

<b>1</b>	<b>Energiewende und Wasserstoffwirtschaft</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1	Vision . . . . .	1
1.2	Motivation . . . . .	2
1.2.1	Bevölkerung, Energiebedarf und Ressourcen . . . . .	2
1.2.2	Emission, Immission und Gesundheit . . . . .	6
1.2.3	Treibhauseffekt, Klimaerwärmung und Umwelt . . . . .	7
1.3	Umsetzung . . . . .	10
1.3.1	Technologische Ansätze . . . . .	10
1.3.2	Elektromobilität . . . . .	12
1.3.3	Energiewende und Wasserstoffwirtschaft in Österreich . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Geschichtliches</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b> . . . . .	<b>45</b>
3.1	Vorkommen . . . . .	45
3.2	Thermodynamischer Zustand . . . . .	46
3.3	Stoffeigenschaften . . . . .	53
3.4	Chemische Eigenschaften . . . . .	55
3.4.1	Isotope . . . . .	55
3.4.2	Atomspin . . . . .	56
3.4.3	Spektrallinien . . . . .	58
3.5	Chemische Verbindungen . . . . .	58
3.5.1	Hydride . . . . .	59
3.5.2	Verbindungen mit Kohlenstoff . . . . .	61
3.5.3	Zerlegung von Wasserstoffmolekülen . . . . .	62
3.6	Verbrennung . . . . .	63
3.6.1	Bruttoreaktionsgleichung . . . . .	64
3.6.2	Chemisches Gleichgewicht . . . . .	66
3.6.3	Reaktionskinetik . . . . .	69

<b>4</b>	<b>Erzeugung</b> . . . . .	71
4.1	Übersicht . . . . .	71
4.2	Elektrolytische Spaltung von Wasser . . . . .	73
4.2.1	Grundlagen . . . . .	73
4.2.2	Elektrolysesysteme . . . . .	80
4.2.3	Power-to-Gas . . . . .	89
4.3	Reformierung . . . . .	91
4.3.1	Dampfreformierung . . . . .	92
4.3.2	Partielle Oxidation . . . . .	94
4.3.3	Autotherme Reformierung . . . . .	95
4.4	Vergasung . . . . .	95
4.5	Reinigung . . . . .	98
4.5.1	Reinigung der Ausgangsstoffe . . . . .	98
4.5.2	Reinigung des Endprodukts . . . . .	99
4.6	Direkte Spaltung von Kohlenwasserstoffen . . . . .	100
4.7	Chemische Spaltung von Wasser . . . . .	101
4.8	Biologische Herstellungsverfahren . . . . .	104
4.8.1	Enzyme der Wasserstoffherzeugung . . . . .	105
4.8.2	Photolyse . . . . .	105
4.8.3	Fermentation . . . . .	107
4.9	Wasserstoff als Nebenprodukt . . . . .	107
4.9.1	Chlor-Alkali-Elektrolyse . . . . .	107
4.9.2	Benzinreformierung . . . . .	108
4.9.3	Ethenproduktion . . . . .	108
<b>5</b>	<b>Speicherung und Transport</b> . . . . .	109
5.1	Übersicht . . . . .	109
5.2	Gasförmige Speicherung . . . . .	114
5.2.1	Verdichtung und Expansion . . . . .	115
5.2.2	Tanksysteme und Infrastruktur . . . . .	117
5.3	Flüssige Speicherung . . . . .	121
5.3.1	Verflüssigung und Verdichtung . . . . .	122
5.3.2	Tanksysteme und Infrastruktur . . . . .	126
5.4	Hybride Speicherung . . . . .	133
5.5	Speicherung in physikalischen und chemischen Verbindungen . . . . .	135
5.5.1	Physikalische und chemische Adsorption . . . . .	136
5.5.2	Chemische Absorption . . . . .	137
<b>6</b>	<b>Brennstoffzellen</b> . . . . .	141
6.1	Prinzip und Kenngrößen der Brennstoffzelle . . . . .	145
6.2	Typen von Brennstoffzellen . . . . .	153
6.3	Aufbau von Brennstoffzellen . . . . .	163

6.3.1	Einzelzelle	163
6.3.2	Zellstapel – Stack	166
6.3.3	Brennstoffzellensystem	168
6.4	Anwendung in der Fahrzeugtechnik	178
6.4.1	Antriebsstrangtypen	178
6.4.2	Fahrzeuge	179
6.5	Andere Anwendungen	189
6.5.1	Portable Brennstoffzellen	190
6.5.2	Ortsfeste Brennstoffzellen	191
6.5.3	Mobile Brennstoffzellen zu Wasser	194
6.5.4	Mobile Brennstoffzellen zu Luft	196
<b>7</b>	<b>Verbrennungsmotoren</b>	<b>199</b>
7.1	Relevante Stoffeigenschaften von Wasserstoff im Verbrennungsmotor	200
7.2	Einteilung und Gliederungsmerkmale	205
7.3	Wasserstoff-Betrieb mit äußerer Gemischbildung	209
7.4	Innere Gemischbildung bzw. Wasserstoff-Direkteinblasung	212
7.4.1	Verbrennungsverhalten bei Wasserstoff-Direkteinblasung	216
7.4.2	Ladungsschichtung	218
7.4.3	Verbrennungssteuerung	221
7.4.4	Verbrennung mit Selbstzündung	224
7.5	Fahrzeuge mit Wasserstoffmotor	225
7.6	Betrieb mit Gemischen aus Wasserstoff und Methan	237
7.6.1	Auswirkungen auf die Verbrennung	244
7.6.2	Betriebsstrategien	249
7.6.3	Aufbau eines Prototypenfahrzeugs	250
<b>8</b>	<b>Weitere Anwendungen</b>	<b>259</b>
8.1	Haber-Bosch-Verfahren	260
8.2	Hydrofining	262
8.3	Hydrocracking	262
8.4	Fischer-Tropsch-Verfahren	263
8.5	Methanolherstellung	264
8.6	Halbleiterindustrie	265
8.7	Analytische Chemie	265
8.8	Lebensmittelchemie	266
8.9	Wasseraufbereitung	266
8.10	Reduktion und Behandlung von Metallen	267
8.11	Schweißen und Schneiden	267
8.12	Energietechnik und Verkehrstechnik	268
<b>9</b>	<b>Werkstoffe, Recht und Sicherheit</b>	<b>271</b>

9.1	Werkstoffe . . . . .	271
9.2	Recht und Sicherheit . . . . .	274
9.2.1	Verordnungen und Richtlinien in der EU . . . . .	274
9.2.2	Die Genehmigung von Kraftfahrzeugen in der EU . . . . .	281
9.2.3	Normen und technische Regelwerke . . . . .	284
9.2.4	Vergleichender Brandversuch für Fahrzeugtanks . . . . .	286
9.2.5	Prüfstände für Wasserstoffanwendungen . . . . .	287
9.2.6	Sicherheit am HyCentA . . . . .	294
	<b>Literatur</b> . . . . .	<b>301</b>
	<b>Sachverzeichnis</b> . . . . .	<b>319</b>