

**Untersuchung zu Einflüssen von Werkstoff und  
Belastungsart auf die wasserstoffunterstützte Rissbildung  
von hochlegierten Stählen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

**DISSERTATION**

vorgelegt von

Christoph Münster

aus Elmshorn

Hamburg 2021

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	VI
Abstract .....	VIII
Danksagung .....	X
1 Einleitung und Zielsetzung .....	1
2 Kenntnisstand .....	3
2.1 Nichtrostende bzw. korrosionsträge Stähle .....	3
2.2 Einordnung von wasserstoffunterstützten Werkstoffschäden .....	6
2.3 Einflussgrößen der wasserstoffunterstützten Schäden .....	7
2.3.1 Wasserstoffkonzentration .....	8
2.3.1.1 Wasserstoffaufnahme .....	8
2.3.2 Gefügeeigenschaften: Wasserstofflöslichkeit und Wasserstofftransport, Degradation der mechanischen Eigenschaften (HAC-Empfindlichkeit) .....	9
2.3.2.1 Wasserstoffdiffusion und Wasserstofflöslichkeit im festen Metall/Stahl .....	9
2.3.2.2 Degradation der mechanischen Eigenschaften (Empfindlichkeit HAC) .....	15
2.3.3 Monotone und zyklische Beanspruchung .....	17
2.3.3.1 Monotone bzw. statische Zugbeanspruchung .....	17
2.3.3.2 Zyklische Beanspruchung .....	19
2.4 Mechanismen der wasserstoffunterstützten Werkstoffschädigung .....	25
2.5 Modelle zur Berechnung der wasserstoffunterstützten Rissbildung (bei Korrosionsreaktionen) .....	29
3 Ableitung der Aufgabenstellung .....	31
4 Experimentelles .....	33
4.1 Charakterisierung der Werkstoffe .....	33
4.1.1 Nomenklatur der untersuchten Stähle .....	33
4.1.2 Legierungszusammensetzung, mechanische Eigenschaften und Gefügestruktur .....	34
4.1.2.1 Stahl 1.4057 (X17CrNi16-2) .....	36
4.1.2.2 Stahl 1.4313 (X3CrNiMo13-4) .....	37
4.1.2.3 Stahl 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4) .....	38
4.1.2.4 Stahl 1.4016 (X6Cr17) .....	39

4.1.2.5	Stahl 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) .....	40
4.1.2.6	Stahl 1.3974 (X2CrNiMnMoNNb23-17-6-3).....	41
4.1.2.7	Stahl 1.4021 (X20Cr13) .....	42
4.1.3	Wärmebehandlung des 1.4021 (X20Cr13) .....	43
4.2	Monotone und zyklische Zugbeanspruchung.....	44
4.2.1	Zugversuche .....	46
4.2.2	SSRT-Untersuchungen (monotone Zugbeanspruchung).....	46
4.2.3	RSRT-Untersuchungen (zyklische Zugbeanspruchung) .....	49
4.3	Wasserstoffbeladung.....	51
4.4	Wasserstoffmessung .....	53
4.5	Ermittlung der charakteristischen Kennwerte zur Beschreibung der Degradation der mechanischen Eigenschaften bei Wasserstoffeintrag.....	54
4.6	Mechanisches Rechenmodell.....	55
5	Ergebnisse und Diskussion monotone Zugbeanspruchung (SSRT).....	58
5.1	Ergebnisse monotone Zugbeanspruchung (SSRT) .....	58
5.1.1	Mechanische Eigenschaften an Luftatmosphäre .....	59
5.1.2	Mechanische Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe bei Wasserstoffeinfluss (SSRT-Ergebnisse).....	61
5.1.2.1	Stahl 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	63
5.1.2.2	Stahl 1.4057 (X17CrNi16-2).....	74
5.1.2.3	Stahl 1.4016 (X6Cr17) .....	79
5.1.2.4	Stahl 1.3974 (X2CrNiMnMoNNb23-17-6-3).....	85
5.1.2.5	Stahl 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) .....	90
5.1.2.6	Stahl 1.4313 (X3CrNiMo13-4).....	95
5.1.2.7	Stahl 1.4021 QT (X20Cr13).....	100
5.1.2.8	Stahl 1.4021 (X20Cr13) abgeschreckter Gefügestand (Q) .....	105
5.1.2.9	Stahl 1.4021 (X20Cr13) zusätzlich angelassener Gefügestand (QT+T).....	108
5.1.3	Ergebnisse SSRT-Untersuchungen mit Vorspannung (1.4542).....	112
5.2	Diskussion Wasserstoffeinfluss bei monotoner Zugbeanspruchung .....	115
5.2.1	Betrachtung der Streuung der SSRT-Ergebnisse (monotone Zugbeanspruchung) .....	115
5.2.2	Temperatureinfluss monotone Zugbeanspruchung (SSRT).....	119

5.2.2.1	Stahl 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	120
5.2.2.2	Stahl 1.4057 (X17CrNi16-2).....	122
5.2.2.3	Stahl 1.4016 (X6Cr17) .....	123
5.2.2.4	Stahl 1.3974 (X2CrNiMnMoNNb23-17-6-3).....	125
5.2.2.5	Stahl 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) .....	126
5.2.2.6	Stahl 1.4313 (X3CrNiMo13-4).....	128
5.2.2.7	Stahl 1.4021 (X20Cr13) .....	129
5.2.2.8	Zusammenfassung Temperatureinfluss .....	131
5.2.3	Einfluss der Wasserstoffbeladungsstromdichte sowie des Wasserstoffangebotes im Elektrolyten bei monotoner Zugbeanspruchung.....	133
5.2.4	Einfluss der Vorspannung bei monotoner Zugbeanspruchung (SSRT).....	135
5.2.5	Werkstoffeinfluss bei monotoner Zugbeanspruchung (SSRT) unter Wasserstoffeinbringung.....	137
5.2.6	Einfluss des Wärmebehandlungszustands des Stahls bei monotoner Zugbeanspruchung (SSRT-Ergebnisse).....	141
6	Ergebnisse und Diskussion zyklische Beanspruchung .....	143
6.1	Ergebnisse Wasserstoffeinfluss bei zyklischer Zugbeanspruchung (RSRT- Ergebnisse) .....	143
6.1.1	Ergebnisse kraftgesteuerte zyklische Beanspruchung.....	143
6.1.1.1	Stahl 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	145
6.1.1.2	Stahl 1.4057 (X17CrNi16-2).....	151
6.1.1.3	Stahl 1.4016 (X6Cr17) .....	154
6.1.1.4	Stahl 1.3974 (X2CrNiMnMoNNb23-17-6-3).....	158
6.1.1.5	Stahl 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3) .....	162
6.1.1.6	Stahl 1.4313 (X3CrNiMo13-4).....	168
6.1.1.7	Stahl 1.4021 QT (X20Cr13).....	172
6.1.1.8	Stahl 1.4021 (X20Cr13) abgeschreckter Gefügestand (Q) .....	176
6.1.1.9	Stahl 1.4021 (X20Cr13) zusätzlich angelassener Gefügestand (QT+T).....	179
6.1.2	Ergebnisse Variation der Spannungsamplitude .....	182
6.1.3	Ergebnisse Variation der Belastungsfrequenz .....	184
6.1.4	Ergebnisse weggesteuerte zyklische Beanspruchung .....	185
6.2	Diskussion Wasserstoffeinfluss bei zyklischer Beanspruchung (RSRT).....	188

6.2.1	Temperatureinfluss bei zyklischer Beanspruchung (RSRT).....	188
6.2.1.1	Stahl 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	188
6.2.1.2	Stahl 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3).....	191
6.2.2	Einfluss Belastungsamplitude 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	193
6.2.3	Einfluss Belastungsfrequenz 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	194
6.2.4	Einfluss zyklische Belastungsart, spannungs- vs. dehnungsgesteuerte Versuche.....	195
6.2.5	Werkstoffeinfluss bei zyklischer Beanspruchung (RSRT).....	197
6.2.6	Einfluss der Wärmebehandlung bei zyklischer Zugbeanspruchung (RSRT).....	200
7	Diskussion monotone und zyklische Zugbeanspruchung bei Wasserstoffeinfluss .....	202
7.1	Vergleich von monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung bei Wasserstoffeinfluss .....	202
7.1.1	Stahl 1.4542 (X5CrNiCuNb16-4).....	202
7.1.2	Stahl 1.4462 (X2CrNiMoN22-5-3).....	204
7.1.3	Stahl 1.4016 (X6Cr17).....	206
7.1.4	Stahl 1.3974 (X2CrNiMnMoNb23-17-6-3).....	207
7.1.5	Stahl 1.4313 (X3CrNiMo13-4).....	209
7.1.6	Stahl 1.4057 (X17CrNi16-2).....	210
7.1.7	Stahl 1.4021 (X20Cr13).....	212
7.1.7.1	Stahl 1.4021 QT (X20Cr13).....	212
7.1.7.2	Stahl 1.4021 QT+T (X20Cr13).....	214
7.1.7.3	Stahl 1.4021 Q (X20Cr13).....	215
7.1.8	Zusammenfassung Vergleich monotone (SSRT) und zyklische (RSRT) Zugbeanspruchung .....	217
7.2	Werkstoffeinfluss .....	217
8	Ergebnisse und Diskussion mathematische Simulation.....	226
8.1	Einfluss der Oberspannung auf die Lebensdauer bis zum Anriss des 1.4542.....	226
8.2	Werkstoffeinfluss auf die die Lebensdauer bis zum Anriss .....	228
8.3	Einfluss der Wasserstoffstromdichte auf die Lebensdauer.....	230
8.4	Frequenzeinfluss auf die Lebensdauer.....	231
8.5	Einfluss der Fehler- bzw. Lochkorrosionsgeometrie auf die Lebensdauer .....	232
8.6	Zusammenfassung mathematische Simulation.....	234

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	235
10 Ausblick.....	243
Literaturverzeichnis .....	247
Abbildungsverzeichnis.....	265
Tabellenverzeichnis.....	283
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	285