

Helmut Eichlseder | Manfred Klell

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

3. Auflage

PRAXIS



Springer Vieweg

ATZ

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Aus dem Programm Kraftfahrzeugtechnik

Handbuch Verbrennungsmotor
herausgegeben von R. van Basshuysen und F. Schäfer

Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik
herausgegeben von H.-H. Braess und U. Seiffert

Bremsenhandbuch
herausgegeben von B. Breuer und K.-H. Bill

Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion
herausgegeben von H. Burg und A. Moser

Fahrwerkhandbuch
herausgegeben von B. Heißing, M. Ersoy und S. Gies

Verbrennungsmotoren
von E. Köhler und R. Flierl

Grundlagen Verbrennungsmotoren
herausgegeben von G. P. Merker, Chr. Schwarz und R. Teichmann

Lenkungshandbuch
herausgegeben von P. Pfeffer und M. Harrer

Automobilelektronik
von K. Reif

Handbuch Fahrerassistenzsysteme
herausgegeben von H. Winner, S. Hakuli und G. Wolf

Handbuch Fahrzeugakustik
herausgegeben von P. Zeller

Helmut Eichlseder • Manfred Klell

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

3., überarbeitete Auflage

Mit 229 Abbildungen und 26 Tabellen

Praxis | ATZ/MTZ-Fachbuch



Springer Vieweg

Univ.-Prof. Dr. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik
Technische Universität Graz, Austria

Univ.-Doz. Dr. Manfred Klell
HyCentA Research GmbH
Graz, Austria

ISBN 978-3-8348-1754-9
DOI 10.1007/978-3-8348-2196-6

ISBN 978-3-8348-2196-6 (eBook)

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

Springer Vieweg
© Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden 2008, 2010, 2012
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 Ein speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk be rechti gung 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.

Umschlagbild: Peter Grabner

Gedruckt auf säurefrei und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE.
Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media
www.springer-vieweg.de

Vorwort

Wasserstoff – der unbegrenzt verfügbare kohlenstofffreie Energieträger, der alle unsere Energie- und Umweltprobleme nachhaltig löst ... die idealisierende Euphorie mancher Proponenten der Wasserstoffwirtschaft wurde inzwischen wohl von der wirtschaftlich-fossilen Realität eingeholt. Den aus Umweltsicht zweifelsfrei bestehenden Vorteilen beim Einsatz von Wasserstoff steht gegenüber, dass dieser mit Energieaufwand hergestellt, gespeichert und verteilt werden muss, was einigen technischen und finanziellen Aufwand erfordert. Dennoch ist es angebracht, angesichts global steigenden Energiebedarfs und zunehmender Umweltbelastung eine derart reizvolle Alternative zu fossilen Energieträgern eingehend zu prüfen. Dazu ist es notwendig, jetzt in Forschungs- und Pilotprojekten wirtschaftlich und technisch effiziente und sichere Rahmenbedingungen für die Anwendung von Wasserstoff zu schaffen und seinen Nutzen für die Umwelt zu verifizieren.

Das Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz verfügt über jahrelange Erfahrung in der Optimierung von Brennverfahren mit Wasserstoff in Verbrennungsmotoren. Die 2001 zunächst in einem bilateralen Projekt mit BMW begonnenen Arbeiten wurden ab 2004 im Rahmen des EU Integrated Projects HyICE fortgesetzt und später in internationalen und nationalen Forschungsprogrammen.

Im Zuge des Aufbaus der erforderlichen Prüfstandsinfrastruktur mussten Fragen der Werkstoffwahl, der Sicherheitseinrichtungen, der Gasversorgung usw. gelöst werden. Dabei zeigte sich, dass die dazu nötigen Informationen nicht immer einfach verfügbar waren. In Gesprächen mit der Firma MAGNA STEYR, die zur gleichen Zeit eine Fertigung für Flüssig-Wasserstofftanksysteme aufbaute und das EU Integrated Project StorHy koordinierte, 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 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.

Als nächster Schritt folgte der Wunsch, die Erfahrungen der Forschungs- und Prüftätigkeit in die Lehre der Technischen Universität Graz einfließen zu lassen. Die erste dem Thema Wasserstoff gewidmete Vorlesung wurde 2007 von den Autoren 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 gasförmigen und flüssigen Wasserstoffs sowie seiner Anwendung 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, über seine Anwendung in der Brennstoffzelle und darüber hinaus über Normung, Recht und Sicherheit aufgenommen.

Wir hoffen, dass das so entstandene Werk Studierenden wie auch Ingenieuren in der Praxis als brauchbarer Arbeitsbehelf dienen kann.

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.

Es freut uns sehr, dass die im Jahre 2008 veröffentlichte 1. Auflage dieses Studienbuchs so gut angenommen wurde, dass schon im Jahre 2010 die 2. überarbeitete und erweiterte Auflage erscheinen konnte. Wir haben das Konzept, einen möglichst umfassenden Überblick zum Thema zu geben und die Thermodynamik des flüssigen und gasförmigen Wasserstoffs sowie die Anwendung in der Fahrzeugtechnik zu vertiefen, beibehalten und ausgebaut. Der Inhalt des Buchs wurde in allen Abschnitten aktualisiert, das Thema Verbrennung des Wasserstoffs in der Verbrennungskraftmaschine wurde vertieft und vor allem im Bereich Gemische mit Methan (Biogas, Erdgas) erweitert. In dieser Technologie sehen wir großes Potential, mit der Verbindung von bewährter konventioneller Funktionalität mit erneuerbar hergestellten Kraftstoffen CO₂-freie Mobilität wirtschaftlich darzustellen.

Aufgrund des anhaltenden Interesses am Thema Wasserstoff kann nunmehr die 3. aktualisierte Auflage dieses Studienbuchs erscheinen. Für das vorliegende Buch wurden die Kapitel 1 und 2 sowie 7 von den beiden Autoren gemeinsam verfasst, Kapitel 6 überwiegend von Eichlseder, die übrigen von Klell.

Wir geben der Hoffnung Ausdruck, dass auch diese 3. Auflage bei Interessierten und Fachleuten auf so gute Resonanz stößt. Wir bedanken uns wieder bei allen Helferinnen und Helfern, die uns unterstützt haben, sowie beim Verlag für die freundliche, effiziente und kompetente Betreuung.

Graz, Jänner 2012

Helmut Eichlseder, Manfred Klell

helmut.eichlseder@tugraz.at

klell@hycenta.at

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	XI
1 Energie und Umwelt	1
1.1 Bevölkerung, Energiebedarf und Ressourcen	2
1.2 Emissionen, Umwelt und Klima	7
1.3 Wirkungsgradketten und CO ₂ -Emissionen	10
1.3.1 Well-to-Tank Wirkungsgrade und CO ₂ -Emissionen	10
1.3.2 Tank-to-Wheel Wirkungsgrade und CO ₂ -Emissionen	16
1.3.3 Well-to-Wheel Wirkungsgrade und CO ₂ -Emissionen	18
2 Geschichtliches	21
3 Grundlagen	31
3.1 Vorkommen	31
3.2 Thermodynamischer Zustand	31
3.3 Stoffeigenschaften	38
3.4 Chemische Eigenschaften	41
3.4.1 Isotope	41
3.4.2 Atomspin	42
3.4.3 Spektrallinien	44
3.5 Chemische Verbindungen	44
3.5.1 Hydride	45
3.5.2 Verbindungen mit Kohlenstoff	46
3.5.3 Zerlegung von Wasserstoffmolekülen	48
3.6 Verbrennung	48
3.6.1 Bruttoreaktionsgleichung	49
3.6.2 Chemisches Gleichgewicht	53
3.6.3 Reaktionskinetik	55
3.6.4 Kettenreaktion	56
4 Erzeugung	59
4.1 Überblick	59
4.2 Wasserstoff als Nebenprodukt	61
4.2.1 Benzinreformierung	61

4.2.2 Ethenproduktion	62
4.2.3 Chlor-Alkali-Elektrolyse	62
4.3 Reformierung	63
4.3.1 Dampfreformierung	64
4.3.2 Partielle Oxidation	65
4.3.3 Autotherme Reformierung	67
4.3.4 Reformierung bei niedrigen Temperaturen	67
4.4 Direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen	67
4.4.1 Cracken	67
4.4.2 Kværner-Verfahren	68
4.5 Vergasung	68
4.5.1 Trocknung	69
4.5.2 Thermolyse oder Pyrolyse	69
4.5.3 Oxidation	70
4.5.4 Reduktion	70
4.5.5 Vergaserbauarten	70
4.5.6 Pyrolyse von Glycerin	72
4.6 Reinigung	73
4.6.1 Reinigung der Ausgangsstoffe	74
4.6.2 Reinigung des Endprodukts	75
4.7 Elektrolytische Spaltung von Wasser	77
4.7.1 Grundlagen	77
4.7.2 Elektrolysesysteme	82
4.8 Chemische Spaltung von Wasser	84
4.8.1 Grundlagen	84
4.8.2 Die Reaktion von NaK und Wasser	86
4.9 Biologische Herstellungsverfahren	91
4.9.1 Enzyme der Wasserstofferzeugung	92
4.9.2 Biophotolyse	92
4.9.3 Fermentation	94
5 Speicherung und Transport	95
5.1 Gasförmige Speicherung	95
5.1.1 Verdichtung and Expansion	96
5.1.2 Tanksysteme und Infrastruktur	98
5.2 Flüssige Speicherung	103
5.2.1 Verflüssigung	104
5.2.2 Verdichtung des flüssigen Wasserstoffs	106
5.2.3 Tanksysteme und Infrastruktur	110
5.3 Hybride Speicherung	113
5.4 Speicherung in physikalischen und chemischen Verbindungen	115
5.4.1 Physikalische und chemische Adsorption	115
5.4.2 Chemische Absorption	116
5.5 Zusammenfassung und Vergleich der Energiedichten	119

5.6	Thermodynamische Analyse einer Flüssigwasserstoffinfrastruktur	124
5.6.1	Anlage am HyCentA	124
5.6.2	Thermodynamisches Modell	127
5.6.3	Druckaufbauverhalten im thermodynamischen Gleichgewicht	130
5.6.4	Druckaufbauverhalten im thermodynamischen Ungleichgewicht	137
5.6.5	Boil-Off-Verhalten	142
5.6.6	Abkühlen von Leitungen und Befüllen des Konditionierbehälters	143
5.6.7	Rückgasverhalten beim Befüllen eines LH ₂ Tanks	148
6	Verbrennungsmotoren	151
6.1	Relevante Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Verbrennungsmotor	152
6.2	Einteilung und Gliederungsmerkmale	155
6.3	H ₂ -Betrieb mit äußerer Gemischbildung	159
6.4	Innere Gemischbildung bzw. H ₂ -Direkteinblasung	162
6.4.1	Verbrennungsverhalten bei Wasserstoff-Direkteinblasung	167
6.4.2	Ladungsschichtung	169
6.4.3	Verbrennungssteuerung	172
6.4.4	H ₂ -Verbrennung mit Selbstzündung	175
6.5	Fahrzeuge mit Wasserstoffmotor	178
7	Gemische aus Wasserstoff und Methan	187
7.1	Motivation und Besonderheiten der Gemische	187
7.1.1	Eigenschaften von Erdgas, Biogas und Gemischen	188
7.1.2	Auswirkungen auf die Verbrennung	196
7.1.3	Betriebsstrategien	201
7.2	Aufbau eines Prototypenfahrzeugs	202
7.2.1	Motoradaption	203
7.2.2	Fahrzeugadaption	205
7.2.3	Elektronisches Gas-Sicherheitssystem (ELGASS)	209
7.2.4	Zulassung, Betrieb und Wartung	213
7.3	Weitere Anwendungen	214
8	Brennstoffzellen	219
8.1	Prinzip der Brennstoffzelle	221
8.2	Kenngrößen der Brennstoffzelle	222
8.3	Aufbau von Brennstoffzellen	226
8.4	Arten von Brennstoffzellen	229
8.5	Anwendung der Brennstoffzelle	239
8.5.1	Portable Brennstoffzellen	239
8.5.2	Stationäre Brennstoffzellen	240
8.5.3	Mobile Brennstoffzellen zu Lande	243
8.5.4	Mobile Brennstoffzellen zu Wasser	251

9 Weitere Anwendungen	255
9.1 Raffinerieprozesse	256
9.1.1 Hydrofining	258
9.1.2 Hydrocracken	258
9.2 Chemie	259
9.2.1 Haber-Bosch-Verfahren	259
9.2.2 Fischer-Tropsch-Verfahren	261
9.2.3 Methanolherstellung	263
9.2.4 Halbleiterindustrie	263
9.2.5 Analytische Chemie	264
9.2.6 Lebensmittelchemie	264
9.2.7 Wasseraufbereitung	264
9.3 Metallurgie	265
9.3.1 Reduktion und Behandlung von Metallen	265
9.3.2 Schweißen und Schneiden	265
9.4 Energietechnik und Verkehrstechnik	267
10 Werkstoffe, Recht und Sicherheit	271
10.1 Werkstoffe	271
10.2 Recht und Sicherheit	273
10.2.1 Verordnungen und Richtlinien in der EU	273
10.2.2 Die Genehmigung von Kraftfahrzeugen in der EU	280
10.2.3 Normen und technische Regelwerke	283
10.2.4 Vergleichender Brandversuch für Fahrzeugtanks	286
10.2.5 Prüfstände für Wasserstoffanwendungen	287
10.2.6 Sicherheit am HyCentA	293
Literatur	299
Sachwortverzeichnis	315

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen¹

Lateinische Formelzeichen

<i>a</i>	Schallgeschwindigkeit [m/s]; spezifische Arbeit [J/kg]; Temperaturleitfähigkeit [m^2/s]; Kohäsionsdruck [$\text{m}^6 \text{ Pa/mol}^2$]
<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, $c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
c_v, c_p	spezifische Wärmekapazität bei $v = \text{konst.}$ bzw. $p = \text{konst}$ [J/kg K]
<i>C</i>	Konstante (verschiedene Dimensionen)
C_{mv}	molare Wärmekapazität (früher auch: Molwärme) bei $v = \text{konst.}$ [J/kmol K]
C_{mp}	molare Wärmekapazität (früher auch: Molwärme) bei $p = \text{konst.}$ [J/kmol K]
<i>d</i>	relative Dichte [m]
<i>D</i>	Diffusionskoeffizient [cm^2/s]
<i>e</i>	spezifische Energie [J/kg]; elektrische Elementarladung $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
e_a	spezifische äußere Energie [J/kg]
<i>E</i>	Energie [J]; Exergie [J]; Energiepotential, Zellspannung, elektrisches Potential [V]
E_a	äußere Energie [J]
E_N	Nernstspannung [V]
<i>f</i>	Frequenz [s^{-1}]
<i>F</i>	Faraday Konstante [As/mol], freie Energie [J]
<i>g</i>	Erdbeschleunigung, Normfallbeschleunigung: $g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
<i>G</i>	freie Enthalpie [J]
G_m	molare freie Enthalpie [J/kmol]
G_m^0	molare freie Enthalpie beim Standarddruck p^0 [J/kmol]
<i>h</i>	spezifische Enthalpie [J/kg]; Plancksches Wirkungsquantum: $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ [J s]
<i>H</i>	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	Heizwert (früher unterer Heizwert) [kJ/kg]
H_{vol}	volumetrischer Heizwert [kJ/dm ³]
$\Delta_B H$	Bildungsenthalpie [kJ/kmol]
$\Delta_R H$	Reaktionsenthalpie [kJ/kmol]
<i>I</i>	Stromstärke [A]
<i>k</i>	turbulente kinetische Energie [m^2/s^2]
<i>l</i>	Länge [m]

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

m	Massen [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, $p^0 = 1$ atm = 1,013 bar / häufig auch $p^0 = 1$ 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: $R_m = 8314,472$ J/kmolK
s	spezifische Entropie [J/kg K]
S	Entropie [J/K]
t	Zeit [s], Temperatur [$^{\circ}$ 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	Isentropenexponent [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit, Wärmeleitzahl [W/mK]; Wellenlänge [m]; Luftverhältnis, Luftzahl [-]
μ	Durchflusszahl [-]; Überströmkoeffizient [-]; 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 [-]
ν_{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 [$^\circ \text{KW}$]; Geschwindigkeitsbeiwert [-]; relative Feuchte [-]
φ_i	Volumenanteil der Komponente i [-]
ω	Winkelgeschwindigkeit [s^{-1}]
ζ	exergetischer Wirkungsgrad [-]; Verlustbeiwert [-]
ζ_u	Umsetzungsgrad [-]
Φ	Equivalence Ratio ($=1/\lambda$) [-]

Operatoren und Bezeichnungen

[P]	Konzentration der Spezies P [kmol/m^3]
d	vollständiges Differential
δ	unvollständiges Differential
∂	partielles 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	Akaline Fuel Cell
AGB	äußere Gemischbildung
APU	Auxiliary Power Unit
ATEX	Atmospheres Explosibles
B	Bildung
BZ	Brennstoffzelle
C	Kompression
ch	chemisch
CFD	Computational Fluid Dynamics
CGH2	compressed gaseous hydrogen
CZ	Cetanzahl
D	Diffusion
Da	Damköhler-Zahl, $Da = \tau_l / \tau_{ch}$
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 Comission for Europe
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
fl	flüssig, Flamme
F	Formation
FS	Füllstand
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 ($1, 2, \dots, n$), innere
I	Integral
IPTS	International Praktische Temperaturskala