

Inhalt

Vorwort	XI
Die Autoren	XIII
1 Einführung	1
1.1 Das Interesse am Element Wasserstoff	1
1.1.1 Zielvorgaben der Politik	5
1.1.2 Strategien zur Einführung einer Wasserstoffwirtschaft ..	7
1.2 Wasserstoff im öffentlichen Diskurs der ökologischen Transformation	12
1.3 Der Inhalt dieses Buches	16
1.4 Die Form dieses 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 ..	29
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	58
2.2.7 Freiheitsgrade eines Wasserstoffsystems	62
2.2.8 Flüssiger und fester Wasserstoff	62
2.2.9 Viskosität des n-Wasserstoffs	64
2.2.10 Der Thomson-Joule-Effekt des Wasserstoffs	66
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	Gefährdungspotenziale für die Wasserstoffversprödung ..	104
2.5.2	Einschätzung des Gefahrenpotenzials für bestehende Stahlleitungen hinsichtlich Wasserstoffversprödung	113
2.5.3	Auslegung von Bauteilen gegen Wasserstoff induzierten Sprödbruch	116
2.5.3.1	Spannungs- und Verformungszustände in beanspruchten Bauteilen	118
2.5.3.2	Grundregeln zum Betrieb mit rissgefährdeten Bauteilen	122
2.5.3.3	Die Grenztragfähigkeit	123
2.5.3.4	Die spezifische Riss- oder Bruchenergie	127
2.5.3.5	Bruchmechanische Bewertung von Bauteilen unter quasistatischer Beanspruchung	130
2.5.3.6	Ermüdungsbruch unter Wasserstoffeinfluss	135
2.5.3.7	Bewertung von zyklischen Belastungen unter Wasserstoffeinfluss	140
2.5.3.8	Dauerfestigkeitsnachweis für Wasserstoff-Pipelinesysteme	142
2.6	Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff	144
2.6.1	Explosionsgrenzen von Wasserstoff	148
2.6.2	Praktische Anleitung zum Explosionsschutz	156
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	Verbrennung von Wasserstoff	169
2.7.2.1	Spezifische Kenngrößen der Verbrennung	169
2.7.2.2	Abgaszusammensetzung	171
3	Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten	181
3.1	Investition	183
3.2	Kapitalwertmethode	185
3.2.1	Diskontierter Cashflow	187
3.2.2	Sensitivitätsanalyse	191

4	Technologiepfade mit Wasserstoff	193
4.1	Die aktuelle Welt des Wasserstoffs	194
4.2	Sektorkopplung	198
4.3	Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland	202
4.4	Ausbau der Transportwege	208
4.5	Potenzial des Wasserstoffs zur Reduzierung der Treibhausgase..	212
5	Erzeugung von Wasserstoff	217
5.1	Erzeugung von Wasserstoff aus fossilen Quellen	219
5.1.1	Dampfreformierung	220
5.1.2	Partielle Oxidation	227
5.1.3	Autotherme Reformierung	229
5.1.4	Kohle- und Biomassenvergasung	234
5.1.5	Carbon Capture and Storage – die Verwahrung von Kohlendioxid im Untergrund	237
5.1.5.1	Grundlagen der Gasspeicherung im porösen Gestein	244
5.1.5.2	Verrohrung einer Bohrung	247
5.1.5.3	Betrieb und Überwachung von Kohlendioxid- speichern	248
5.1.5.4	Transport von Kohlendioxid	249
5.1.6	Die thermische Pyrolyse	252
5.2	Elektrolytische Verfahren zur Wasserstofferzeugung	255
5.2.1	Die elektrochemischen Grundlagen der Elektrolyse	257
5.2.2	Die Thermodynamik der Elektrolyse	260
5.2.2.1	Temperaturbereich bis 100 °C	261
5.2.2.2	Die Bedeutung der freien Enthalpie für die Elektrolyse	263
5.2.2.3	Der Hochtemperaturbereich bei der Wasserelektrolyse	266
5.2.3	Die Effizienz der Elektrolyse	268
5.2.4	Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM)	272
5.2.5	Alkalische Elektrolyse (AEL)	278
5.2.6	Hochtemperaturelektrolyse (SOEC)	285
5.2.7	Anionenaustauschmembran-Elektrolyse (AEM)	291
5.3	Biologische Wasserstofferzeugung	293
5.3.1	Biophotolyse	294
5.3.2	Mikrobielle Elektrolyse (MEC)	295

5.3.3	Fermentation	296
5.3.3.1	Photofermentation	299
5.3.3.2	Dunkle Fermentation	299
5.4	Verfahren zur Wasserstoffreinigung	302
5.4.1	Methoden zur Wasserstoffsaufbereitung	304
5.4.2	Besonderheiten bei der Membrantrennung	307
6	Transport von Wasserstoff	309
6.1	Leitungsgebundener Transport von Wasserstoff	309
6.2	Wasserstoffeinspeisung in Rohrleitungsnetze	319
6.3	Kompensation des Druckverlustes auf dem Transportsystem ...	324
6.4	Verwendung von nicht ortsfesten Transportbehältern	329
6.5	Liquid Organic Hydrogen Carrier	331
6.6	Transport von Wasserstoff in Ammoniak	334
6.7	Odorierung des Wasserstoffs	335
7	Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff	341
7.1	Verdichter für die Kompression von Wasserstoff	341
7.1.1	Kolbenverdichter	343
7.1.2	Membranverdichter	352
7.1.3	Schraubenverdichter	355
7.1.4	Turboverdichter	356
7.2	Gasmotoren und Gasturbinen in der zukünftigen Wasserstoffwelt	359
7.3	Expansionsanlagen in Wasserstofftransportsystemen	364
8	Verflüssigung von Wasserstoff	371
8.1	Grundlagen der Wasserstoffverflüssigung	372
8.2	Verflüssigungsprozesse	375
8.2.1	Ergänzungen zum Verflüssigungsprozess	378
8.2.2	Zur Energiebilanz des Verflüssigungsprozesses	380
9	Speicher für den Wasserstoff	385
9.1	Untertägige Speicherung von Wasserstoff	389
9.1.1	Geologische Voraussetzungen für die untertägige Wasserstoffspeicherung	389
9.1.2	Grundlagen der untertägigen Speicherung in Salzkavernen	391

9.1.3	Das Solverfahren von Salzkavernen	393
9.1.4	Gastechnische Ausrüstung von Speicherkavernen	395
9.1.5	Wasserstoff als Blanketmedium und als Speichergut	397
9.1.6	Kriterien für die Festlegung der Betriebsparameter	400
9.1.7	Obertägige Speicheranlagen	407
9.2	Wasserstoff in ortsfesten und beweglichen Druckbehältern	413
9.3	Speicherung von flüssigem Wasserstoff	416
9.4	Alternative physikalische Speicherverfahren	419
9.5	Stoffliche Wasserstoffspeicher	421
10	Anwendungen für Wasserstoff	425
10.1	Anwendungen im Industriesektor	425
10.1.1	Wasserstoff als Schlüssel zum klimaneutralen Stahl	426
10.1.2	Wasserstoff als Teil der Ammoniaksynthese	429
10.1.3	Wasserstoff wird zu Methanol	433
10.1.4	Wasserstoff für Prozesswärme in der metallverarbeitenden Industrie	434
10.2	Wasserstoff im Mobilitätssektor	434
10.2.1	Wasserstoff im öffentlichen Nahverkehr	435
10.2.2	Wasserstoff im Schienenverkehr	437
10.2.3	Wasserstoff bei Pkw und Zweirädern	439
10.2.4	Wasserstoff im Nutzfahrzeugbereich	441
10.2.5	Wasserstoff in Wasser-, Luft- und Raumfahrzeugen	443
10.2.6	Wasserstofftankstellen	446
10.3	Wasserstoff für Brennstoffzellen	449
10.3.1	Die Thermodynamik der Brennstoffzelle	450
10.3.2	Die Brennstoffzelle am Beispiel der PEMFC	451
10.3.3	Die alkalische Brennstoffzelle	455
10.3.4	Die phosphorsaure Brennstoffzelle	455
10.3.5	Die Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle	456
10.3.6	Die oxidkeramische Brennstoffzelle	456
10.3.7	Wasserstoff in Brennstoffzellen für grünen Ammoniak ..	457
10.4	Wasserstoff zur Umwandlung von Treibhausgasen	459
10.5	Wasserstoff in lokalen Netzen	465
10.5.1	Beurteilung der Wasserstoffversprödung	468
10.5.2	Einfluss der Odorierung auf die Wasserstoffreinheit	472
10.5.3	Rohrnetze als Energiespeicher für Wasserstoff	473
10.6	Wasserstoff im Wärmemarkt	481

Literaturverzeichnis	483
Anhang A	493
1 Stoffdaten des n-Wasserstoffs	493
1.1 <i>T,s</i> -Diagramm	493
1.2 Realgaszahlen des n-Wasserstoffs	494
1.3 Spezifische Wärmekapazität	495
1.4 Isentropenexponent	495
1.5 <i>h,s</i> -Diagramm	496
1.6 Wärmeleitfähigkeit des n-Wasserstoffs	496
2 Bruchmechanische Werkstoffkennwerte	497
3 Explosionsschutz	499
4 Verbrennung von Wasserstoff	501
5 Spezifische Energiekosten in der Pkw-Mobilität	502
6 Entwicklungsszenarien des Wasserstoffeinsatzes in Deutschland und in anderen Ländern	502
7 Daten zur Elektrolyse	504
8 Zur Verflüssigung von Wasserstoff	504
9 Zur Speicherung von Wasserstoff	506
10 Grüner Ammoniak	507
Anhang B: Einheiten und deren Umrechnungen	509
Anhang C: Formelzeichen und Einheiten	513
Anhang D: Abkürzungen und Eigennamen	521
Index	525