

Helmut Eichlseder | Manfred Klell

# Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 228 Abbildungen und 29 Tabellen

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+  
TEUBNER

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 1. Auflage.....	V
Vorwort zur 2. Auflage.....	VI
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen.....	XI
<b>1 Energie und Umwelt.....</b>	<b>1</b>
1.1 Bevölkerung, Energiebedarf und Ressourcen.....	2
1.2 Emissionen, Umwelt und Klima.....	7
1.3 Wirkungsgradketten und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	10
1.3.1 Well-to-Tank Wirkungsgrade und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	10
1.3.2 Tank-to-Wheel Wirkungsgrade und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	16
1.3.3 Well-to-Wheel Wirkungsgrade und CO <sub>2</sub> -Emissionen.....	18
<b>2 Geschichtliches.....</b>	<b>21</b>
<b>3 Grundlagen.....</b>	<b>31</b>
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
<b>4 Erzeugung.....</b>	<b>59</b>
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	Kvaemer-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
<b>5</b>	<b>Speicherung und Transport.....</b>	<b>95</b>
5.1	Gasförmige Speicherung.....	95
5.1.1	Verdichtung and Expansion.....	96
5.1.2	Tariksyste <del>m</del> e 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 LH2 Tanks .....	148
<b>6</b>	<b>Verbrennungsmotoren</b> .....	<b>151</b>
6.1	Relevante Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Verbrennungsmotor. ....	152
6.2	Einteilung und Gliederungsmerkmale.....	155
6.3	H2-Betrieb mit äußerer Gemischbildung.....	159
6.4	Innere Gemischbildung bzw. H2-Direkteinblasung.....	162
6.4.1	Verbrennungsverhalten bei Wasserstoff-Direkteinblasung .....	167
6.4.2	Ladungsschichtung.....	169
6.4.3	Verbrennungssteuerung.....	172
6.4.4	H2-Verbrennung mit Selbstzündung.....	175
6.5	Fahrzeuge mit Wasserstoffmotor .....	178
<b>7</b>	<b>Gemische aus Wasserstoff und Methan</b> .....	<b>187</b>
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
<b>8</b>	<b>Brennstoffzellen</b> .....	<b>219</b>
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.....	250

<b>9 Weitere Anwendungen</b> .....	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
<b>10 Werkstoffe, Recht und Sicherheit</b> .....	271
10.1 Werkstoffe.....	271
10.2 Recht und Sicherheit ....7.....	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