

ATZ/MTZ-Fachbuch

Manfred Klell
Helmut Eichseder
Alexander Trattner



Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

4. Auflage

ATZ/MTZ-Fachbuch

Die komplexe Technik heutiger Kraftfahrzeuge und Antriebsstränge macht einen immer größer werdenden Fundus an Informationen notwendig, um die Funktion und die Arbeitsweise von Komponenten oder Systemen zu verstehen. Den raschen und sicheren Zugriff auf diese Informationen bietet die Reihe ATZ/MTZ-Fachbuch, welche die zum Verständnis erforderlichen Grundlagen, Daten und Erklärungen anschaulich, systematisch, anwendungsorientiert und aktuell zusammenstellt.

Die Reihe wendet sich an Ingenieure der Kraftfahrzeugentwicklung und Antriebstechnik sowie Studierende, die Nachschlagebedarf haben und im Zusammenhang Fragestellungen ihres Arbeitsfeldes verstehen müssen und an Professoren und Dozenten an Universitäten und Hochschulen mit Schwerpunkt Fahrzeug- und Antriebstechnik. Sie liefert gleichzeitig das theoretische Rüstzeug für das Verständnis wie auch die Anwendungen, wie sie für Gutachter, Forscher und Entwicklungsingenieure in der Automobil- und Zulieferindustrie sowie bei Dienstleistern benötigt werden.

Manfred Klell · Helmut Eichlseder ·
Alexander Trattner

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

 Springer Vieweg

Manfred Klell
HyCentA Research GmbH
Graz, Österreich

Alexander Trattner
HyCentA Research GmbH
Graz, Österreich

Helmut Eichlseder
TU Graz
Graz, Österreich

ATZ/MTZ-Fachbuch
ISBN 978-3-658-20446-4
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-20447-1>

ISBN 978-3-658-20447-1 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2008, 2010, 2012, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften. Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Umschlaggestaltung: © Alexander Trattner

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Es freut uns sehr, dass nach der 1. Auflage im Jahre 2008 nunmehr die 4. aktualisierte und erweiterte Auflage dieses Studienbuchs vorliegt. Das zeigt einerseits das anhaltende Interesse am Thema Wasserstoff, andererseits den Erfolg des Konzepts des Buches, einen möglichst umfassenden Überblick zum Thema zu geben und auf aktuelle Entwicklungen vor allem in der Fahrzeugtechnik im Detail einzugehen. Der Inhalt des Buchs wurde in allen Abschnitten aktualisiert, vor allem das Thema Anwendung des Wasserstoffs in der Brennstoffzelle wurde erweitert und vertieft.

Angesichts zunehmender Umweltbelastung und global steigenden Energiebedarfs bietet sich die Nutzung von Wasserstoff als schadstofffreie Alternative zu fossilen Energieträgern an. Vor allem die Ansätze zur Eindämmung des Klimawandels haben der Vision der Dekarbonisierung durch Energiewende und Wasserstoffwirtschaft neuen Auftrieb verliehen.

Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz verfügt über jahrelange Erfahrung in der Optimierung von Brennvorfahren mit Wasserstoff in Verbrennungsmotoren. Im Zuge des Aufbaus der erforderlichen Prüfstandsinfrastruktur mussten Fragen der Werkstoffwahl, der Sicherheitseinrichtungen, der Gasversorgung usw. gelöst werden. In Kooperationen mit den Firmen MAGNA und der OMV entstand aus den gemeinsamen Interessen die Idee, eine dem Thema Wasserstoff gewidmete Forschungseinrichtung ins Leben zu rufen. Dies wurde von einigen Partnern aus Wissenschaft und Industrie unterstützt und die entstandene Initiative von der öffentlichen Hand nachhaltig gefördert. So entstand im Jahre 2005 auf dem Gelände der Technischen Universität Graz das HyCentA, Hydrogen Center Austria, die erste österreichische Forschungs- und Abgabestelle für Wasserstoff, die von der HyCentA Research GmbH betrieben wird.

Um die Erfahrungen der Forschungs- und Prüftätigkeit in die Lehre einfließen zu lassen, wurde 2007 erstmals eine dem Thema Wasserstoff gewidmete Vorlesung an der Technischen Universität Graz angeboten. Im Zuge der Ausarbeitung der Studienunterlagen dazu kam der Anstoß, diese in gebundener Form zu veröffentlichen. Das vorliegende Studienbuch ist in diesem Kontext mit Schwerpunkten auf der angewandten Thermodynamik des Wasserstoffs sowie seiner Anwendung in der Brennstoffzelle und in der Verbrennungskraftmaschine zu verstehen. Um einen breiteren Überblick zum Thema Wasserstoff zu

geben, wurden neben einleitenden und geschichtlichen Anmerkungen auch Abschnitte über die Herstellung von Wasserstoff, seine Speicherung und Verteilung sowie über Normung, Recht und Sicherheit aufgenommen.

Das Buch konnte unter Mitwirkung zahlreicher Fachleute realisiert werden, die Abschnitte des Texts gelesen und korrigiert oder mit Anregungen zur Bereicherung des Inhalts beigetragen haben. Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlich gedankt, insbesondere den Mitarbeitern des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz sowie der HyCentA Research GmbH.

Dem Verlag danken wir für die freundliche, effiziente und kompetente Betreuung.

Für die vorliegende Auflage wurden die Kap. 1 und 4 von Klell und dem neu ins Autorenteam gekommenen Trattner verfasst, Kap. 6 überwiegend von Trattner, Kap. 7 überwiegend von Eichlseder, die übrigen von Klell.

Wir geben der Hoffnung Ausdruck, dass auch diese 4. Auflage bei Interessierten und Fachleuten auf so gute Resonanz stößt und Studierenden wie auch Ingenieuren in der Praxis als brauchbarer Arbeitsbehelf dienen kann.

Graz, Oktober 2017

Manfred Klell,
Helmut Eichlseder,
Alexander Trattner

klell@hycenta.at
eichlseder@ivt.tugraz.at
trattner@hycenta.at

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen¹

<i>a</i>	Schallgeschwindigkeit [m/s]; spezifische Arbeit [J/kg]; Temperaturleitfähigkeit [m ² /s]; Kohäsionsdruck [m ⁶ Pa/mol ²]
<i>A</i>	(Querschnitts-)Fläche [m ²]
<i>b</i>	Kovolumen [m ³ /mol]
<i>B</i>	Brennwert (früher: oberer Heizwert) [J/kg]
<i>c</i>	spezifische Wärmekapazität (früher kurz: spezifische Wärme), $c = dq_{\text{rev}} / dT$ [J/kg K], Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, $c = 2,997925 \cdot 10^8$ m/s
<i>c_v, c_p</i>	spezifische Wärmekapazität bei $v = \text{konst.}$ bzw. $p = \text{konst.}$ [J/kg K]
<i>C</i>	Konstante (verschiedene Dimensionen)
<i>C_{mv}</i>	molare Wärmekapazität (früher auch: Molwärme) bei $v = \text{konst.}$ [J/kmol K]
<i>C_{mp}</i>	molare Wärmekapazität (früher auch: Molwärme) bei $p = \text{konst.}$ [J/kmol K]
<i>d</i>	Durchmesser [m]
<i>D</i>	Diffusionskoeffizient [cm ² /s]
<i>e</i>	spezifische Energie [J/kg]; elektrische Elementarladung $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ C
<i>e_a</i>	spezifische äußere Energie [J/kg]
<i>E</i>	Energie [J]; Exergie [J]; Energiepotential, Zellspannung, elektrisches Potential [V]
<i>E_a</i>	äußere Energie [J]
<i>E_N</i>	Nernstspannung [V]
<i>f</i>	Frequenz [s ⁻¹]
<i>F</i>	Faraday Konstante [As/mol], freie Energie [J]
<i>g</i>	Erdbeschleunigung, Normfallbeschleunigung: $g_n = 9,80665$ m/s ²
<i>G</i>	freie Enthalpie [J]
<i>G_m</i>	molare freie Enthalpie [J/kmol]
<i>G_m⁰</i>	molare freie Enthalpie beim Standarddruck p^0 [J/kmol]
<i>h</i>	spezifische Enthalpie [J/kg]; Plancksches Wirkungsquantum: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J s [J s]

¹ In Anlehnung an DIN 1304, DIN 1345 sowie DIN 1940.

H	Enthalpie [J]
H_G	Gemischheizwert [MJ/m ³]
H_m	molare Enthalpie [J/kmol]
H_m^0	molare Enthalpie beim Standarddruck p^0 [J/kmol]
$H_{u, (gr)}$	(gravimetrischer) Heizwert (früher unterer Heizwert) [kJ/kg]
$H_{u, (vol)}$	(volumetrischer) Heizwert (früher unterer Heizwert) [kJ/dm ³]
$\Delta_B H$	Bildungsenthalpie [kJ/kmol]
$\Delta_R H$	Reaktionsenthalpie [kJ/kmol]
I	Stromstärke [A]
k	turbulente kinetische Energie [m ² /s ²]
l	Länge [m]
m	Masse [kg] oder [kmol]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]
M	molare Masse [g/mol]
n	Stoffmenge, Molzahl [kmol]; Laufvariable [-]
N	Anzahl der Teilchen
N_A	Avogadro-Konstante: $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23}$ 1/mol
p	Druck, Partialdruck [bar, Pa]
p^0	Standarddruck, $p^0 = 1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar}$ / häufig auch $p^0 = 1 \text{ bar}$
p_i	indizierter Mitteldruck [bar]
P	Leistung [W, kW]
q	spezifische Wärme(menge) [J/kg]
Q	Wärme [J]; elektrische Ladung [C]
r	spezifische Verdampfungswärme [J/kg];
R	spezifische Gaskonstante [J/kg K]; elektrischer Widerstand [Ω]
R_m	allgemeine (molare) Gaskonstante: $R_m = 8314,472 \text{ J/kmolK}$
s	spezifische Entropie [J/kg K]
S	Entropie [J/K]
t	Zeit [s], Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
T	Temperatur [K]
T_S	Siedetemperatur
u	spezifische innere Energie [J/kg]
U	innere Energie [J]; elektrische Spannung [V]
v	spezifisches Volumen [m ³ /kg]; Geschwindigkeit [m/s]
V	Volumen [m ³]
V_m	Molvolumen [m ³ /kmol]
w	spezifische Arbeit [J/kg]; Geschwindigkeit [m/s]
W	Arbeit [J]
W_o	Wobbeindex [MJ/Nm ³]
x	Koordinate [m]; Dampfziffer [-]
y	Koordinate [m]
z	Koordinate [m]; Ladungszahl [-]
Z	Realgasfaktor, Kompressibilitätsfaktor [-]

Griechische Formelzeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient (1/K)
δ	Grenzschichtdicke [m]
ε	Verdichtungsverhältnis [-]; Dissipation [m ² /s ³]
η	(dynamische) Viskosität [Ns/m ² = kg/ms]; Wirkungsgrad [-]
η_C	Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses [-]
η_e, η_i	effektiver Wirkungsgrad, indizierter (innerer) Wirkungsgrad [-]
η_g	Gütegrad [-]
η_m	mechanischer Wirkungsgrad [-]
$\eta_{s-i,K}, \eta_{s-i,T}$	innerer isentroper Wirkungsgrad des Kompressors (Verdichters), der Turbine [-]
η_{th}	thermodynamischer Wirkungsgrad [-]
η_v	Wirkungsgrad des vollkommenen Motors [-]
κ	Isotropenexponent [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitzahl [W/mK]; Wellenlänge [m]; Luftverhältnis, Luftzahl [-]
μ	Durchflusszahl [-]; Überströmungskoeffizient [-]; chemisches Potential [kJ/kmol]
μ_i	Masseanteil der Komponente i [-]
μ_{JT}	Joule-Thomson-Koeffizient [K/Pa]
ν	kinematische Zähigkeit [m ² /s]; Geschwindigkeitsfunktion [-]
ν_i	Molanteil der Komponente i [-]
$\nu_{st A}$	stöchiometrischer Koeffizient der Komponente A [-]
ρ	Dichte [kg/m ³]
σ	Versperrungsziffer [-]; (Oberflächen-)Spannung [N/m ²]
τ	Schubspannung [N/m ²]; Zeit [s]
φ	Kurbelwinkel [° KW]; Geschwindigkeitsbeiwert [-]; relative Feuchte [-]
φ_i	Volumenanteil der Komponente i [-]
ω	Winkelgeschwindigkeit [s ⁻¹]
ζ	exergetischer Wirkungsgrad [-]; Verlustbeiwert [-]
ζ_u	Umsetzungsgrad [-]
Φ	Equivalence Ratio (= 1/ λ) [-]

Operatoren und Bezeichnungen

[P]	Konzentration der Spezies P [kmol/m ³]
d	vollständiges Differential
δ	unvollständiges Differential
∂	partiell Differential

Π	Produkt
Σ	Summe
Δ	Differenz zweier Größen; Laplace-Operator
'	Zustand (im Querschnitt, am Punkt)', 1. Ableitung
"	Zustand (im Querschnitt, am Punkt)", 2. Ableitung
.	zeitliche Ableitung

Weitere Indices und Abkürzungen

0	Bezugs- oder Standardzustand
1	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 1
2	Zustand (im Querschnitt, am Punkt) 2
1D	eindimensional
3D	dreidimensional
a	aus, außen, äußere
ab	abgeführt(e Wärme)
abs	absolut
aq	wässrig
A	Aktivierung
AFC	Alkaline Fuel Cell
AGB	äußere Gemischbildung
APU	Auxiliary Power Unit
ATEX	Atmospheres Explosibles
B	Bildung
BoP	Balance of Plant
BZ	Brennstoffzelle
C	Kompression
ch	chemisch
CFD	Computational Fluid Dynamics
CGH2	compressed gaseous hydrogen
CZ	Cetanzahl
D	Diffusion
Da	Damköhler-Zahl, $Da = \tau_I / \tau_{ch}$
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNS	Desoxyribonukleinsäure, direkte numerische Simulation
e	ein, (Behälter-)Eintritt; eingebracht
el	elektrisch, Elektron
engl.	englisch
E	Exa (10^{18})
EB	Einspritzbeginn bzw. Einblasebeginn

ECE	Economic Commission for Europe
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
fl	flüssig, Flamme
F	Formation
FS	Füllstand
FTP	Federal Test Procedure
g	gasförmig
ggf.	gegebenenfalls
gr	gravimetrisch
G	Gemisch, Giga (10^9)
GB	Gemischbildung
GDL	Gasdiffusionsschicht
GH2	gaseous hydrogen
CGH2	compressed gaseous hydrogen
GuD	Gas- und Dampfprozesskopplung
H	Hochdruck(phase), Hub
HF	Hydrofining
HT	Hochtemperatur
i	Laufvariable (1, 2, ..., n), innere
I	Integral
IPTS	Internationale Praktische Temperaturskala
ISO	International Organization for Standardization
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
k	Kilo (10^3)
konst.	konstant
kr, krit	kritisch
K	kühlen, Kolben
Kl	Klemme
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
l	flüssig (liquid)
LH2	liquid hydrogen
LOX	liquid oxygen
m	mittel; molar
max	maximal
min	minimal
M	Mega (10^6)
MBF	Mass Fraction Burnt
MBT	Maximum Brake Torque
MCFC	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle
MEA	Membrane Electrode Assembly
MLI	Multi Layer Insulation

MPI	Multi Point Injection
MVEG	Motor Vehicle Emissions Group
MZ	Methanzahl
n	nach
N	Normalbedingungen
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NT	Niedertemperatur
Nu	Nußelt-Zahl, $Nu = \alpha l / \lambda$
o	obere
OCV	open cell voltage
OT	oberer Totpunkt
ÖNORM	Österreichische Norm
P	Peta (10^{15})
PAFC	Phosphorsaure-Brennstoffzelle
PEMFC	Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle
Pr	Prandtl-Zahl, $Pr = \nu / a$
Re	Reynolds-Zahl, $Re = w l / \nu$
real	real
rel, R	relativ
rev	reversibel
R	Reaktion
RNS	Ribonukleinsäure
ROZ	Research Oktanzahl
s	isentrop, fest (solid)
S	System, Sublimation, Siede-
sog.	sogenannt
St	Stapel
st	stöchiometrisch; Stoff
Sm	Schmelzen
SOFC	Oxidkeramik-Brennstoffzelle
STP	Standard Temperatur and Pressure, Standardbedingung
SULEV	Super ultra-low emission vehicle
t	transportiert, turbulent
T	Turbine, Tera (10^{12})
TP	Taupunkt
Tr	Tripelpunkt
TS	Siedepunkt
u	untere, Umgebung
U	Umgebung
UCTE	Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity
UEG	untere Explosionsgrenze

UN	United Nations
v	vor
V	Verdampfung, Verlust
VD	Vakuumdestillation
VEXAT	Verordnung über explosionsfähige Atmosphären
vol	volumetrisch
W	Widerstand, Wand
WIG	Wolfram-Inertgas
zu	zugeführt(e) (Wärme)
zul.	zulässig
Z	Zersetzung; Zelle

Inhaltsverzeichnis

1	Energiewende und Wasserstoffwirtschaft	1
1.1	Vision	1
1.2	Motivation	2
1.2.1	Bevölkerung, Energiebedarf und Ressourcen	2
1.2.2	Emission, Immission und Gesundheit	6
1.2.3	Treibhauseffekt, Klimaerwärmung und Umwelt	7
1.3	Umsetzung	10
1.3.1	Technologische Ansätze	10
1.3.2	Elektromobilität	12
1.3.3	Energiewende und Wasserstoffwirtschaft in Österreich	20
2	Geschichtliches	31
3	Grundlagen	45
3.1	Vorkommen	45
3.2	Thermodynamischer Zustand	46
3.3	Stoffeigenschaften	53
3.4	Chemische Eigenschaften	55
3.4.1	Isotope	55
3.4.2	Atomspin	56
3.4.3	Spektrallinien	58
3.5	Chemische Verbindungen	58
3.5.1	Hydride	59
3.5.2	Verbindungen mit Kohlenstoff	61
3.5.3	Zerlegung von Wasserstoffmolekülen	62
3.6	Verbrennung	63
3.6.1	Bruttoreaktionsgleichung	64
3.6.2	Chemisches Gleichgewicht	66
3.6.3	Reaktionskinetik	69

4	Erzeugung	71
4.1	Übersicht	71
4.2	Elektrolytische Spaltung von Wasser	73
4.2.1	Grundlagen	73
4.2.2	Elektrolysesysteme	80
4.2.3	Power-to-Gas	89
4.3	Reformierung	91
4.3.1	Dampfreformierung	92
4.3.2	Partielle Oxidation	94
4.3.3	Autotherme Reformierung	95
4.4	Vergasung	95
4.5	Reinigung	98
4.5.1	Reinigung der Ausgangsstoffe	98
4.5.2	Reinigung des Endprodukts	99
4.6	Direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen	100
4.7	Chemische Spaltung von Wasser	101
4.8	Biologische Herstellungsverfahren	104
4.8.1	Enzyme der Wasserstoffherzeugung	105
4.8.2	Photolyse	105
4.8.3	Fermentation	107
4.9	Wasserstoff als Nebenprodukt	107
4.9.1	Chlor-Alkali-Elektrolyse	107
4.9.2	Benzinreformierung	108
4.9.3	Ethenproduktion	108
5	Speicherung und Transport	109
5.1	Übersicht	109
5.2	Gasförmige Speicherung	114
5.2.1	Verdichtung und Expansion	115
5.2.2	Tanksysteme und Infrastruktur	117
5.3	Flüssige Speicherung	121
5.3.1	Verflüssigung und Verdichtung	122
5.3.2	Tanksysteme und Infrastruktur	126
5.4	Hybride Speicherung	133
5.5	Speicherung in physikalischen und chemischen Verbindungen	135
5.5.1	Physikalische und chemische Adsorption	136
5.5.2	Chemische Absorption	137
6	Brennstoffzellen	141
6.1	Prinzip und Kenngrößen der Brennstoffzelle	145
6.2	Typen von Brennstoffzellen	153
6.3	Aufbau von Brennstoffzellen	163

6.3.1	Einzelzelle	163
6.3.2	Zellstapel – Stack	166
6.3.3	Brennstoffzellensystem	168
6.4	Anwendung in der Fahrzeugtechnik	178
6.4.1	Antriebsstrangtypen	178
6.4.2	Fahrzeuge	179
6.5	Andere Anwendungen	189
6.5.1	Portable Brennstoffzellen	190
6.5.2	Ortsfeste Brennstoffzellen	191
6.5.3	Mobile Brennstoffzellen zu Wasser	194
6.5.4	Mobile Brennstoffzellen zu Luft	196
7	Verbrennungsmotoren	199
7.1	Relevante Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Verbrennungsmotor	200
7.2	Einteilung und Gliederungsmerkmale	205
7.3	Wasserstoff-Betrieb mit äußerer Gemischbildung	209
7.4	Innere Gemischbildung bzw. Wasserstoff-Direkteinblasung	212
7.4.1	Verbrennungsverhalten bei Wasserstoff-Direkteinblasung	216
7.4.2	Ladungsschichtung	218
7.4.3	Verbrennungssteuerung	221
7.4.4	Verbrennung mit Selbstzündung	224
7.5	Fahrzeuge mit Wasserstoffmotor	225
7.6	Betrieb mit Gemischen aus Wasserstoff und Methan	237
7.6.1	Auswirkungen auf die Verbrennung	244
7.6.2	Betriebsstrategien	249
7.6.3	Aufbau eines Prototypenfahrzeugs	250
8	Weitere Anwendungen	259
8.1	Haber-Bosch-Verfahren	260
8.2	Hydrofining	262
8.3	Hydrocracking	262
8.4	Fischer-Tropsch-Verfahren	263
8.5	Methanolherstellung	264
8.6	Halbleiterindustrie	265
8.7	Analytische Chemie	265
8.8	Lebensmittelchemie	266
8.9	Wasseraufbereitung	266
8.10	Reduktion und Behandlung von Metallen	267
8.11	Schweißen und Schneiden	267
8.12	Energietechnik und Verkehrstechnik	268
9	Werkstoffe, Recht und Sicherheit	271

9.1	Werkstoffe	271
9.2	Recht und Sicherheit	274
9.2.1	Verordnungen und Richtlinien in der EU	274
9.2.2	Die Genehmigung von Kraftfahrzeugen in der EU	281
9.2.3	Normen und technische Regelwerke	284
9.2.4	Vergleichender Brandversuch für Fahrzeugtanks	286
9.2.5	Prüfstände für Wasserstoffanwendungen	287
9.2.6	Sicherheit am HyCentA	294
	Literatur	301
	Sachverzeichnis	319

1.1 Vision

Die ökonomischen, ökologischen, sozialen und gesundheitlichen Folgen von Klimawandel und Umweltbelastung durch Schadstoffe stellen eine ernsthafte Bedrohung unserer Lebensqualität dar. Eine nachhaltige Lösung bieten Energiewende und Wasserstoffwirtschaft mit der kompletten Dekarbonisierung unseres Energiesystems durch den vollständigen Ersatz der derzeit vorherrschenden fossilen Energieträger durch grünen Strom und grünen Wasserstoff, siehe Abb. 1.1.

Die Energiewende zur nachhaltigen Stromerzeugung und zur Wasserstoffwirtschaft stellt die nächste große **industrielle Revolution** dar, die nicht nur die Aussicht auf eine gesunde und lebenswerte Umwelt für spätere Generationen bietet, sondern auch die wirtschaftliche Chance auf innovatives Know-how und Technologieführerschaft [289].

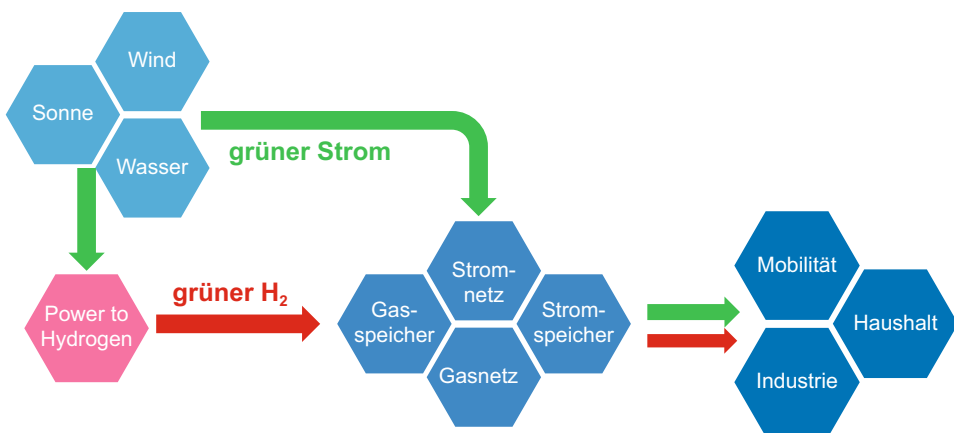


Abb. 1.1 Vision von Energiewende und Wasserstoffwirtschaft

Zunächst ist der konsequente und flächendeckende Ausbau der **regenerativen Stromerzeugung** aus Sonne, Wind und Wasser erforderlich. Dieser Ausbau garantiert Versorgungssicherheit bei lokaler Wertschöpfung und Verbesserung der Lebensqualität durch Emissionsfreiheit. Zur Pufferung fluktuierenden Stromangebots und als Speichermedium wird speziell bei Stromspitzen durch Elektrolyse von Wasser grüner Wasserstoff hergestellt („**power to hydrogen**“). Wasserstoff kann in Behältern, unterirdischen Speichern oder dem (Erd-)Gasnetz unbegrenzt gespeichert und verteilt werden. Grüner Strom und grüner Wasserstoff können alle Anforderungen der Energietechnik in Mobilität, Haushalt und Industrie erfüllen. Wasserstoff als kohlenstofffreier Energieträger ermöglicht dabei einen stofflich geschlossenen und durchgehend emissionsfreien Kreislauf [386].

Weltweit werden intensive Anstrengungen unternommen, um die Dekarbonisierung der Wirtschaft voranzutreiben. Bei der **Klimakonferenz** in Paris (COP 21) im Dezember 2015 wurde ein Abkommen geschlossen, dem zufolge die globale durchschnittliche Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts „auf deutlich unter 2 °C“ begrenzt werden soll [58, 189].

1.2 Motivation

1.2.1 Bevölkerung, Energiebedarf und Ressourcen

Physiologisch betrachtet beträgt der energetische **Grundumsatz** des Menschen zur Aufrechterhaltung seiner Körperfunktionen, insbesondere der Körpertemperatur, ca. 7 MJ (1,94 kWh, 1670 kcal) pro Tag, was einer durchschnittlichen Dauerleistung von **80 W** entspricht. Bei körperlicher Betätigung kann sich der Energieumsatz vervielfachen. Nach der österreichischen Schwerkraftverordnung liegt schwere körperliche Arbeit u. a. vor, wenn während 8 Arbeitsstunden mindestens 8374 kJ (2000 kcal) bei Männern und 5862 kJ (1400 kcal) bei Frauen verbraucht werden, was einer mittleren Leistung von 290 W bzw. 203 W entspricht [42]. Sportler können befristet Leistungen über 500 W erbringen und kurzzeitig Spitzenleistungen bis 2000 W.

Der **globale Energieverbrauch** hängt von der Bevölkerungszahl ab sowie vom lokal sehr unterschiedlichen Energieverbrauch pro Kopf. Bei einer Weltbevölkerung im Jahr 2014 von ca. 7,2 Mrd. Menschen lag das jährliche Bevölkerungswachstum in Europa und den USA unter 1 %, während Teile Afrikas Wachstumsraten über 2,5 % pro Jahr aufwiesen [349]. Der global durchschnittliche Energieverbrauch pro Kopf lag im Jahr 2014 bei etwa 79 GJ (22 MWh, 1,9 t Öläquivalent), das entspricht einem durchschnittlichen Tagesenergieverbrauch von 216 MJ (60 kWh, 5,2 kg Öläquivalent) pro Kopf oder einer durchschnittlichen Dauerleistung von **2500 W**. Der Energieverbrauch ist geografisch sehr unterschiedlich verteilt, wobei Katar mit mehr als dem Zwölffachen des Weltdurchschnitts an der Spitze liegt, gefolgt von Island, Bahrain und den Vereinigten Arabischen Emiraten. Kanada und die USA weisen knapp das Fünffache des Durchschnittsverbrauchs auf. Während Europa etwa das Doppelte an Energie verbraucht, liegen China mit 50 %, Indi-

en mit 30 % und Afrika mit 25 % des Durchschnittsverbrauchs derzeit noch weit zurück. Am wenigsten Energie pro Kopf mit unter 10 % des Durchschnitts wird in Eritrea verbraucht [103, 191, 375]. Die Zuwachsrate des Energieverbrauchs betrug in den letzten Jahren global im Schnitt etwa 2 %, was nach den Regeln der Exponentialrechnung bei gleich bleibender Zuwachsrate eine Verdopplung des Energieverbrauchs in etwa 35 Jahren bedeutet. Im asiatischen Raum lag die Zuwachsrate mehr als doppelt so hoch, wobei die Hälfte des weltweiten Anstiegs auf China entfiel.

Die zunehmende Weltbevölkerung und der wachsende Energieverbrauch insbesondere der weniger industrialisierten Länder führen zu einem exponentiell steigenden Energiebedarf. Trotz unterschiedlicher Meinungen bezüglich der Reichweite von derzeit bekannten **Reserven** und geschätzten künftig noch abbaubaren **Ressourcen** an fossilen Rohstoffen ist jedenfalls davon auszugehen, dass deren Verfügbarkeit begrenzt ist und dass ihre Verknappung zu entsprechenden Preissteigerungen führen wird. Wie Bevölkerungswachstum und Energieverbrauch sind auch die fossilen Energiereserven geografisch sehr ungleich verteilt, ein Großteil lagert in Ländern, wo Meinungsfreiheit und Menschenrechte systematisch missachtet werden. In globalen Energieszenarien wird das Maximum des Verbrauchs fossiler Rohstoffe meist in den nächsten Dekaden angesetzt, so dass der zukünftige Bedarf nur durch den massiven Ausbau alternativer Energieerzeugung gedeckt werden kann, siehe Abb. 1.2.

Als **Roh- oder Primärenergie** bezeichnet man die Rohform der Energie, die noch keiner Umwandlung unterworfen wurde. Die Aufschlüsselung der Primärenergiequellen in Abb. 1.3a zeigt, dass im Jahr 2014 global 81 % des Primärenergieverbrauchs von 570 EJ (158 PWh) durch fossile Energieträger gedeckt wurden, davon 31 % Erdöl, 29 % Kohle

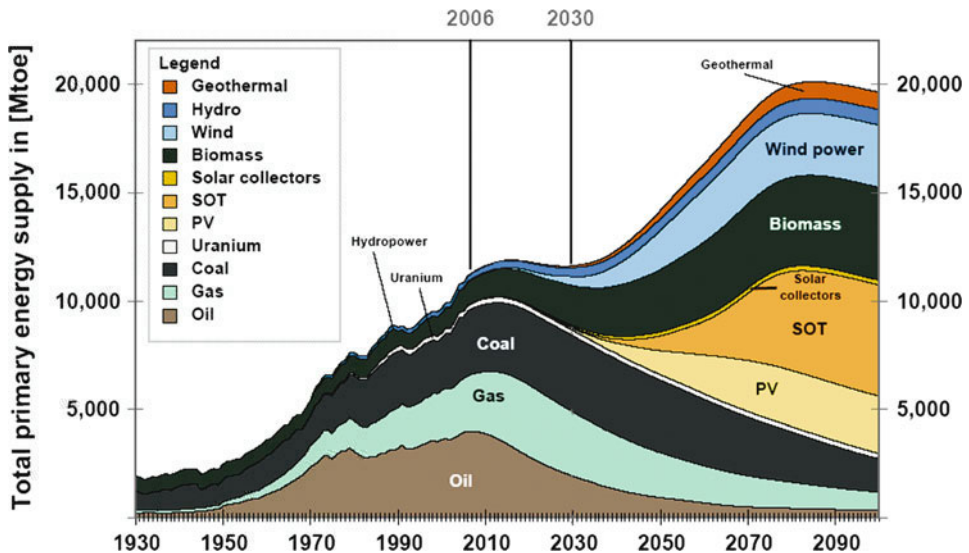


Abb. 1.2 Szenario Energiebedarf. (Quelle: LBST)

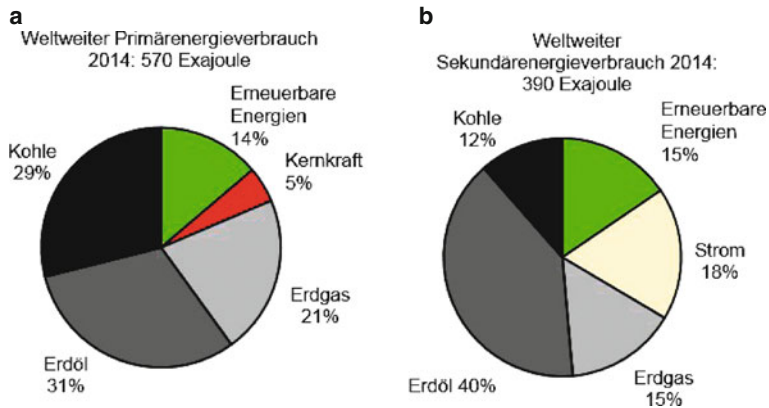


Abb. 1.3 Weltweiter Primär- (a) und Sekundärenergieverbrauch (b) 2014 [103, 375]

und 21 % Erdgas, 14 % durch erneuerbare Energieträger, davon 10 % Biomasse und 3 % Wasserkraft, und 5 % durch Kernkraft [375].

Als **End- oder Sekundärenergie** bezeichnet man die umgewandelte Endform, in der die Energie gebraucht wird. Der weltweite Sekundärenergieverbrauch belief sich 2014 auf 390 EJ (108 PWh), das sind 68 % des Primärenergieverbrauchs, was dem ersten Umwandlungswirkungsgrad entspricht. Die globale Aufschlüsselung der Sekundärenergieträger ergibt 67 % fossile Energieträger, davon 40 % Ölprodukte, 15 % Erdgas und 12 % Kohle, 15 % erneuerbare Energieträger, hauptsächlich Biomasse, und 18 % elektrischen Strom, siehe Abb. 1.3b. Die 71 EJ (20 PWh) elektrischer Strom wurden aus folgenden Primärenergiequellen hergestellt: 41 % durch Kohle, 22 % durch Erdgas, 4 % durch Erdöl, 11 % durch Kernkraft und 22 % durch erneuerbare Energieträger, davon 16 % durch Wasserkraft [375].

Der Endenergieverbrauch verteilt sich zu etwa gleichen Teilen auf **Haushalte** (Heizung bzw. Kühlung und Strom), auf die **Industrie** sowie auf den **Transport**. Die größten Zuwachsraten mit 3 bis 4 % jährlich weist der **Transportsektor** auf, der etwa 62 % des globalen Ölverbrauchs verursacht. 2010 hat die Zahl der weltweit registrierten PKW eine Milliarde überschritten. Die Anzahl der PKW pro 100 Einwohner über dem Bruttoinlandsprodukt für einige nach ISO 3166 bezeichnete Staaten zeigt Abb. 1.4 [350]. Während Länder wie China und Indien weniger als 5 PKW pro 100 Einwohner aufweisen, besitzt in Mitteleuropa etwa jeder zweite Einwohner einen PKW, Spitzenreiter sind die USA mit 75 PKW pro 100 Einwohner, der weltweite Durchschnitt liegt bei 12 PKW pro 100 Einwohner.

Als **Nutzenergie** bezeichnet man jenen Teil der Endenergie, die tatsächlich vom Verbraucher genutzt wird, also die Endenergie transportiert und mit dem Wirkungsgrad der entsprechenden Anwendung multipliziert. Der zweite Umwandlungswirkungsgrad von der gelieferten Sekundärenergie bis zur tatsächlich umgesetzten Nutzenergie des Verbrauchers beträgt etwa 50 %, so dass von den 570 EJ (158 PWh) Primärenergie tatsächlich nur etwa ein Drittel ($68 \% \times 50 \% = 34 \%$), das sind 200 EJ (55,5 PWh), vom Verbraucher genutzt werden.

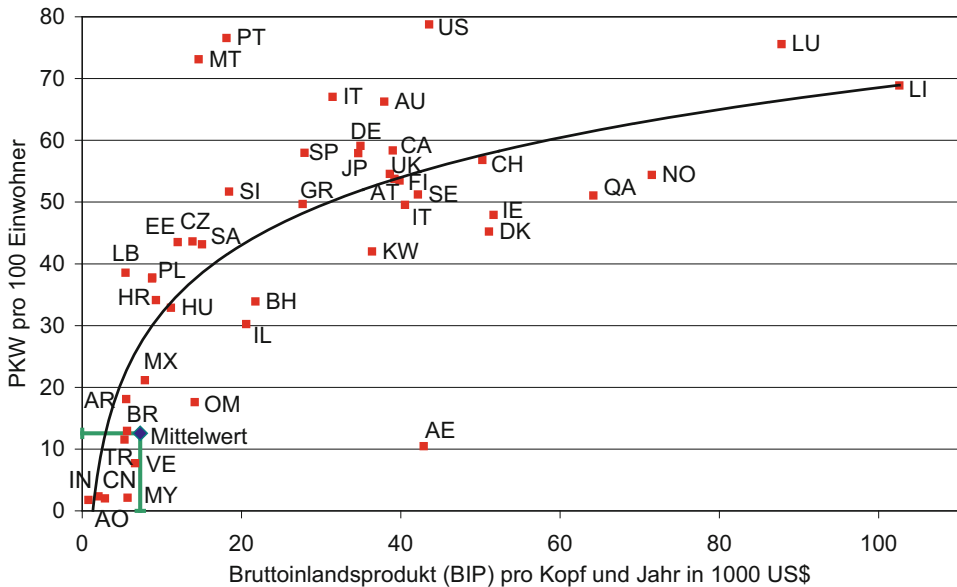


Abb. 1.4 PKW pro 100 Einwohner über dem BIP in 1000 \$ pro Kopf

Neben der Einsparung von Energie durch eine **Einschränkung** des Energieverbrauchs des Menschen liegt also ein hohes Einsparungspotenzial in der Erhöhung der **Umwandlungswirkungsgrade**.

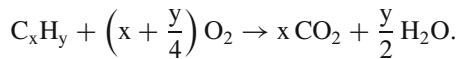
Im **EU-Raum** setzte sich der Primärenergieverbrauch von 67,2 EJ (18,7 PWh) im Jahr 2014 zusammen aus 72 % fossilen Energieträgern, davon 34 % Erdöl, 17 % Kohle und 21 % Erdgas, 14 % durch erneuerbare Energieträger und 14 % durch Kernkraft. Der Sekundärenergieverbrauch belief sich 2014 auf 44,5 EJ (12,3 PWh), das sind 66 % des Primärenergieverbrauchs. Die Aufschlüsselung der Sekundärenergieträger ergibt 66 % fossile Energieträger, davon 40 % Ölprodukte, 22 % Erdgas und 4 % Kohle, 12 % erneuerbare Energieträger, hauptsächlich Biomasse, und 22 % elektrischen Strom. Die 9,8 EJ (2,7 PWh) elektrischer Strom wurden aus folgenden Primärenergiequellen hergestellt: 42 % fossil, 28 % durch Kernkraft und 30 % durch erneuerbare Energieträger [375].

In **Deutschland** setzte sich der Primärenergieverbrauch von 13 EJ (3,6 PWh) im Jahr 2014 zusammen aus 80 % fossilen Energieträgern, davon 34 % Erdöl, 26 % Kohle und 20 % Erdgas, 12 % durch erneuerbare Energieträger, davon 9 % Biomasse und 3 % Wasserkraft und Windkraft, und 8 % durch Kernkraft. Der Sekundärenergieverbrauch belief sich 2014 auf 8,7 EJ (2,4 PWh), das sind 67 % des Primärenergieverbrauchs. Die Aufschlüsselung der Sekundärenergieträger ergibt 67 % fossile Energieträger, davon 37 % Ölprodukte, 25 % Erdgas und 5 % Kohle, 12 % erneuerbare Energieträger, hauptsächlich Biomasse, und 21 % elektrischen Strom. Die 1,8 EJ (0,5 PWh) elektrischer Strom wurden aus folgenden Primärenergiequellen hergestellt: 57 % fossil, 16 % durch Kernkraft und 27 % durch erneuerbare Energieträger [375].

1.2.2 Emission, Immission und Gesundheit

Seit der Nutzbarmachung des **Feuers** durch unsere Vorfahren begleitet die Verbrennung kohlenstoffhaltiger Brennstoffe mit Luft den technischen Fortschritt. Ab der industriellen Revolution und mit dem expandierenden Personen- und Güterverkehr haben die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Kraftstoffe so stark zugenommen, dass sie zu einer Gefahr für die Umwelt und die Gesundheit geworden sind. Außerdem ist die Energieumwandlung der chemischen inneren Energie des Brennstoffs zunächst in Wärmeenergie durch die Verbrennung und dann weiter in mechanische Energie durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt, so dass bei der Umwandlung mindestens 1/3 der Energie als Abwärmeverlust in die Umgebung abgegeben werden muss.

Bei der **idealen Verbrennung** von Kohlenwasserstoffen C_xH_y mit dem Sauerstoff O_2 aus der Luft entstehen Kohlendioxid CO_2 und Wasser H_2O :



Die dabei gebildeten Mengen an **Kohlendioxid** sind beträchtlich. Bei der Verbrennung von 1 kg Kohle(nstoff) werden 3,67 kg CO_2 gebildet, die Wärmefreisetzung beträgt 32,8 MJ bzw. 9,1 kWh (400 g CO_2 /kWh). Bei der Verbrennung von 1 kg Benzin oder Diesel (C:H = 1:2) entstehen ca. 3,2 kg CO_2 bei einer Wärmefreisetzung von etwa 43 MJ bzw. 11,9 kWh (270 g CO_2 /kWh). Umweltfreundlicher verbrennen Propan (C_3H_8) oder Erdgas (Methan CH_4). Pro Kilogramm Methan fallen ca. 2,75 kg CO_2 an bei einer Wärmefreisetzung von 50 MJ bzw. 13,9 kWh (200 g CO_2 /kWh). Die energiebezogenen anfallenden Mengen an CO_2 und H_2O bei der idealen Verbrennung zeigt Abb. 1.5 [278].

Da die **reale Verbrennung** fossiler Energieträger aber nicht ideal verläuft, entstehen neben Kohlendioxid eine Reihe weiterer Schadstoffe: Durch unvollständige Verbrennung entsteht Kohlenstoff, die Basis zur Bildung von Ruß und Feinstaub, durch lokalen Luftmangel bilden sich gasförmiges Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffe, durch hohe Temperaturen entstehen Stickoxide und durch Einschlüsse im Kraftstoff z. B. Schwefelverbindungen [278].

Unter **Emission** versteht man den Ausstoß von Abgasen aus einer Quelle in mg/s. Dieser Ausstoß breitet sich dann in der Umgebung aus und wird durch den Volumenstrom in m^3/s verdünnt. Als **Immission** bezeichnet man dann die mehr oder weniger verdünnte Einwirkung der Abgase auf die Umwelt in mg/m^3 . Für Luftschadstoffe, die erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit oder auf Ökosysteme und die Vegetation haben, sind in Österreich Grenz-, Ziel- oder Schwellenwerte im Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) festgelegt [30], die auf europäischen Richtlinien basieren. Derartige Grenzwerte bestehen derzeit für Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid, Stickstoffdioxid, Feinstaub PM 10 und PM 2,5, Blei und Benzol.

Die Auswirkungen von Schadstoffen auf Umwelt und Gesundheit sind Thema zahlreicher Studien und Veröffentlichungen. Bei Stickoxiden und Feinstaub verursachen vor allem **Verbrennungsprozesse** in Industrie und Verkehr weltweit teils erhebliche gesund-

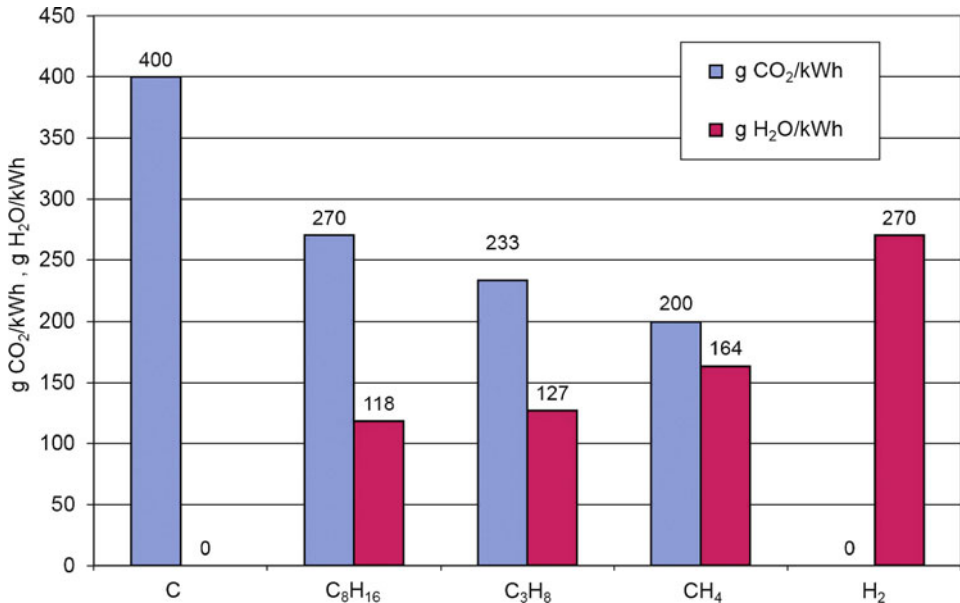


Abb. 1.5 Bildung von Wasser und Kohlendioxid bei der idealen Verbrennung

heitsgefährdende Grenzwertüberschreitungen. Obwohl in Österreich in den letzten Jahren die emittierte Masse an Feinstaub zurückgegangen ist, hat die emittierte Partikelanzahl zugenommen. Dies bedeutet, dass vor allem die Anzahl an sehr kleinen Partikeln gestiegen ist. Diese werden etwa von Benzin- und Dieselmotoren emittiert, sie sind bei Durchmessern unter $2,5\ \mu\text{m}$ ($< \text{PM } 2,5$) gesetzlich nicht limitiert und besonders gefährlich, weil sie lungengängig sind, Partikel kleiner $1\ \mu\text{m}$ können auch im Blut und im Gehirn Gesundheitsschäden verursachen. Laut WHO Statistik liegen global Lungenkrankheiten hinter Herzerkrankungen und Schlaganfällen an 3. Stelle der Todesursachen, in Ländern mit geringem Einkommen sogar an 1. Stelle [368]. Laut OECD sind weltweit 3,5 Mio. Todesfälle pro Jahr auf Luftverschmutzung zurückzuführen, davon werden 50 % durch den Verkehr verursacht, vor allem durch die Abgase von Dieselmotoren [264]. 6 Mio. Todesfälle durch Luftverschmutzung im Jahre 2015 zählt eine internationale Studie der Lancet Commission, wobei 90 % der Todesfälle in aufstrebenden Industrieländern liegen, allen voran in Indien und China [333]. Der volkswirtschaftliche finanzielle Schaden, der daraus resultiert, wird mit Trillionen \$ pro Jahr beziffert und liegt in der Größenordnung von 5 % des globalen Wirtschaftsaufkommens.

1.2.3 Treibhauseffekt, Klimaerwärmung und Umwelt

Der für das Leben auf unserer Welt notwendige natürliche **Treibhauseffekt** (Glashauseffekt) besteht darin, dass von der Erde ins Weltall reflektierte Wärmestrahlung von Mole-

külen in der Atmosphäre teilweise absorbiert und teilweise auf die Erde zurück reflektiert wird. Die mittlere Temperatur der Erdoberfläche liegt infolge dieses Effekts bei durchschnittlich etwa 15 °C anstelle von –18 °C. Der natürliche Treibhauseffekt wird zu etwa zwei Drittel durch Wasser und zu etwa einem Drittel durch Kohlendioxid und Methan verursacht. Diese Gase sind dabei in einen natürlichen Kreislauf eingebunden [7].

Der **anthropogene** (vom Menschen verursachte) Anteil am Treibhauseffekt wird durch die Emission sogenannter Treibhausgase verursacht. Die Simulationen des dafür 2007 mit dem Friedensnobelpreis ausgezeichneten Weltklimarates (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, [189]) zeigen, dass der vom Menschen verursachte starke Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre die globale Klimaerwärmung verursacht.

Als klimarelevante **Treibhausgase** reglementiert sind Kohlendioxid (CO₂, Referenzwert), Methan (CH₄, Wirksamkeitsfaktor 21), Distickstoffoxid oder Lachgas (N₂O, Faktor 310), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFCs, Faktor bis 11.300), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFCs, Faktor bis 6500) und Schwefelhexafluorid (SF₆, Faktor 23.900). Die CO₂-äquivalenten globalen Treibhausgasemissionen stammen zu 59 % aus der Emission von CO₂ durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe, zu 18 % aus der Emission von CO₂ durch Rodung, zu 14 % aus der Emission von Methan aus der Viehzucht, zu 8 % aus der Emission von Lachgas vorwiegend aus der Düngung in der Landwirtschaft und zu etwa 1 % aus synthetischen Industriechemikalien. Global werden derzeit jährlich ca. 35 Mrd. Tonnen CO₂ emittiert, das entspricht einer Emission von etwa 13 kg CO₂ pro Kopf und Tag. Hauptemittent ist China mit einem Anteil von fast 30 % vor den USA, Indien und Russland [375].

Die **CO₂-Konzentration** in der Atmosphäre steigt ständig, sie liegt seit dem Jahr 2016 ganzjährig über dem Wert von 400 ppm (0,04 Vol%), das sind 43 % über dem vorindustriellen Niveau von 280 ppm im Bezugsjahr 1750. Im Jahr 2016 war jeder einzelne Monat der jeweils wärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen [343].

Im letzten Jahrhundert ist die globale Durchschnittstemperatur um etwa 1 °C gestiegen, in Österreich ist der durchschnittliche Anstieg mit 2 °C doppelt so hoch. Schon jetzt erleben wir häufigere **Extremwetterereignisse** wie Starkregen, Überflutungen und ausgedehnte Hitzeperioden mit negativen Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft sowie den (Winter-)Tourismus. Die finanziellen Schäden werden derzeit allein für Österreich schon mit 1 Mrd. € pro Jahr angegeben, Tendenz stark steigend [218].

Szenarien des Weltklimarates zur globalen Erwärmung zeigt Abb. 1.6. Je nach Entwicklung der CO₂ Emissionen folgt eine durchschnittlichen **Erderwärmung** von 2 bis 6 °C bis zum Jahr 2100. Dabei stellt die grün markierte Variante GEA mit Begrenzung auf 2 °C Erwärmung die kosteneffizienteste Variante dar. Die prognostizierten Auswirkungen einer höheren Erwärmung sind katastrophal, sie reichen von einem dramatischen Anstieg des Meeresspiegels, der Küstenregionen unbewohnbar machen würde, über die Freisetzung riesiger Methanmengen beim Auftauen der Permafrostböden in Sibirien bis zu Millionen von Klimaflüchtlingen, der Gefährdung der Nahrungsmittel- und Wasserversorgung sowie dem umfangreichen Aussterben von Tier- und Pflanzenarten.

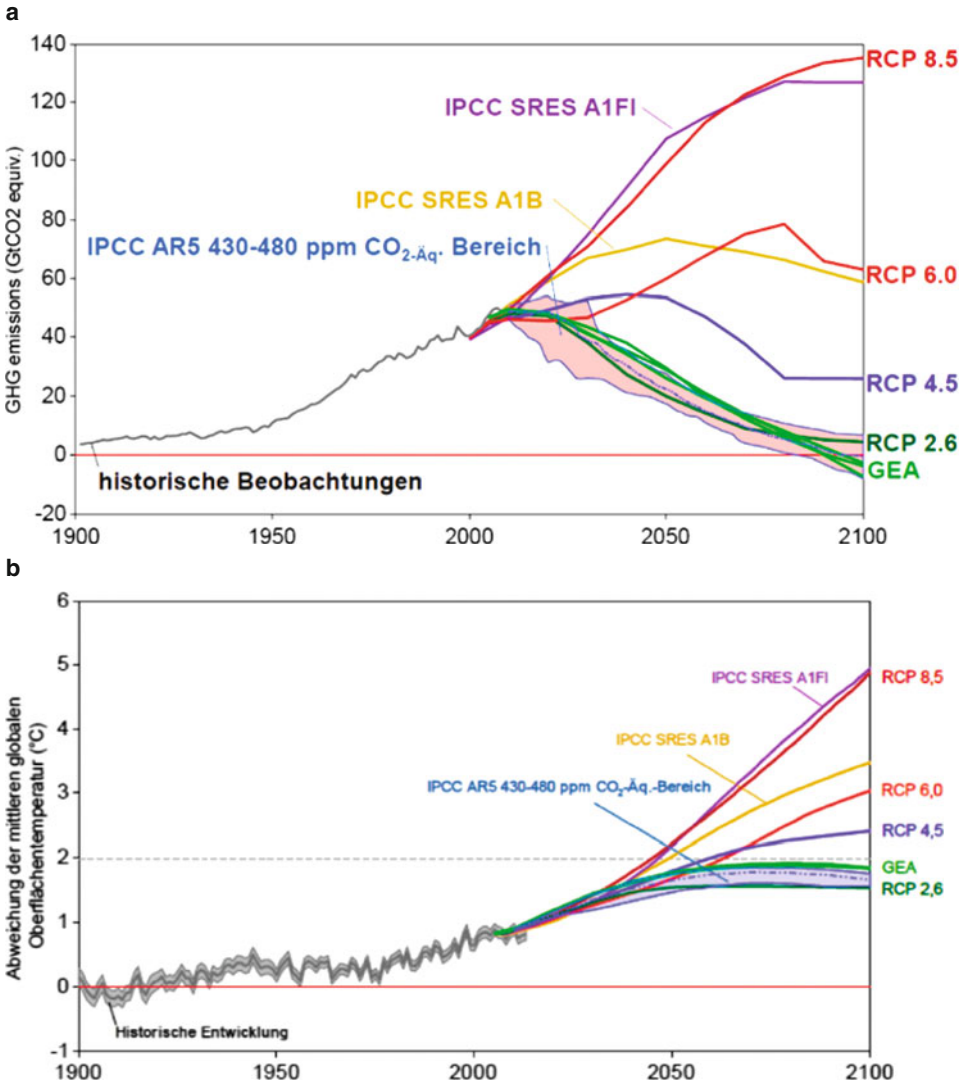


Abb. 1.6 Szenarien zur globalen Erwärmung. (Quelle: IPCC [189])

Zur Erreichung dieses 2 °C Ziels ist eine sofortige und drastische Reduktion der CO₂ Emissionen nötig, mit sogar „negativen“ Emissionen bis zum Jahr 2100, siehe grünen Verlauf GEA in Abb. 1.6a. Bei der Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 (**COP 21**) wurde ein Nachfolgeabkommen zum Kyoto-Protokoll von 1997 beschlossen, dem zufolge die globale durchschnittliche Erwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts „auf deutlich unter 2 °C“ begrenzt werden soll. Das Abkommen wurde von 195 Staaten anerkannt, verbindliche Maßnahmen zur Erreichung des 2 °C Ziels fehlen allerdings.

Die Umsetzung von **Maßnahmen** zur Reduktion der CO₂ Emissionen gestaltet sich international schwierig. Viele der Maßnahmen sind mit gefühlten Einschränkungen für die Menschen verbunden und damit unpopulär, sie sind meist teuer und rechnen sich nur bei einer längerfristigen Sichtweise. Der politische Wille zu einer Umschichtung von Mitteln aus der fossilen Wirtschaft auf die Wasserstoffwirtschaft oder zur wirksamen CO₂ Besteuerung („Steuer steuert“!) gedeiht zaghaft. Konkrete Maßnahmen wie Umweltzonen, sektorale Fahrverbote oder Einschränkung der Zulassung fossil betriebener Maschinen werden diskutiert.

Die **Europäische Kommission** hat für das Jahr 2030 folgende Ziele gesetzt: Verringerung der Treibhausgasemissionen um mindestens 40 % (gegenüber 1990), Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie auf mindestens 27 % und Verbesserung der Wirkungsgrade um mindestens 27 %. Dafür und für die weitere Reduktion der Treibhausgase um mindestens 60 % bis 2040 und um mindestens 80 % bis 2050 wurden entsprechende Fahrpläne für alle Mitgliedsländer entworfen [101]. Auch hier handelt es sich aber nur um die Vorgabe von Zielen, es fehlen konkrete und verpflichtende Empfehlungen und Umsetzungsstrategien, geschweige denn Konsequenzen oder Strafzahlungen bei Nicht-Erreichen der Ziele.

1.3 Umsetzung

1.3.1 Technologische Ansätze

Bei der Analyse und Bewertung verschiedener Technologien sind vor allem technische, ökologische und ökonomische Gesichtspunkte von Interesse. Bei der **technischen** Bewertung spielt meist der Wirkungsgrad die größte Rolle, wobei dessen Bedeutung bei erneuerbaren Energien, wo Sonne, Wind und Wasser ohnehin zur Verfügung stehen, geringer ist als bei fossilen Energieträgern, die verbraucht werden. **Ökologisch** ist die Emission von Lärm, Schadstoffen und speziell von CO₂ von Bedeutung. **Ökonomisch** spielen Kosten und Preise die größte Rolle, wobei natürlich neue Technologien aufgrund der erforderlichen Entwicklung und anfänglich geringen Stückzahl höhere Kosten verursachen. In die Betrachtungen mit einbezogen wird in der Regel auch der Aufwand für die Errichtung der betreffenden Anlagen und Maschinen sowie deren Recycling und Entsorgung in einer Lebenszyklusanalyse (engl.: Life Cycle Analysis – **LCA**). In der Mobilität erfolgen diese Analysen meist aufgeteilt in die Wandlung der Primär- in die Sekundärenergieträger, also von der Quelle bis zur Abgabe an der Steckdose oder Kraftstoffpumpe (Well-to-Tank, Well-to-Pump), in die Wandlung vom Sekundärenergieträger zur Nutzenergie (Tank-to-Wheel) und auf die Gesamtkette (Well-to-Wheel).

Technologisch bedeuten Energiewende und Wasserstoffwirtschaft eine grundlegende **Umgestaltung** unserer **fossil** basierten Wirtschaft mit Wärmekraftmaschinen wie Turbinen und Motoren zu grünem Strom, grünem Wasserstoff und **elektrochemischen** Maschinen wie Elektrolyseuren, Batterien und Brennstoffzellen. Diese elektrochemischen Maschinen haben die Vorteile der höheren Effizienz und der Emissionsfreiheit. Die che-

mische Energie des Brennstoffs wird bei einem theoretischen Wirkungsgrad von 100 % direkt in elektrischen Strom umgewandelt, nicht über den Umweg der Wärme wie in Wärmekraftmaschinen, die nach dem Carnot Wirkungsgrad mit etwa 66 % begrenzt sind, wodurch ein hohes Potenzial zur Wirkungsgradverbesserung besteht. Die elektrochemischen Maschinen kommen weitgehend ohne bewegte Bauteile aus, was Vorteile hinsichtlich der Wartung und der Lärmemission bietet. Bei Betrieb mit grünem Strom und grünem Wasserstoff sind elektrochemische Prozesse vollkommen emissionsfrei, es werden keinerlei Schadstoffe freigesetzt, weder Gesundheits- noch Umweltgifte, auch kein Kohlendioxid. Haupthindernis der elektrochemischen Maschinen sind deren noch hohe Kosten, die aber durch Forschung und höhere Stückzahlen gesenkt werden können.

Der erste Schritt in der Energiewende ist der konsequente und flächendeckende Umstieg von fossilen Primärenergieträgern auf die **erneuerbaren Energieträger** Sonne, Wind, Wasser, biogene Energieträger und soweit möglich Geothermie. Die dazu erforderlichen Technologien sind global verfügbar und technisch ausgereift, Wasserkraftwerke, Windturbinen und Photovoltaik liefern Strom, thermische Solarkraftwerke auch Wärme.

Da elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen fluktuierend anfällt und sich nicht nach der Nachfrage richtet, ist zu Spitzenzeiten des Angebots eine **Energiespeicherung** in großem Maßstab erforderlich. Da elektrische Energie nicht langfristig verlustlos speicherbar ist, bietet die großtechnische Nutzung von **Wasserstoff** als neuer Energieträger die unbedingt erforderliche Voraussetzung für das Gelingen der Energiewende. Elektrolyseure zerlegen mit Strom betriebenen Wasser chemisch in Sauerstoff und Wasserstoff. Die elektrolitische Erzeugung von Wasserstoff als Energieträger ist emissionsfrei bei Wirkungsgraden von etwa 50 bis 80 % möglich, erste Power-to-Gas oder **Power-to-Hydrogen** [307] Anlagen sind erfolgreich in Betrieb, derzeit mit Leistungen bis in den MW Bereich, erste GW Anlagen befinden sich in Planung. Wasserstoff ist praktisch unbegrenzt speicherbar, in Behältern, in unterirdischen Speichern oder ins Gasnetz eingespeist. Wasserstoff als kohlenstofffreier Energieträger ermöglicht mit Elektrolyseuren und Brennstoffzellen einen stofflich geschlossenen und durchgehend emissionsfreien Energiekreislauf.

Grüner Strom und grüner Wasserstoff können im Stromnetz und dem Gasnetz verteilt werden und stehen im Sinne einer regenerativen **Sektorenkopplung** als Strom, Wärme und Kraftstoff für alle Anwendungen zur Verfügung.

Der Ersatz von fossilen Energieträgern in der **Industrie** ist je nach Prozess gesondert zu betrachten, etwa in der Stahlindustrie kann Wasserstoff Kohlenstoff als Reduktionsmittel ersetzen, erste Pilotanlagen sind in Betrieb [274].

Im **Haushalt** sind elektrische Geräte und Maschinen global im Einsatz, lokale Energie- und Wärmeversorgungseinheiten mit der Kombination von erneuerbarer Stromerzeugung, Elektrolyse, Wasserstoffspeicher und Brennstoffzelle zur Rückverstromung sind am Markt, vor allem in Asien.

Den höchsten Anteil an fossilen Energieträgern mit über 90 % und auch die höchsten Wachstumsraten weist die **Mobilität** auf. Als emissionsfreie Technologie bietet sich die Elektromobilität mit Akkumulatoren und Brennstoffzellen an.

Biogene und synthetische „CO₂-neutrale“ Energieträger können bei günstiger Verfügbarkeit in Wärmekraftmaschinen ergänzend genutzt werden. Ihre behauptete CO₂-Neutralität ist aber immer zeitlich und örtlich betrachtet kritisch zu hinterfragen, auch fossile Energieträger haben vor Millionen von Jahren das CO₂ aus der Umgebung bezogen. Die Nachteile des geringen Wirkungsgrades und der lokalen Emissionen des Verbrennungsprozesses bleiben jedenfalls bestehen.

1.3.2 Elektromobilität

Oft wird unter Elektromobilität der elektrische Antrieb mit Energieversorgung aus einer Batterie – eigentlich einem Akkumulator, wie eine wiederaufladbare Batterie korrekt genannt wird – verstanden, allerdings zählen auch Brennstoffzellenfahrzeuge zur Elektromobilität, bei denen die Brennstoffzelle nur als Energiewandler genutzt wird, während der Energiespeicher ein Wasserstofftank ist.

Batterien bieten bei kurzen Fahrten mit leichten Fahrzeugen optimale Wirkungsgrade bis 85 % von der geladenen Batterie auf die Straße (tank-to-wheel). Das Wiederaufladen ist eines der Probleme der Batterie, es dauert viele Stunden und kann aufgrund physikalischer Grenzen nicht beliebig verkürzt werden. Hohe Ladeleistungen schädigen die Batterie vor allem hinsichtlich ihrer Lebensdauer, die stärksten Schnellladestationen liefern derzeit etwa 120 kW, wobei diese Leistungen nur unter optimalen Bedingungen und zu Ladebeginn möglich sind. Zudem wird der Ladewirkungsgrad unzulässigerweise oftmals bei Well-to-Wheel Betrachtung vernachlässigt. Da Strom nicht lokal speicherbar ist, müssen sowohl Ladeenergie wie auch Ladeleistung direkt bereitgestellt werden, was eine hohe Belastung für die elektrische Infrastruktur bedeutet. Die chemischen Prozesse der Batterie sind auch stark temperaturabhängig, vor allem bei Li-Ion Batterien ist das Laden bei niedrigen Temperaturen stark eingeschränkt.

Die **Brennstoffzellentechnologie** scheint auf den ersten Blick komplizierter, der Kraftstoff Wasserstoff wird bei hohem Druck in einem Tank gespeichert, in der Zelle wird er mit Sauerstoff aus der Luft oxidiert und liefert Strom, bei PEM Brennstoffzellen bei einer Betriebstemperatur von etwa 80 °C, einziges Abgas ist reines Wasser. Durch die Trennung von Energiespeicher und Energiewandler sind deutlich höhere Energiedichten und damit Reichweiten der Fahrzeuge möglich. Auch bei niedrigeren Temperaturen bleibt die Funktionalität der Brennstoffzelle vollständig erhalten. Die effektiven Wirkungsgrade liegen derzeit um 50 % im Fahrzeug (tank-to-wheel). Die Betankung erfolgt wie bei konventionellen Kraftstoffen durch das Überströmen aus einem Reservoir an der Tankstelle. Dadurch sind deutlich höhere **Tankleistungen** möglich: werden an einer Zapfsäule 5 kg Wasserstoff in 3 min getankt, wie bei PKW nach SAE J2601 [296] derzeit üblich, wird eine Energie von 600 MJ oder 167 kWh in 0,05 h übertragen, was einer Betankungsleistung von 3,3 MW entspricht. Durch die Bevorratung des Wasserstoffs an der Tankstelle können auch mehrere Zapfsäulen parallel betrieben werden. Derartige Ladeleistungen sind