

Helmut Eichlseder | Manfred Klell

Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik

Erzeugung, Speicherung, Anwendung

Mit 209 Abbildungen und 24 Tabellen :

PRAXIS | ATZ/MTZ-Fachbuch



VIEWEG+
TEUBNER

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	Kvaerner-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 Wasserstoffherzeugung	79
4.7.2	Biophotolyse	80
4.7.3	Fermentation	81
4.8	Literatur	82
	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
<i>pA</i> 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