

Inhalt

Die Autoren	XI
Vorwort	XIII
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	8
1.2 Wasserstoff im öffentlichen Diskurs der ökologischen Transformation	13
1.3 Inhalt des vorliegenden Buches	16
1.4 Die Form des Buches	17
2 Eigenschaften des Wasserstoffs	19
2.1 Grundlegende physikalische und chemische Eigenschaften von Wasserstoff	24
2.2 Das thermodynamische Verhalten von Wasserstoff	28
2.2.1 Zustandsgrößen und 1. Hauptsatz der Thermodynamik	28
2.2.2 Die Phasengrenzen	39
2.2.3 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	41
2.2.4 Die spezifische Wärmekapazität	47
2.2.5 Die polytrope Zustandsänderung	54
2.2.6 Wirkungs- oder Nutzungsgrade	59
2.2.7 Die Freiheitsgrade eines Wasserstoffsystems	62
2.2.8 Der flüssige und feste Wasserstoff	63
2.2.9 Die Viskosität des n-Wasserstoffs	65
2.2.10 Der Thomson-Joule-Effekt des Wasserstoffs	67
2.2.11 Die Wärmeleitfähigkeit	70

2.2.12	Anteile und Konzentrationen von Mischungen	72
2.2.13	Mischungsregeln	78
2.3	Die Klassifizierung als Produkt	81
2.4	Permeationseigenschaft des Wasserstoffs	83
2.4.1	Permeation durch metallische Werkstoffe	85
2.4.2	Permeation des Wasserstoffs durch Polymere	99
2.5	Metallische Werkstoffe unter Wasserstoffeinfluss	104
2.5.1	Gefährdungspotentiale für die Wasserstoffversprödung	105
2.5.2	Einschätzung des Gefahrenpotentials für bestehende Stahlleitungen hinsichtlich Wasserstoffversprödung	113
2.5.3	Auslegung von Bauteilen gegen Wasserstoff induzierten Sprödbruch	117
2.5.3.1	Spannungs- und Verformungszustände in beanspruchten Bauteilen	120
2.5.3.2	Grundregeln zum Betrieb mit rissgefährdeten Bauteilen	124
2.5.3.3	Die Grenztragfähigkeit	125
2.5.3.4	Die spezifische Riss- oder Bruchenergie	129
2.5.3.5	Bruchmechanische Bewertung von Bauteilen unter quasistatischer Beanspruchung	132
2.5.3.6	Ermüdungsbruch unter Wasserstoffeinfluss	137
2.5.3.7	Bewertung von zyklischen Belastungen unter Wasserstoffeinfluss	142
2.6	Die Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff	145
2.6.1	Explosionsgrenzen von Wasserstoff	148
2.6.2	Praktische Anleitung zum Explosionsschutz	155
2.6.3	Vermeidung von Sicherheitsrisiken beim Einsatz von Wasserstoff als Energieträger	161
2.7	Enthalpieänderung chemischer Reaktionen	164
2.7.1	Standardzustände chemischer Reaktionen	164
2.7.2	Die Verbrennung von Wasserstoff	168
2.7.2.1	Spezifische Kenngrößen der Verbrennung	169
2.7.2.2	Die Abgaszusammensetzung	171
3	Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten	181
3.1	Die Investition	183
3.2	Die Kapitalwertmethode	186
3.2.1	Der diskontierte Cashflow	188
3.2.2	Sensitivitätsanalyse	191

4	Technologiepfade mit Wasserstoff	193
4.1	Die aktuelle Welt des Wasserstoffs	194
4.2	Die Sektorkopplung	201
4.3	Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland	206
4.4	Maßnahmen zur Wettbewerbsstärkung	215
4.5	Potential des Wasserstoffs zur Reduzierung der Treibhausgase	217
4.6	Der Entwicklungsstand der Wasserstofftechnologien	221
5	Die Erzeugung von Wasserstoff	225
5.1	Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Quellen	227
5.1.1	Die Dampfreformierung	228
5.1.2	Die partielle Oxidation	235
5.1.3	Die autotherme Reformierung	237
5.1.4	Kohle- und Biomassenvergasung	243
5.1.5	Carbon Dioxide Capture and Storage – die Verwahrung von Kohlendioxid im Untergrund	246
5.1.5.1	Grundlagen der Gasspeicherung im porösen Gestein	251
5.1.5.2	Die Verrohrung einer Bohrung	255
5.1.5.3	Betrieb und Überwachung von Kohlendioxid- speichern	257
5.1.5.4	Der Transport von Kohlendioxid	258
5.1.6	Die thermische Pyrolyse	259
5.2	Elektrolytische Verfahren zur Wasserstofferzeugung	262
5.2.1	Die elektrochemischen Grundlagen der Elektrolyse	264
5.2.2	Die Thermodynamik der Elektrolyse	267
5.2.2.1	Temperaturbereich bis 100 °C	269
5.2.2.2	Die Bedeutung der freien Enthalpie für die Elektrolyse	270
5.2.2.3	Der Hochtemperaturbereich bei der Wasserelektrolyse	275
5.2.3	Die Effizienz der Elektrolyse	277
5.2.4	Die Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM)	282
5.2.5	Die alkalische Elektrolyse (AEL)	288
5.2.6	Die Hochtemperaturelektrolyse (SOEC)	295
5.2.7	Zusammenfassung der Eigenschaften von Elektrolyseanlagen	301

5.3	Die biologische Wasserstoffherzeugung	302
5.3.1	Die Biophotolyse	303
5.3.2	Die mikrobielle Elektrolyse (MEC)	303
5.3.3	Die Fermentation	304
	5.3.3.1 Die Photofermentation	307
	5.3.3.2 Die dunkle Fermentation	308
5.4	Verfahren zur Wasserstoffreinigung	311
5.4.1	Methoden zur Wasserstoffaufbereitung	313
5.4.2	Besonderheiten bei der Membrantrennung	316
6	Der Transport von Wasserstoff	319
6.1	Leitungsgebundener Transport von Wasserstoff	319
6.2	Wasserstoffeinspeisung in Rohrleitungsnetze	329
6.3	Kompensation des Druckverlustes auf dem Transportsystem ...	335
6.4	Verwendung von nicht ortsfesten Transportbehältern	340
6.5	Liquid Organic Hydrogen Carrier	342
6.6	Die Odorierung des Wasserstoffs	345
7	Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff	351
7.1	Verdichter für die Kompression von Wasserstoff	351
	7.1.1 Kolbenverdichter	353
	7.1.2 Membranverdichter	362
	7.1.3 Turboverdichter	365
7.2	Gasmotoren und Gasturbinen in der zukünftigen Wasserstoffwelt	366
7.3	Expansionsanlagen in Wasserstofftransportsystemen	372
8	Die Verflüssigung von Wasserstoff	379
8.1	Die Grundlagen der Wasserstoffverflüssigung	380
8.2	Verflüssigungsprozesse	383
	8.2.1 Ergänzungen zum Verflüssigungsprozess	386
	8.2.2 Zur Energiebilanz des Verflüssigungsprozesses	389
9	Speicher für den Wasserstoff	395
9.1	Die untertägige Speicherung von Wasserstoff	398
	9.1.1 Geologische Voraussetzungen für die untertägige Wasserstoffspeicherung	399

9.1.2	Grundlagen der untertägigen Speicherung in Salzkavernen	401
9.1.3	Das Solverfahren von Salzkavernen	403
9.1.4	Gastechnische Ausrüstung von Speicherkavernen	406
9.1.5	Wasserstoff als Blanketmedium und als Speichergut ...	408
9.1.6	Kriterien für die Festlegung der Betriebsparameter ...	411
9.1.7	Die obertägigen Speicheranlagen	418
9.2	Wasserstoff in ortsfesten und beweglichen Druckbehältern ...	423
9.3	Die Speicherung von flüssigem Wasserstoff	427
9.4	Alternative physikalische Speicherverfahren	429
9.5	Stoffliche Wasserstoffspeicher	430
10	Anwendungen für Wasserstoff	435
10.1	Anwendungen im Industriesektor	435
10.1.1	Wasserstoff als Schlüssel zum klimaneutralen Stahl ...	436
10.1.2	Wasserstoff als Teil der Ammoniaksynthese	439
10.1.3	Wasserstoff wird zu Methanol	441
10.1.4	Wasserstoff für Prozesswärme in der metallverarbeitenden Industrie	442
10.2	Wasserstoff im Mobilitätssektor	442
10.2.1	Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr	443
10.2.2	Wasserstoff im Schienenverkehr	444
10.2.3	Wasserstoff im PKW-Bereich	447
10.2.4	Wasserstoff im Nutzfahrzeugbereich	450
10.2.5	Wasserstoff in Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen ...	451
10.2.6	Wasserstofftankstellen	453
10.3	Wasserstoff für Brennstoffzellen	457
10.3.1	Die Thermodynamik der Brennstoffzelle	457
10.3.2	Die Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC	459
10.3.3	Die alkalische Brennstoffzelle	464
10.3.4	Die phosphorsaure Brennstoffzelle	464
10.3.5	Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle	464
10.3.6	Die oxidkeramische Brennstoffzelle	465
10.4	Wasserstoff zur Umwandlung von Treibhausgasen	466
10.5	Wasserstoff in lokalen Netzen	472
10.5.1	Beurteilung der Wasserstoffversprödung	475
10.5.2	Der Einfluss der Odorierung auf die Wasserstoffreinheit	479
10.5.3	Rohrnetze als Energiespeicher für Wasserstoff	480

Literaturverzeichnis	489
Anhang A	499
1 Stoffdaten des n-Wasserstoffs	499
1.1 T, s -Diagramm	499
1.2 Realgaszahlen des n-Wasserstoffs	500
1.3 Spezifische Wärmekapazität	501
1.4 Isentropenexponent	501
1.5 h, s -Diagramm	502
1.6 Die Wärmeleitfähigkeit des n-Wasserstoffs	502
2 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte	503
3 Explosionsschutz	506
4 Verbrennung von Wasserstoff	507
5 Spezifische Energiekosten in der PKW-Mobilität	508
6 Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland	509
7 Daten zur Elektrolyse	510
8 Zur Verflüssigung von Wasserstoff	514
9 Zur Speicherung von Wasserstoff	515
10 Technische Regeln im Rahmen der Wasserstoffanwendungen ..	517
Anhang B: Einheiten und deren Umrechnungen	521
Anhang C: Formelzeichen und Einheiten	523
Anhang D: Abkürzungen und Eigennamen	531
Index	535