

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>Die Autoren</b> .....	<b>XIII</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
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
<b>2 Eigenschaften des Wasserstoffs</b> .....	<b>19</b>
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
<b>3</b>	<b>Wirtschaftlichkeit von Wasserstoffprojekten .....</b>	<b>181</b>
3.1	Investition .....	183
3.2	Kapitalwertmethode .....	185
3.2.1	Diskontierter Cashflow .....	187
3.2.2	Sensitivitätsanalyse .....	191

<b>4</b>	<b>Technologiepfade mit Wasserstoff</b> .....	<b>193</b>
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
<b>5</b>	<b>Erzeugung von Wasserstoff</b> .....	<b>217</b>
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 Wasserstoffaufbereitung	304
5.4.2	Besonderheiten bei der Membrantrennung	307
<b>6</b>	<b>Transport von Wasserstoff</b>	<b>309</b>
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
<b>7</b>	<b>Energiewandlungsmaschinen für Wasserstoff</b>	<b>341</b>
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
<b>8</b>	<b>Verflüssigung von Wasserstoff</b>	<b>371</b>
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
<b>9</b>	<b>Speicher für den Wasserstoff</b>	<b>385</b>
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
<b>10</b>	<b>Anwendungen für Wasserstoff .....</b>	<b>425</b>
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 metall- verarbeitenden 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

<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>483</b>
<b>Anhang A</b> .....	<b>493</b>
1 Stoffdaten des n-Wasserstoffs .....	493
1.1 $T,s$ -Diagramm .....	493
1.2 Realgaszahlen des n-Wasserstoffs .....	494
1.3 Spezifische Wärmekapazität .....	495
1.4 Isentropenexponent .....	495
1.5 $h,s$ -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
<b>Anhang B: Einheiten und deren Umrechnungen</b> .....	<b>509</b>
<b>Anhang C: Formelzeichen und Einheiten</b> .....	<b>513</b>
<b>Anhang D: Abkürzungen und Eigennamen</b> .....	<b>521</b>
<b>Index</b> .....	<b>525</b>



Der Verlag und die Autoren haben sich mit der Problematik einer gendergerechten Sprache intensiv beschäftigt. Um eine optimale Lesbarkeit und Verständlichkeit sicherzustellen, wird in diesem Werk auf Gendersternchen und sonstige Varianten verzichtet; diese Entscheidung basiert auf der Empfehlung des Rates für deutsche Rechtschreibung. Grundsätzlich respektieren der Verlag und die Autoren alle Menschen unabhängig von ihrem Geschlecht, ihrer Sexualität, ihrer Hautfarbe, ihrer Herkunft und ihrer nationalen Zugehörigkeit.