

**Manfred Klell · Helmut Eichlseder
Alexander Trattner**

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

4., aktualisierte und erweiterte Auflage

Springer Vieweg

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 Wasserstofferzeugung	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