

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung..... I

Abstract..... III

1 Einleitung 1

2 Wasserstoffbedingte Schädigungen 3

2.1 Wasserstoffversprödung 5

2.2 Wasserstoffflocken 7

2.3 Fischeaugen 8

2.4 Pinholes..... 8

2.5 Wasserstoffblasen (Hydrogen Blistering) 10

2.6 Kaltrisse/Unterplattierungsrisse 11

2.7 Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion 13

2.8 SOHIC, SSC, SWC, HIC..... 14

2.9 Ausscheidung von Hydriden 15

2.10 Reaktion mit Legierungs- und Begleitelementen, Methanisierung..... 16

3 Theorien der Wechselwirkung Wasserstoff – Werkstoff..... 19

3.1 Drucktheorie 20

3.2 Dekohäsionstheorie (HEDE)..... 20

3.3 Entfestigung (HELP)..... 20

3.4 Erhöhung der Leerstellendichte (HESIV) 21

3.5 Adsorptionstheorie (AIDE) 21

4 Wasserstoff in verschiedenen Werkstofftypen..... 23

4.1 Stähle 23

4.1.1 Quellen für die Wasserstoffeinlagerung 23

4.1.2 Löslichkeit und Diffusionsgeschwindigkeit in Stählen..... 23

4.1.3 Ferritische Stähle..... 26

4.1.4 Austenitische Stähle 32

4.1.5	Martensitische Stähle	33
4.2	Zirkonium-Legierungen	34
4.3	Nickellegierungen	36
4.4	Titan und Titan-Legierungen	39
4.5	Messing	40
5	Potenzieller Einfluss von Wasserstoff auf verschiedene Komponenten	41
5.1	Betriebsbedingungen der Systeme	41
5.1.1	DWR-spezifische Systeme	41
5.1.2	SWR-spezifische Systeme.....	42
5.1.3	Kühlwassersysteme.....	42
5.2	Einfluss auf Brennelemente und Kernbauteile	42
5.2.1	Eingesetzte Werkstoffe	42
5.2.2	Bauteile aus CrNi-Stählen und Nickellegierungen.....	43
5.2.3	Bauteile aus Zirkonium-Legierungen.....	45
5.3	Einfluss auf Druckführende Komponenten	50
5.3.1	Eingesetzte Werkstoffe in deutschen Anlagen	50
5.3.2	Behälter und Rohrleitungen aus ferritischen Stählen	50
5.3.3	Behälter und Rohrleitungen aus austenitischen Stählen und Mischnähte	52
5.3.4	Schrauben und Muttern	53
5.4	Einfluss auf Behälter-Einbauten.....	53
5.4.1	Eingesetzte Werkstoffe	53
5.4.2	RDB-Einbauten.....	54
5.4.3	Dampferzeuger-Heizrohre und andere Wärmetauscherrohre	55
6	Betriebserfahrung mit wasserstoffbedingten Schädigungen	57
6.1	Deutsche Betriebserfahrung	57
6.1.1	Weiterleitungsnachrichten.....	57
6.1.2	Meldepflichtige Ereignisse	62
6.2	Internationale Betriebserfahrung.....	74

6.2.1	WLN 1990/10: Schäden an Steuerstabbführungsrohren.....	74
6.2.2	WLN 1990/12: Rissbefunde am RDB-Deckel, Unterplattierungsrisse.....	74
6.2.3	International Reporting System (IRS).....	75
6.2.4	Schadensuntersuchungen am Materials Ageing Institute.....	80
6.2.5	CODAP-Datenbank	81
6.3	Ausgewählte Beispiele.....	81
6.3.1	Unterplattierungsrisse im RDB von Tricastin-1.....	81
6.3.2	Ultraschallanzeigen im RDB von Doel-3 und Tihange-2.....	83
6.3.3	WLN 2016/05: Lösen eines Brennstabbündels vom Brennelementkopf... ..	86
7	Sicherheitstechnische Bedeutung für deutsche Anlagen	88
7.1	Druckführende Komponenten	89
7.1.1	Meldepflichtige Ereignisse in deutschen Anlagen	89
7.1.2	Sicherheitstechnische Bedeutung von Rissen im RDB	92
7.1.3	Unterplattierungsrisse im RDB.....	94
7.1.4	Wasserstofflocken im RDB	96
7.2	Brennelemente und Kernbauteile.....	100
7.2.1	Brennstabschäden in deutschen Anlagen.....	100
7.2.2	Bruch der Tragstruktur eines SWR-Brennelements	102
7.2.3	Schäden an Steuerstabbführungsrohren	105
7.3	Behälter-Einbauten	105
7.4	Sonstige Federn und Schrauben	106
7.5	Schlussfolgerungen für deutsche Anlagen im Leistungsbetrieb	107
8	Fortschreibung der Wissensbasis Komplnt	109
8.1	Allgemeine Fortschreibung der Wissensbasis.....	109
8.2	Erweiterungen in der AlmaMater.....	110
9	Zusammenfassung	113
	Literaturverzeichnis.....	117
	Abbildungsverzeichnis.....	135

Tabellenverzeichnis..... 135

Abkürzungsverzeichnis..... 137