

Inhalt

Vorwort	XI
1 Einführung	1
1.1 Das Interesse am Element Wasserstoff	1
1.1.1 Die Zielvorgaben der Politik	5
1.1.2 Strategien zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft .	7
1.2 Inhalt des vorliegenden Buches	13
1.3 Die Form des Buches	13
2 Eigenschaften des Wasserstoffs	15
2.1 Grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften von Wasserstoff	20
2.2 Das thermodynamische Verhalten von Wasserstoff	24
2.2.1 Zustandsgrößen und 1. Hauptsatz der Thermodynamik .	24
2.2.2 Die Phasengrenzen	35
2.2.3 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	37
2.2.4 Die spezifische Wärmekapazität	43
2.2.5 Die polytrope Zustandsänderung	50
2.2.6 Wirkungs- oder Nutzungsgrade	55
2.2.7 Die Freiheitsgrade eines Wasserstoffsystems	58
2.2.8 Der flüssige und feste Wasserstoff	59
2.2.9 Die Viskosität des n-Wasserstoffs	61
2.2.10 Der Thomson-Joule-Effekt des Wasserstoffs	63
2.2.11 Die Wärmeleitfähigkeit	66
2.2.12 Anteile und Konzentrationen von Mischungen	68
2.2.13 Mischungsregeln	74
2.3 Die Klassifizierung als Produkt	77
2.4 Permeationseigenschaft des Wasserstoffs	79
2.4.1 Permeation durch metallische Werkstoffe	81
2.4.2 Permeation des Wasserstoffs durch Polymere	95

2.5	Metallische Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss	100
2.5.1	Gefährdungspotentiale für die Wasserstoffversprödung	101
2.5.2	Einschätzung des Gefahrenpotentials für bestehende Stahlleitungen hinsichtlich Wasserstoffversprödung ...	109
2.5.3	Auslegung von Bauteilen gegen Wasserstoff induzierten Sprödbruch	113
2.5.3.1	Spannungs- und Verformungszustände in beanspruchten Bauteilen	116
2.5.3.2	Grundregeln zum Betrieb mit rissgefährdeten Bauteilen	120
2.5.3.3	Die Grenztragfähigkeit	121
2.5.3.4	Die spezifische Riss- oder Bruchenergie	125
2.5.3.5	Bruchmechanische Bewertung von Bauteilen unter quasistatischer Beanspruchung	128
2.5.3.6	Ermüdungsbruch unter Wasserstoffeinfluss ..	133
2.5.3.7	Bewertung von zyklischen Belastungen unter Wasserstoffeinfluss	138
2.6	Die Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff	141
2.6.1	Explosionsgrenzen von Wasserstoff	144
2.6.2	Praktische Anleitung zum Explosionsschutz	151
2.7	Enthalpieänderung chemischer Reaktionen	157
2.7.1	Standardzustände chemischer Reaktionen	157
2.7.2	Die Verbrennung von Wasserstoff	161
2.7.2.1	Spezifische Kenngrößen der Verbrennung ...	162
2.7.2.2	Die Abgaszusammensetzung	164
3	Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten	173
3.1	Die Investition	175
3.2	Die Kapitalwertmethode	178
3.2.1	Der diskontierte Cashflow	180
3.2.2	Sensitivitätsanalyse	183
4	Technologiepfade mit Wasserstoff	185
4.1	Die aktuelle Welt des Wasserstoffs	186
4.2	Die Sektorkopplung	193
4.3	Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland	198
4.4	Maßnahmen zur Wettbewerbsstärkung	207

4.5	Potential des Wasserstoffs zur Reduzierung der Treibhausgase	209
4.6	Der Entwicklungsstand der Wasserstofftechnologien	213

5 Die Erzeugung von Wasserstoff 217

5.1	Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Quellen	219
5.1.1	Die Dampfreformierung	220
5.1.2	Die partielle Oxidation	227
5.1.3	Die autotherme Reformierung	229
5.1.4	Kohle- und Biomassenvergasung	235
5.1.5	Carbon Dioxide Capture and Storage – die Verwahrung von Kohlendioxid im Untergrund	238
5.1.5.1	Gndlagen der Gasspeicherung im porösen Gestein	243
5.1.5.2	Die Verrohrung einer Bohrung	247
5.1.5.3	Betrieb und Überwachung von Kohlendioxid-speichern	249
5.1.5.4	Der Transport von Kohlendioxid	250
5.1.6	Die thermische Pyrolyse	251
5.2	Elektrolytische Verfahren zur Wasserstofferzeugung	254
5.2.1	Die elektrochemischen Grundlagen der Elektrolyse	256
5.2.2	Die Thermodynamik der Elektrolyse	259
5.2.2.1	Temperaturbereich bis 100 °C	261
5.2.2.2	Die Bedeutung der freien Enthalpie für die Elektrolyse	262
5.2.2.3	Der Hochtemperaturbereich bei der Wasserelektrolyse	267
5.2.3	Die Effizienz der Elektrolyse	269
5.2.4	Die Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM)	274
5.2.5	Die alkalische Elektrolyse (AEL)	280
5.2.6	Die Hochtemperaturelektrolyse (SOEC)	287
5.2.7	Zusammenfassung der Eigenschaften von Elektrolyseanlagen	293
5.3	Die biologische Wasserstofferzeugung	294
5.3.1	Die Biophotolyse	295
5.3.2	Die mikrobielle Elektrolyse (MEC)	295
5.3.3	Die Fermentation	296
5.3.3.1	Die Photofermentation	299
5.3.3.2	Die dunkle Fermentation	300
5.4	Verfahren zur Wasserstoffreinigung	303

5.4.1	Methoden zur Wasserstoffaufbereitung	305
5.4.2	Besonderheiten bei der Membrantrennung	308
6	Der Transport von Wasserstoff.....	311
6.1	Leitungsgebundener Transport von Wasserstoff	311
6.2	Wasserstoffeinspeisung in Rohrleitungsnetze	321
6.3	Kompensation des Druckverlustes auf dem Transportsystem ...	327
6.4	Verwendung von nicht ortsfesten Transportbehältern	332
6.5	Liquid Organic Hydrogen Carrier	334
7	Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff.....	337
7.1	Verdichter für die Kompression von Wasserstoff	337
7.1.1	Der Kolbenverdichter	339
7.1.2	Membranverdichter	348
7.1.3	Turboverdichter	351
7.2	Gasmotoren und Gasturbinen in der zukünftigen Wasserstoffwelt	352
7.3	Expansionsanlagen in Wasserstofftransportsystemen	358
8	Die Verflüssigung von Wasserstoff.....	365
8.1	Die Grundlagen der Wasserstoffverflüssigung	366
8.2	Verflüssigungsprozesse	369
8.2.1	Ergänzungen zum Verflüssigungsprozess	372
8.2.2	Zur Energiebilanz des Verflüssigungsprozesses	375
9	Speicher für den Wasserstoff.....	381
9.1	Die untertägige Speicherung von Wasserstoff	384
9.1.1	Geologische Voraussetzungen für die untertägige Wasserstoffspeicherung	385
9.1.2	Grundlagen der untertägigen Speicherung in Salzkavernen	387
9.1.3	Das Solverfahren von Salzkavernen	389
9.1.4	Gastechnische Ausrüstung von Speicherkavernen	392
9.1.5	Wasserstoff als Blanketmedium und als Speichergut ...	394
9.1.5	Kriterien für die Festlegung der Betriebsparameter	397
9.1.6	Die obertägigen Speichieranlagen	404
9.2	Wasserstoff in ortsfesten und beweglichen Druckbehältern	409
9.3	Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff	413

9.4	Alternative physikalische Speicherverfahren	415
9.5	Stoffliche Wasserstoffspeicher	416
10	Anwendungen für Wasserstoff	419
10.1	Anwendungen im Industriesektor	419
10.1.1	Wasserstoff als Schlüssel zum klimaneutralen Stahl ...	420
10.1.2	Wasserstoff als Teil der Ammoniaksynthese	423
10.1.3	Wasserstoff wird zu Methanol	425
10.2	Wasserstoff im Mobilitätssektor	426
10.2.1	Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr	426
10.2.2	Wasserstoff im Schienenverkehr	428
10.2.3	Wasserstoff im PKW-Bereich	431
10.2.4	Wasserstoff im Nutzfahrzeugbereich	433
10.2.5	Wasserstoff in Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen ...	434
10.2.6	Wasserstofftankstellen	437
10.3	Wasserstoff für Brennstoffzellen	440
10.3.1	Die Thermodynamik der Brennstoffzelle	441
10.3.2	Die Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC	442
10.3.3	Die alkalische Brennstoffzelle	447
10.3.4	Die phosphorsaure Brennstoffzelle	447
10.3.5	Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle	448
10.3.6	Oxidkeramische Brennstoffzelle	448
	Literaturverzeichnis	449
	Anhang A: Übungsaufgaben	457
	Anhang B	477
1	Stoffdaten des n-Wasserstoffs	477
1.1	T , s -Diagramm	477
1.2	Realgaszahlen des n-Wasserstoffs	478
1.3	Spezifische Wärmekapazität	479
1.4	Isentropenexponent	479
1.5	h , s -Diagramm	480
1.6	Die Wärmeleitfähigkeit des n-Wasserstoffs	480
2	Bruchmechanische Werkstoffkennwerte	481
3	Explosionsschutz	484
4	Verbrennung von Wasserstoff	485
5	Spezifische Energiekosten in der PKW-Mobilität	486

6	Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland	487
7	Daten zur Elektrolyse	488
8	Zur Verflüssigung von Wasserstoff	492
9	Zur Speicherung von Wasserstoff	493
Anhang C: Einheiten und deren Umrechnungen		495
Anhang D: Formelzeichen und Einheiten		497
Anhang E: Abkürzungen und Eigennamen		505
Index		509