

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	XI
1 Energie und Umwelt	1
1.1 Bevölkerung und Energieverbrauch	1
1.2 Ressourcen und Energiebedarf	5
1.3 Emissionen und Umwelt	6
1.4 Energieträger	7
1.4.1 Primäre Energieträger	7
1.4.2 Sekundäre Energieträger	9
1.5 Energiewandler und Energiespeicher	12
1.6 Literatur	13
2 Geschichtliches	15
2.1 Literatur	26
3 Eigenschaften	27
3.1 Vorkommen	27
3.2 Thermodynamischer Zustand und Stoffwerte	27
3.3 Chemische Eigenschaften	36
3.3.1 Isotope	36
3.3.2 Atomspin	37
3.3.3 Spektrallinien	38
3.4 Chemische Reaktionen	40
3.4.1 Hydride	40
3.4.2 Kohlenstoffverbindungen	42
3.4.3 Verbrennung	44
3.4.4 Zerlegung von Wasserstoffmolekülen	46
3.5 Literatur	47
4 Erzeugung	49
4.1 Wasserstoff als Nebenprodukt	51
4.1.1 Benzinreformierung	51
4.1.2 Ethenproduktion	52
4.1.3 Chlor-Alkali-Elektrolyse	52

4.2	Reformierung	53
4.2.1	Dampfreformierung	54
4.2.2	Partielle Oxidation	56
4.2.3	Autotherme Reformierung	57
4.2.4	Reformierung bei niedrigen Temperaturen	57
4.3	Direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen	58
4.3.1	Cracken	58
4.3.2	Kværner-Verfahren	58
4.4	Vergasung	58
4.4.1	Trocknung	59
4.4.2	Thermolyse oder Pyrolyse	60
4.4.3	Oxidation	60
4.4.4	Reduktion	60
4.4.5	Vergaserbauarten	61
4.5	Reinigung	63
4.5.1	Reinigung der Ausgangsstoffe	63
4.5.2	Reinigung des Endprodukts	64
4.6	Spaltung von Wasser	67
4.6.1	Thermische Wasserspaltung	67
4.6.2	Elektrochemische Wasserspaltung	67
4.6.3	Chemische Wasserspaltung	76
4.7	Biologische Herstellungsverfahren	78
4.7.1	Enzyme der Wasserstofferzeugung	79
4.7.2	Biophotolyse	80
4.7.3	Fermentation	81
4.8	Literatur	82
5	Speicherung und Transport	85
5.1	Verdichtung und Abgabe von gasförmigem Wasserstoff	87
5.2	Druckspeicher für Wasserstoff	91
5.3	Verflüssigung von Wasserstoff	93
5.4	Verdichtung von flüssigem Wasserstoff	96
5.5	Kryospeicherung und Abgabe von flüssigem Wasserstoff	100
5.6	Thermodynamik der flüssigen Wasserstoffspeicherung	106
5.6.1	Allgemeine Beschreibung des Systems Kryobehälter	107
5.6.2	Druckaufbau eines Kryobehälters im thermodynamischen Gleichgewicht	110
5.6.3	Druckaufbau eines Kryobehälters im thermodynamischen Ungleichgewicht	117
5.6.4	Abkühlung und Befüllung eines Behälters	121
5.7	Speicherung in physikalisch und chemisch gebundener Form	126
5.7.1	Physikalische Adsorption auf Festkörperoberflächen	126
5.7.2	Chemische Adsorption in Hydriden	127
5.8	Transport und Verteilung von Wasserstoff	133
5.9	Literatur	137

6 Brennstoffzelle	139
6.1 Prinzip der Brennstoffzelle	141
6.2 Kenngrößen der Brennstoffzelle	142
6.3 Aufbau von Brennstoffzellen	146
6.3.1 Membran-Elektroden-Einheit (MEA)	147
6.3.2 Bipolarplatten	149
6.3.3 Dichtungen	150
6.3.4 Endplatten	150
6.4 Typen von Brennstoffzellen	150
6.4.1 AFC – Alkaline-FC (Alkalische-BZ)	152
6.4.2 PEMFC – Proton-Exchange-Membrane-FC (Polymerelektrolytmembran-BZ)	153
6.4.3 PAFC – Phosphoric Acid FC (Phosphorsaure-BZ)	157
6.4.4 MCFC – Molten Carbonate FC (Carbonat-Schmelze BZ)	158
6.4.5 SOFC – Solid Oxide FC (Oxid-Keramik BZ)	159
6.5 Literatur	160
7 Verbrennungsmotor	161
7.1 Einleitung	161
7.2 Relevante Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Verbrennungsmotor	162
7.3 Einteilung und Gliederungsmerkmale	164
7.4 H ₂ -Betrieb mit äußerer Gemischbildung	169
7.5 Innere Gemischbildung bzw. H ₂ -Direkteinblasung	172
7.5.1 Verbrennungsverhalten bei Wasserstoff-Direkteinblasung	176
7.5.2 Ladungsschichtung	178
7.5.3 Verbrennungssteuerung	182
7.6 Gemische Wasserstoff – Erdgas/Biogas	184
7.6.1 Charakteristika der Brenngase und deren Mischungen	184
7.6.2 Auswirkung auf die Verbrennung	192
7.6.3 Auswirkungen auf das Fahrzeug und Betriebsstrategien	198
7.7 Literatur	199
8 Anwendung	203
8.1 Raffinerieprozesse	204
8.1.1 Hydrofining	206
8.1.2 Hydrocracken	206
8.2 Chemie	207
8.2.1 Haber-Bosch-Verfahren	207
8.2.2 Fischer-Tropsch-Verfahren	209
8.2.3 Methanolherstellung	211
8.2.4 Halbleiterindustrie	211
8.2.5 Analytische Chemie	212
8.2.6 Lebensmittelchemie	212
8.2.7 Wasseraufbereitung	212

8.3	Metallurgie	213
8.3.1	Reduktion und Behandlung von Metallen	213
8.3.2	Schweißen und Schneiden	213
8.4	Energietechnik	215
8.4.1	Portable Brennstoffzellen	215
8.4.2	Stationäre Brennstoffzellen	217
8.5	Verkehrstechnik	221
8.5.1	Wasserstoff in der Raumfahrt	221
8.5.2	Wasserstoff in der Luftfahrt	222
8.5.3	Wasserstoff zu Wasser	223
8.5.4	Wasserstoff zu Lande	226
8.5.5	Automotive Anwendungen mit Brennstoffzellen	228
8.5.6	Automotive Anwendungen mit Verbrennungsmotor	231
8.5.7	Automotive Anwendungen mit Wasserstoff-Erdgas-Gemischen	239
8.6	Literatur	243
9	Normen, Recht und Sicherheit	247
9.1	Normen	247
9.1.1	Nationale und Internationale Normen	247
9.1.2	Normen für Wasserstoffanwendungen	249
9.2	Recht	253
9.2.1	Chemikalienrichtlinie	253
9.2.2	Verordnung über explosionsfähige Atmosphären (VEXAT)	254
9.3	Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff	256
9.4	Sicherheit von Behältern und Leitungen	260
9.4.1	Werkstoffe	260
9.4.2	Druckbehälter	264
9.4.3	Kryobehälter	264
9.4.4	Fahrzeugtanks	265
9.5	Sicherheit von Gasfahrzeugen	267
9.5.1	Herstellung	267
9.5.2	Kraftstoffanlage	267
9.5.3	Prüfung und Zulassung	269
9.5.4	Betrieb, Reparatur und Wartung	269
9.5.5	Garagen für Gasfahrzeuge	270
9.6	Sicherheit von Prüfständen	270
9.6.1	Ausbreitungsverhalten von Wasserstoff	270
9.6.2	Komponenten eines Wasserstoffprüfstands	273
9.7	Sicherheit von Anlagen	277
9.8	Literatur	281
	Sachwortverzeichnis	283