

Inhaltsverzeichnis

Erster Teil. Grundlagen	1	
A.	Allgemeines	3
1.	Einführung in die Frage der Wasserstoffspeicherung	3
1.1	Speicherung in physikalisch gebundener Form	5
1.1.1	Hochdruckgasbehälter	5
1.1.2	Mikroglaskugeln	8
1.1.3	Flüssigwasserstoff	10
1.2	Speicherung in chemisch gebundener Form	13
1.2.1	Ammoniak	13
1.2.2	Organische Reaktionen	14
1.2.3	Wasser	17
1.2.4	Reversible Metall-Wasserstoff-Reaktionen (Metallhydride)	19
2.	Grundlagen der reversiblen Metallhydride	20
2.1	Theoretische Grundlagen der Konzentrations-Druck-Isothermen	22
2.2	Technologische Aspekte der Metallhydride	25
2.2.1	Einteilung der Hydride	26
2.2.1.1	Tieftemperaturhydride	27
2.2.1.2	Mitteltemperaturhydride	28
2.2.1.3	Hochtemperaturhydride	29
2.3	Hydride als Wärmespeicher	29
2.4	Einfluß der Kristall- und Elektronenstruktur auf die Hydridbildung	31
2.5	Die Kinetik der Wasserstoffreaktion mit Metallen	34
2.6	Der Einfluß von Fremdgasbeimengungen im Wasserstoff auf die Hydridbildung	37
2.6.1	Aktivierung der Hydridspeicher	37
2.6.2	Einfluß von Verunreinigungen	40
2.6.2.1	Adsorption (Physisorption)	41
2.6.2.2	Chemisorption	41
2.6.3	Experimentelle Ergebnisse	42
2.6.4	Verbesserung der selektiven Wasserstoffabsorption	45
2.7	Die Wärmeleitfähigkeit von Hydridspeichern	46
2.7.1	Experimentelle Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Hydriden	51

2.8	Zyklisierungsstabilität von Hydridspeichern	53
2.9	Sicherheitsaspekte von Hydridspeichern	57
2.10	Herstellung von Hydriden und Hydridbehältern	65
B.	Experimentelle Ergebnisse	67
2.11	Auswahl und Eigenschaften verschiedener Hydridsysteme	67
2.11.1	Das System Ti-Fe-H	71
2.11.1.1	TiFe-H	71
2.11.1.2	Ti ₂ Fe-H	73
2.11.2	Die Systeme Ti-Fe-Me-H	73
2.11.2.1	Ti-Fe-Mn-H	73
2.11.2.2	Ti-Fe-Zr-H	74
2.11.2.3	Ti-Fe-Cr-H	75
2.11.2.4	Ti-Fe-Al-H	78
2.11.2.5	Tendenzen der Hydrierfähigkeit der Systeme Ti-Fe-Me-H	78
2.11.3	Das System Ti-Ni-H	81
2.11.3.1	TiNi-H	81
2.11.3.2	Ti ₂ Ni-H	82
2.11.3.3	Die Interphasendiffusion des Wasserstoffs im System Ti ₂ Ni/TiNi	83
2.11.4	Das System Ti-Co-H	94
2.11.4.1	TiCo-H	95
2.11.4.2	Ti ₂ Co-H	95
2.11.5	Das System Ti-Mn-H	96
2.11.5.1	„TiMn“-H	97
2.11.6	Das System Ti-Cr-H	98
2.11.6.1	TiCr ₂ -H	98
2.11.6.2	TiCr _{2-x} Mn _x -H	99
2.11.7	Die AB ₅ -Hydride	101
2.11.7.1	LaNi ₅ -H	102
2.11.8	Das System Ca-Ni-H	103
2.11.9	Das System Mg-Ni-H	104
2.11.9.1	MgH ₂	104
2.11.9.2	Mg ₂ Ni-H	106
2.11.10	Die Systeme Mg-Me-H	107
2.11.10.1	Mg-Cu-H	108
2.11.10.2	Mg-Y-H	109
2.11.10.3	Mg-Al-H	109
Zweiter Teil. Anwendung in Fahrzeugen	111	
A.	Allgemeines	113
3.	Hydride als Wasserstoffspeicher für Kraftfahrzeuge	113
3.1	Einleitung	113
3.2	Allgemeines zur Wasserstofferzeugung aus Gas und Strom	115

3.2.1	Wasserstoff als Zusatzkraftstoff	116
3.2.2	Kleinanlagen zur Wasserstofferzeugung	117
3.2.3	Das All-Strom-Haus	118
3.2.3.1	Aufbau einer Elektrolyseanlage	120
3.2.4	Das All-Gas-Haus	126
3.2.4.1	Verwendung von Erdgas	127
3.2.4.2	Verwendung von Erdgas/Wasserstoff-Gemischen	129
3.2.4.3	Verwendung von Stadtgas	129
3.2.4.4	Abtrennung des Wasserstoffs aus Gasgemischen	130
3.3	Wasserstoffantrieb für Kraftfahrzeuge	133
3.3.1	Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff	133
3.3.2	Zweistoffbetrieb Wasserstoff-Benzin	139
3.3.3	Gasturbine	141
3.3.4	Brennstoffzelle und Elektromotor	141
3.4	Hydridspeichertechnologie für Kraftfahrzeuge	143
3.4.1	Hydridspeichertechnologie bei Daimler-Benz	146
3.4.1.1	Hydridspeicher mit äußerem Wärmetausch	150
3.4.1.2	Hydridspeicher mit innerem Wärmetausch	152
3.4.1.3	Hydridspeicher als Klimaanlage	156
3.4.1.4	Hochtemperaturhydridspeicher in Kraftfahrzeugen (Kombinationsspeicher)	159
3.4.1.5	Hydridspeicher als Standheizung	163
3.4.1.6	Hydride zur Abwärmespeicherung	164
3.4.2	Überblick über die Hydridspeicherung	165
3.4.3	Antriebssystem Hochtemperaturhydridspeicher und Verbrennungsmotor	165
3.4.4	Demonstrationsvorhaben von Wasserstofffahrzeugen mit Hydridspeichern	170
3.4.5	Betankung der Wasserstofffahrzeuge mit Hydridspeichern	173
3.4.5.1	Betankung von Tieftemperaturhydriden	174
3.4.5.2	Betankung von Hochtemperaturhydriden	178
3.4.5.3	Die Materialwechseltechnik	179
3.4.6	Einsatzmöglichkeiten für Wasserstofffahrzeuge mit Hydridspeicher	180
3.5	Vergleich von Wasserstoff- und Elektroantriebssystemen	182
B.	Experimentelle Ergebnisse	189
3.6	Auslegungsbeispiele verschiedener Hydridspeicher	189
3.6.1	Auslegungsbeispiel für einen Hydridspeicher mit innerem Wärmetausch	189
3.6.1.1	Überlegungen zur Gewichtseinsparung	192
3.6.2	Auslegungsbeispiel für abgasbeheizte Kombinationsspeicher	194
3.6.2.1	Der Aufbau eines Mg ₂ Ni-Speichers	196
3.6.2.2	Der Aufbau eines abgasbeheizten TiFe-Speichers	197
3.6.2.3	Testergebnisse	197

3.6.2.4	Testergebnisse mit einem abgasbeheizten TiZrCrMn-Speicher	200
3.6.3	Auslegung und Testergebnisse einer Hydridstandheizung	203
Dritter Teil. Sonstige Anwendungen 207		
A.	Allgemeines	209
4.	Metallhydride für die elektrochemische Energiespeicherung und -erzeugung (Hydridbatterien)	209
4.1	Elektrochemisches Verhalten von Metallhydriden	210
4.1.1	Metallurgie der Ti-Ni-H-Elektroden	211
4.1.2	Erhöhung der elektrochemisch reversiblen Wasserstoffdichte	212
4.1.3	Änderung der Bindungsenergie des Wasserstoffs im Kristallgitter	213
4.1.4	Passivierung der Ti-Ni-Legierungen	214
4.1.5	Zusammenfassung	214
4.1.6	Die TiNi-Starterbatterie	215
4.1.6.1	Belastbarkeitsverhalten	216
4.1.6.2	Zusammenfassung	217
5.	Hydridspeicher und Brennstoffzelle	218
5.1	Dezentrale Stromerzeugung mittels Wasserstoff/Luft-Brennstoffzelle	221
6.	Metallhydride als stationäre und mobile Wärmespeicher	223
6.1	Hydridwärmepumpen und -kältemaschinen (geschlossener Wasserstoffkreislauf)	224
6.1.1	Stationäre Hydridwärmepumpen	227
6.1.2	Hydridvorwärmheizung und -klimaanlage für Kraftfahrzeuge mit konventionellen Antriebssystemen	228
6.2	Stationäre Hydridwärmespeicher mit Wasserstoffverbrauch	230
7.	Weitere Anwendungsmöglichkeiten für Metallhydride	233
7.1	Der Hydridkompressor für Wasserstoff	233
7.2	Wasserstoffreinigung	234
7.3	Deuteriumanreicherung	235
8.	Ausblick: Das Wasserstoff-Hydrid-Energiekonzept	238
B.	Experimentelle Ergebnisse	242
9.	Optimierung von Hydridelektroden und einer Hydridwärmepumpe	242
9.1	Elektrochemische Testergebnisse im System Ti-Ni-H	242
9.1.1	Dotierung mit Fremdatomen	242
9.1.2	Testergebnisse dotierter Elektroden	243

9.1.3	Einfluß des Sauerstoffgehalts auf die Elektrodeneigenschaften	245
9.1.4	Einfluß der Entladungstiefe auf die Lebensdauer der Elektroden	246
9.1.5	Einfluß der Elektrolyttemperatur auf die Elektrodeneigenschaften	248
9.1.6	Einfluß der Elektrolytkonzentration auf die Elektrodeneigenschaften	251
9.1.7	Einfluß der Phasenanteile auf die Elektrodeneigenschaften	252
9.1.8	Elektrodenherstellung	253
9.1.8.1	Experimentelle Ergebnisse	254
9.2	Auslegung einer Hydridvorwärmheizung für Personenkraftwagen	259
	Literaturverzeichnis	263
	Sachverzeichnis	271