
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]
$H_{u(\text{,gr})}$	(gravimetrischer) Heizwert (früher unterer Heizwert) [kJ/kg]
$H_{u(\text{,vol})}$	(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 [$\text{J}/\text{kg K}$]; elektrischer Widerstand [Ω]
R_m	allgemeine (molare) Gaskonstante: $R_m = 8314,472 \text{ J}/\text{kmolK}$
s	spezifische Entropie [$\text{J}/\text{kg K}$]
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 [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient ($1/\text{K}$)
δ	Grenzschichtdicke [m]
ε	Verdichtungsverhältnis [-]; Dissipation [m^2/s^3]
η	(dynamische) Viskosität [$\text{Ns}/\text{m}^2 = \text{kg}/\text{ms}$]; 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 [$^\circ$ 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
∂	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