

# INHALT

1	Einleitung: Rettet Wasserstoff das Klima? .....	14
2	Energieversorgung von der Steinzeit bis heute .....	18
2.1	Der Energiebedarf wächst .....	19
2.2	Heutige Energiequellen .....	21
2.2.1	Primärenergie: Bedarf und Quellen .....	21
2.2.2	Strom: Musterkind der Energiewende .....	23
2.2.3	Wärme: Seit Jahrzehnten kaum Bewegung .....	25
2.2.4	Mobilität: Verkehrswende kommt in Sicht .....	26
2.2.5	Sektorenkopplung: Alle zusammen statt jeder für sich .....	28
2.3	Grenzen der heutigen Energieversorgung .....	29
2.3.1	Treibhausgase und Klimawandel .....	29
2.3.2	Die Endlichkeit fossiler Brennstoffe .....	35
2.3.3	Schadstoffe und andere Umweltbelastungen .....	37
2.4	Ausweg Atomenergie? .....	42
2.5	Das richtige Timing: Speicher und Lastmanagement .....	44
2.6	Zukunftsszenarien für die Energiewende .....	48
2.7	Der Beginn der solaren Wasserstoffwirtschaft .....	51
2.8	Politische Wasserstoffstrategien .....	54
3	Wasserstoff und seine Eigenschaften .....	60
3.1	Eigenschaften .....	60
3.1.1	H <sub>2</sub> -Konfiguration .....	62
3.1.2	Wasserstoff im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen .....	63
3.2	Wasserstoff und Sicherheit .....	64
3.2.1	Knallgasreaktion .....	65
3.2.2	Materialwechselwirkungen .....	66
4	Gewinnung von Wasserstoff .....	70
4.1	Zukünftiger Wasserstoffbedarf .....	70
4.2	Herstellungsprozesse im Überblick .....	71
4.2.1	Die Elektrolyse: Hoffnungsträger für grünen Wasserstoff .....	71
4.2.2	Reformierung von Kohlenwasserstoffen .....	77
4.2.3	Pyrolytische Prozesse auf Basis fester Kohlenwasserstoffe .....	81
4.2.4	Methanpyrolyse: Ein Traum in türkis .....	82

4.2.5	Kværner-Verfahren .....	83
4.2.6	Biologische Herstellung: Von Natur aus grün .....	84
4.2.7	Dissoziation: Wasserstoff aus dem Solarturm .....	86
4.2.8	Methanhydrat: Wasserstoff aus der Tiefsee? .....	88
4.3	Reinigung .....	88
4.3.1	Anforderungen an die Reinheit .....	89
4.3.2	Wichtige Reinigungsverfahren im Überblick .....	90
4.4	Herstellungskosten .....	93
5	<b>Speicherung und Transport von Wasserstoff .....</b>	<b>98</b>
5.1	Gasförmiger Wasserstoff .....	99
5.1.1	Gasdruckbehälter .....	100
5.1.2	Transport mit Pipelines .....	102
5.1.3	Speicherung in Kavernen und porösem Gestein .....	104
5.1.4	Transport und Speicherung durch H <sub>2</sub> -Beimischung ins Gasnetz .....	107
5.1.5	Gasnetzeinspeisung per Methanisierung .....	108
5.2	Tiefkalter Wasserstoff (flüssig) .....	109
5.2.1	Kryogenbehälter .....	110
5.2.2	Transport von flüssigem Wasserstoff per Lkw oder Bahn .....	112
5.2.3	Transport von flüssigem Wasserstoff per Schiff .....	113
5.2.4	Pipelines für Flüssigwasserstoff .....	113
5.3	Wasserstoffspeicherung und -transport in Flüssigkeiten .....	114
5.3.1	Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC) .....	114
5.3.2	Flüssige Treib- und Kraftstoffe auf Basis von Wasserstoff (E-Fuels) .....	116
5.4	Speicherung von Wasserstoff in Festkörpern .....	118
5.4.1	Metallhydrid .....	118
5.4.2	Nanoröhrchen .....	122
6	<b>Tankstellen-Infrastruktur .....</b>	<b>124</b>
6.1	Aufbau eines Tankstellennetzes .....	124
6.2	Belieferung der Tankstellen .....	126
6.3	Fahrzeugbetankung .....	127
6.3.1	Betankung mit gasförmigem Wasserstoff .....	127
6.3.2	Betankung mit flüssigem Wasserstoff .....	128

7	Sicherheit .....	132
7.1	Vorsichtsmaßnahmen .....	132
7.1.1	Brand- und Explosionsverhalten .....	133
7.1.2	Maßnahmen im Brandfall .....	134
7.1.3	Atemwege und Hautkontakt .....	135
7.2	Unfallszenarien und Lerneffekte .....	135
7.2.1	Lkw-Unfälle .....	136
7.2.2	Pkw-Brandversuche .....	136
7.2.3	Lachenbildung und Verdampfung .....	137
8	Brennstoffzelle .....	140
8.1	Grundsätzliche Funktionsweise .....	142
8.2	Effizienz von Brennstoffzellen .....	146
8.3	Typen von Brennstoffzellen .....	148
8.3.1	PEM-Brennstoffzelle .....	148
8.3.2	Alkalische Brennstoffzelle (AFC) .....	151
8.3.3	Direkt-Methanol-Brennstoffzelle (DMFC) .....	152
8.3.4	Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC) .....	153
8.3.5	Schmelzkarbonat-Brennstoffzelle (MCFC) .....	154
8.3.6	Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC) .....	155
8.3.7	Festsäure-Brennstoffzelle (SAFC) .....	156
8.3.8	Mikrobielle Brennstoffzelle .....	156
8.4	Alternative Energieträger für die Brennstoffzelle .....	158
8.4.1	Methan (Erdgas, Biomethan, E-Methan) .....	158
8.4.2	Flüssiggas .....	158
8.4.3	Biogas, Klärgas & Co. ....	159
8.4.4	Methanol .....	160
8.5	Kosten von Brennstoffzellen .....	161
8.6	Chancen und Herausforderungen .....	162
9	Einsatzgebiete von Brennstoffzellen .....	166
9.1	Mikro und Mini .....	166
9.2	Portable Einheiten .....	167
9.3	Back-up-Systeme und Offgrid-Anwendungen .....	168
9.4	Hausenergieversorgung .....	169
9.5	Kraftwerksbetrieb .....	171

9.6	Fahrzeuge .....	173
9.6.1	Pkw .....	175
9.6.2	Lkw .....	178
9.6.3	Busse .....	180
9.7	Luftfahrt .....	183
9.8	Raumfahrt .....	188
9.9	Schifffahrt .....	188
10	Wasserstoffmotor .....	194
10.1	Funktion des Wasserstoffmotors .....	194
10.2	Eigenschaften des Wasserstoffmotors .....	195
10.3	Herausforderungen bei H <sub>2</sub> -Motoren .....	196
10.4	Umweltbilanz .....	198
10.5	Fahrzeuge mit H <sub>2</sub> -Motor .....	198
11	Wasserstoff für die Industrie .....	202
12	Katalytischer Brenner .....	206
13	Kosten der Wasserstofftechnologien .....	208
14	Fazit und Ausblick .....	212
15	Anhang .....	218
15.1	Abkürzungen .....	218
15.2	Einheiten/Formelzeichen .....	219
15.3	Elemente .....	219
15.4	Geschichte .....	220
15.5	Umrechnungstabelle Wasserstoff .....	226
15.6	Kennwerttabelle .....	227
15.7	LH <sub>2</sub> -Sicherheitsmaßnahmen .....	228
15.8	Literatur .....	230
15.9	Index .....	234
15.10	Autoren .....	238