

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 Wirkungsketten 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 Adsorption	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
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