Ziel des Unternehmens ist, 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, Auto- und Buseinsatz setzt.

Bei der Energiewandlung und im industriellen Einsatz kann Wasserstoff die Transformation der Industriegesellschaft hin zu einer klimaneutralen Zukunft wirkungsvoll unterstützen. Im 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 oder „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 vom 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. Dazu 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 großskaligen 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 (2020) zeigt dies für den Zeitraum 2009 bis 2019 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.

# Index

## Symbole

- 1. Fick'sches Gesetz 90, 101
- 1. Hauptsatz der Thermodynamik 30

## A

- Absolutdruck 35
- Acetogenese 306
- Ammoniak 439
- autotherme Reformierung 239

## B

- Betriebsdruck 35
- Betriebsfahrweise 110
  - quasistationär 109
  - schwellend 109
  - wechselnd 109
- Biogas 306
- Brennstoffzelle 457
  - alkalische 464
  - PEMFC 460, 463
  - phosphorsaure 464
  - Stack 461
  - Wirkungsgrad 459
- Brennstoffzellenfahrzeug 449
- Brennstoffzellenzug 445
- Brennwert 177f.
- Bruchmechanik 118
  - Belastungsfall Mode I 119
  - Bruchzähigkeit 132
  - ebener Dehnungszustand 124
  - ebener Spannungszustand 121f.

- Leck-vor-Bruch-Kriterium 136
- linear-elastisch 108
- räumlicher Spannungszustand 123
- Spannungssintensitätsfaktor 126
- spezifische Riss- oder Bruchenergie 130

## C

- Carbon2Chem 438
- Carnot-Faktor 458
- CCS 248, 250
  - Porenspeicher 253
  - Speichergestein 255
  - Speicherkapazität 251
  - Verrohrung untertage 256
- Circular Economy 13

## D

- Dampfdruckkurve 40
- Dampfreformierung 228
  - Mengenbilanz 234
  - Treibhausgase 235
- Direkt-Eisenreduktionsanlage 436
- Dispenser 455
- Dissipation 45
- Druckverlust 324

## E

- Einspeiseanlage 330
- Elektrolyse 265
  - alkalische 289

- Degradation 298
- Fließbild 264
- Hochtemperaturelektrolyse 296
- PEM 283
- Teillast und Effizienz 281
- theoretische Zellspannung 270
- thermoneutrale Spannung 270
- Verluste 277
- Wirkungsgrade 279
- Zellspannung 268

#### Energiedichte

- gravimetrisch 396, 398
- volumetrisch 396, 398

#### Enthalpie 43

- freie 47

#### Entropie 43

#### Ermüdungsbruch 137

- Paris-Erdogan-Gesetz 140
- zyklische Beanspruchung 138

#### ETS 343

#### Explosionsschutz

- Deflagration 146
- Detonation 146
- Ex-Schutzzonen 157
- Gesetz von Le Chatelier 150
- Löschabstand 147
- Mindestzündenergie 147
- obere Explosionsgrenze 146
- untere Explosionsgrenze 146
- Verpuffung 147
- Zündtemperatur 148

#### Explosionstemperatur

- Temperaturklasse 147

## F

#### Fermentation 307

- Biomasse 308, 310

#### Festbettvergaser 244

## G

#### Gaskonstante

- allgemeine 53
- spezielle 53

#### Geschwindigkeit

- Grenzgeschwindigkeit 320
- Gusseisen 85

## H

Heizwert 177f.

## I

#### ideales Gas 29

#### innere Energie 42

#### Inversionskurve 69

#### Investition 183

#### isenthalpe Drosselung 68

#### Isentropenexponent 53

## K

#### kalorische Zustandsgleichung 42

#### Kavernenspeicher

- Arbeitsgasvolumen 212, 416
- Kissengas 212, 414, 416
- maximale Ausspeicherrate 212
- maximaler Speicherinhalt 212, 416
- Sicherheitskriterien 411
- Solung 404
- Untertageausrüstung 407
- Wasserstoffblanket 408, 410

## L

#### Lastwechsel 476

#### LNG 466

#### Luftverhältnis 170

## M

#### Magnesiumhydrid 432

#### Massenanteil 73

#### Massenkonzentration 75

#### Metall-Hydridspeicher 430

#### Methanisierung 263, 467

#### Methanpyrolyse 260

#### Microgrid 472

Mikroorganismen 305  
Mindestwandstärke 92, 101  
Mischgassystem 333  
Mischungsregeln 79 f.

## N

Nennlast 293  
Nettoarwert 186  
Normzustand 25

## O

Oberflächenspeicher 432  
Odorierung 345, 479  
– K-Wert 347  
– Mindestkonzentration 348  
– Odoriermittel 345  
oxidkeramische Brennstoffzelle 465

## P

Palladium 315  
Partialdruck 79  
partielle Oxidation 235  
Permeation 85  
Polymere 99  
Prozesswärme 442

## R

reales Gas 29  
Realgaszahl 32, 34  
Rekuperationsbetrieb 445  
Rissänderungsrate 476  
Risslänge  
– maximal zulässige 476  
Risstiefe  
– kritische 476

## S

Satz von Hess 165  
Schmelzkarbonat-Brennstoff-  
zelle 464

Sektorkopplung 201, 204  
seltene Erden 297  
Stahl 85  
Standardzustand 25  
– Reaktionsenthalpie 165  
– Verbrennungsenthalpie 164  
Stoffmenge 34  
Stoffmengenanteil 73  
Stoffmengenkonzentration 75  
Switchkunden 486

## T

Tankbehälter 341, 424  
technische Arbeit 45  
Technologiepfad 9  
Technology Readiness Level 222  
Terminplan 184  
thermodynamisches System 30  
THG  
– Emissionen 5  
Thomson-Joule  
– Effekt 67  
– Koeffizient 67  
Traps 88  
T,s-Diagramm 41 f.

## U

Umgebungsdruck 35

## V

Verdichter  
– Bauarten 352  
– Booster 365  
– ionische Flüssigkeit 357  
– Wirkungsgrad 360  
Verdichterstation 336  
Verflüssigung  
– Brutto-Energieaufwand 392  
– Effizienzgrad 393  
– Hochdruck 382  
– Linde-Hampson-Prozess 386 f.,  
390

- Mindestverflüssigungsenergie 382
  - Niederdruck 382
  - Umwandlung ortho-para 381
- Viskosität
- dynamische 65
- Volumenänderungsarbeit 46
- Volumenanteil 73
- Volumenkonzentration 75

## W

- Wandstärke
- rechnerische 476
  - tatsächliche 476
- Wärmekapazität
- isobare 49
  - isochore 48
- Wärmeleitfähigkeit 72
- Wasserstoff
- blauer 226
  - Diffusion 88
  - fest 64
  - flüssig 63
  - grauer 226
  - grüner 226
  - Löslichkeit 88
  - ortho- 26
  - para- 26
  - Reinheit 82

- Reinigung 312, 314
  - Tankstelle 454
  - Versprödung 106, 475
- Wasserstofftankstelle 426
- Wirkungsgrad
- an der Kupplung 61
  - der Elektrolyse 61
  - der galvanischen Zelle 61
  - innerer 61
  - isentroper 61
  - mechanischer 61
  - von Antrieben 61

## Z

- Zustandsänderung
- adiabatisch 46
  - irreversibel 46
  - isentrop 46, 54
  - isobar 54
  - isochor 54
  - isotherm 54
  - polytrope 54
  - reversibel 46
- Zustandsgröße
- extensive 31
  - intensive 31
  - spezifische 31
- Zweiphasengebiet 64