

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Eigenschaften des Wasserstoffs</b> .....	<b>15</b>
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
<b>3</b>	<b>Die Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten . . . . .</b>	<b>173</b>
3.1	Die Investition . . . . .	175
3.2	Die Kapitalwertmethode . . . . .	178
3.2.1	Der diskontierte Cashflow . . . . .	180
3.2.2	Sensitivitätsanalyse . . . . .	183
<b>4</b>	<b>Technologiepfade mit Wasserstoff . . . . .</b>	<b>185</b>
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
<b>5</b>	<b>Die Erzeugung von Wasserstoff .....</b>	<b>217</b>
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
<b>6</b>	<b>Der Transport von Wasserstoff .....</b>	<b>311</b>
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
<b>7</b>	<b>Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff .....</b>	<b>337</b>
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
<b>8</b>	<b>Die Verflüssigung von Wasserstoff .....</b>	<b>365</b>
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
<b>9</b>	<b>Speicher für den Wasserstoff .....</b>	<b>381</b>
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 Speicheranlagen .....	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
<b>10</b>	<b>Anwendungen für Wasserstoff .....</b>	<b>419</b>
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
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>449</b>
	<b>Anhang A: Übungsaufgaben .....</b>	<b>457</b>
	<b>Anhang B .....</b>	<b>477</b>
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
<b>Anhang C: Einheiten und deren Umrechnungen .....</b>		<b>495</b>
<b>Anhang D: Formelzeichen und Einheiten .....</b>		<b>497</b>
<b>Anhang E: Abkürzungen und Eigennamen .....</b>		<b>505</b>
<b>Index .....</b>		<b>509</b>