

# **Zerstörende Werkstoffprüfung in der Schweißtechnik**

**von  
Ing. C. Pohle**

# Vorwort

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Historischer Überblick .....	1
1.2	Metallkundliche Grundlagen .....	2
1.2.1	Kristalliner Festkörper .....	2
1.2.2	Analytische Beschreibung des Raumgitters .....	3
1.2.3	Metallstrukturen .....	4
1.2.4	Legierungsstrukturen .....	6
1.2.5	Baufehlertheorie .....	7
1.3	Elastische und plastische Verformung .....	9
1.4	Wechselwirkungen von Versetzungen .....	11
1.5	Verhalten der Werkstoffe bei Beanspruchungen .....	12
1.5.1	Streckgrenzen-Erscheinung .....	12
1.5.2	Lüders-Dehnung .....	14
1.5.3	Reckalterung und Kaltverfestigung .....	14
1.5.4	Bauschinger-Effekt .....	15
1.5.5	Einfluß der Temperatur .....	16
1.5.6	Anisotropie und Textur .....	18
1.5.7	Einfluß der Prüfgeschwindigkeit .....	19
1.5.8	Einfluß von Kerben .....	19
1.5.9	Einfluß schwingender Beanspruchung .....	20
1.6	Riß- und Brucherscheinungen .....	20
1.6.1	Begriffsbestimmungen .....	20
1.6.2	Risse .....	21
1.6.3	Brüche .....	21
1.6.3.1	Verformungsbruch .....	22
1.6.3.2	Sprödbbruch .....	22
1.6.3.3	Schwingbruch .....	24
1.7	Festigkeithypothesen .....	25
1.7.1	Schubspannungshypothese .....	25
1.7.2	Gestaltänderungsenergiehypothese .....	25
1.7.3	Hypothese von H. M. Schnadt .....	25
1.7.4	Einfluß hoher Beanspruchungsgeschwindigkeit .....	27
1.8	Schweißbarkeit .....	28
1.9	Bescheinigungen über Werkstoffprüfungen nach DIN 50 049 .....	29
<b>2</b>	<b>Standard-Prüfverfahren</b> .....	<b>30</b>
2.1	Probenbeanspruchung .....	30
2.2	Zugversuch .....	30

2.2.1	Zugprobenform .....	30
2.2.2	Spannung-Dehnung-Diagramm .....	31
2.2.3	Reißfestigkeit und Trennfestigkeit .....	32
2.2.4	Kerbzugfestigkeit (Formzahl $\alpha_K$ ) .....	33
2.2.5	Zugversuche an Schweißverbindungen .....	34
2.2.6	Proben aus dem Schweißgut .....	36
2.2.7	Prüfen mit Mikrozugproben .....	36
2.3	Standversuch .....	37
2.3.1	Zeitstandversuch .....	38
2.3.2	Relaxationsversuch .....	39
2.4	Biegeversuch .....	40
2.4.1	Bauteilversuch .....	40
2.4.2	Biegeversuch an Proben aus Schweißverbindungen .....	41
2.5	Druckversuch .....	44
2.6	Torsionsversuch .....	44
2.7	Scherversuch .....	45
2.8	Schwingfestigkeitsversuche .....	45
2.8.1	Begriffe und Zeichen .....	46
2.8.2	Versuchsdurchführung .....	48
2.8.3	Wöhler-Versuch .....	49
2.8.4	Dauerfestigkeitsschaubilder .....	50
2.8.5	Low Cycle Fatigue .....	52
2.8.6	Einflüsse auf die Schwingfestigkeit .....	53
2.8.7	Einfluß der Beanspruchungsart und der Zugfestigkeit .....	54
2.8.8	Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen .....	55
2.8.9	Gestaltfestigkeit .....	58
2.8.10	Betriebsfestigkeit .....	59
2.8.11	Schadenslinie im Wöhler-Diagramm .....	62
2.8.12	Lebensdauer-Berechnung .....	62
2.9	Kerbschlagbiegeversuch .....	63
2.9.1	Versuchsdurchführung .....	64
2.9.2	Übergangstemperatur .....	65
2.9.3	Merkmale des Kerbschlagbiegeversuches .....	66
2.9.4	Einfluß der Probendicke .....	67
2.9.5	Vergleich der Prüfverfahren nach DIN, ASTM und ISO .....	69
2.9.6	Kerbschlagbiegeversuch an Proben aus Schweißverbindungen .....	69
2.10	Härteprüfung .....	74
2.10.1	Härteprüfung nach Brinell (DIN 50351) .....	74
2.10.2	Härteprüfung nach Vickers (DIN 50133) .....	76
2.10.3	Härteprüfung nach Rockwell (DIN 50103) .....	78
2.10.4	Verfahrensbedingte Einflüsse bei Härteprüfungen .....	79
2.10.5	Beziehungen zwischen Härte und Zugfestigkeit .....	80

2.10.6	Kleinlast- und Mikrohärteprüfung .....	81
2.10.7	Neuere Entwicklungen zur Bestimmung der Härte .....	84
2.10.8	Härteprüfung an Schweißungen .....	85
2.10.9	Ambulante Härteprüfung .....	89
2.10.9.1	Prüfzwinde .....	91
2.10.9.2	Poldi-Härteprüfgerät .....	91
2.10.9.3	Scherkraft-Härteprüfer, Modell „Ernst STE“ .....	92
2.10.9.4	COMPUTEST-Härteprüfgerät .....	92
2.10.9.5	Vickers-/TÜV-Härteprüfgerät 38 657 .....	93
2.10.9.6	EQUOTIP-Härteprüfgerät .....	93
2.10.9.7	MICRODUR-Härteprüfgerät .....	95
<b>3</b>	<b>Zähigkeitsprüfungen an Baustählen .....</b>	<b>96</b>
3.1	Einleitung .....	96
3.2	Kohäräzie-Prüfung .....	103
3.3	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch .....	104
3.4	Pellini-Probe (Drop-Weight-Test) .....	107
3.5	Kommerell-Probe (Aufschweißbiegeprobe) .....	108
3.6	Battelle Drop-Weight Tear Test (BDWT-Test) .....	110
3.7	Kerbzugproben .....	111
3.8	Scharfkerb-Biegeprobe .....	116
3.9	Weitere Probenformen .....	117
3.9.1	Bagsar-Probe .....	117
3.9.2	Kahn-Probe .....	117
3.9.3	Robertson-Probe .....	117
3.9.4	Esso-Probe .....	117
3.9.5	Double-Tension-Test .....	117
3.9.6	Van-der-Veen-Probe .....	118
3.9.7	Niblink-Probe .....	118
3.10	Schnellzerreiversuch .....	118
3.11	Explosionsversuche .....	119
3.12	Bauteilversuche (Full-Scale-Test) .....	120
3.12.1	Stahlhochbau .....	120
3.12.2	Apparatebau (Burstversuch) .....	121
3.12.3	Flachboden-Lagertanks .....	121
3.12.4	Rohrleitungsbau .....	122
3.13	Vergleich konventioneller Spröbruchprüfverfahren .....	122
3.14	Sicherheitskonzepte .....	124
3.14.1	Bruchanalyse-Diagramm nach Pellini – Fracture Analysis Diagram (FAD) .....	124
3.14.2	Gesamtdehnungs-Konzept nach Soete – Gross Section Yielding (GSY-Konzept) .....	125

<b>4</b>	<b>Bruchmechanik</b> .....	126
4.1	Einführung .....	126
4.2	Bruchmechanikkonzepte .....	126
4.3	Rißbeanspruchungsmodelle .....	129
4.4	Probenformen .....	131
4.5	Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM) .....	132
4.6	COD-Konzept .....	136
4.7	Konzept des J-Integrals .....	140
4.8	Schwingbruchmechanik .....	143
4.9	Prüfen von Schweißverbindungen .....	144
4.10	Vergleich bruchmechanischer Werkstoffkennwerte mit den Ergebnissen anderer Zähigkeitsprüfungen .....	147
4.11	Bruchmechanische Sicherheitskonzepte .....	150
4.11.1	Burdekin-Dawes-Design-Konzept / CTOD-Design-Curve-Approach .....	152
4.11.2	Kumar-German-Shih-Konzept / EPRI-Methode .....	152
4.11.3	CEGB-Defect-Assessment-Procedure / R6-Methode .....	153
4.12	Plastisches Grenzlaster-Konzept .....	154
<b>5</b>	<b>Spannungsanalyse und Bauteilverhalten</b> .....	155
5.1	Eigenspannungen .....	155
5.2	Geräte zur Spannungsermittlung .....	158
5.3	Verfahren zur Eigenspannungsermittlung .....	162
5.3.1	Zerlege-Verfahren .....	162
5.3.2	Bohrloch- und Fräsverfahren .....	163
5.3.3	Röntgenographisches Verfahren .....	165
5.3.4	Ultraschall-Verfahren .....	167
5.3.5	Magnetische Verfahren .....	167
5.4	Spannungsermittlung an Bauteilen .....	171
5.5	Traglastversuche, Bauteilversuche .....	172
5.5.1	Allgemeiner Stahlbau .....	173
5.5.2	Druckbehälter .....	173
5.5.3	Rohrleitungsbau .....	174
5.5.4	Maschinen- und Fahrzeugbau .....	175
<b>6</b>	<b>Prüfung der Heiß- und Kaltrißempfindlichkeit</b> .....	177
6.1	Beanspruchungsarten .....	177
6.2	Heißrißprüfung .....	177
6.2.1	Grundlagen .....	178
6.2.2	Heißzugversuch .....	181
6.2.3	HDR-Versuch .....	182
6.2.4	MVT-Versuch .....	183

6.2.5	Hakenrißprobe .....	185
6.2.6	Metallographischer Nachweis .....	185
6.2.7	Biegeprobe .....	186
6.2.8	PVR-Test .....	186
6.2.9	Vergleiche zwischen Heißrißprüfverfahren .....	187
6.3	Schädigende Wirkung des Wasserstoffes .....	187
6.3.1	Einleitung .....	187
6.3.2	Wasserstoff in Metallen .....	187
6.3.3	Wasserstoffschäden an Baustählen .....	191
6.3.3.1	Rißerscheinungen .....	191
6.3.3.2	Beispiele von Erscheinungsformen der Schädigung .....	191
6.3.3.3	Rißbildung durch Wasserstoff beim Schweißen .....	194
6.3.3.4	Rißentstehung und Rißausbreitung .....	195
6.3.3.5	Einfluß der Stahlreinheit .....	197
6.3.3.6	Charakteristika der allgemeinen Wasserstoffversprödung von Stählen .....	197
6.3.3.7	Wasserstoffbedingtes mikroskopisches Bruchbild .....	198
6.4	Kaltrißprüfverfahren .....	199
6.4.1	CTS-Test .....	200
6.4.2	Tekken-Test .....	201
6.4.3	Implant-Test .....	202
6.4.4	Bauteilversuch .....	203
6.4.5	RRC-Test .....	203
6.4.6	TRC-Test .....	204
6.4.7	GBOP-Probe .....	204
6.4.8	Aussagefähigkeit von Kaltrißprüfverfahren .....	204
6.5	Kohlenstoff-Äquivalent .....	205
6.6	Kaltrißsicherheitskonzepte .....	208
6.6.1	Stahl-Eisen-Werkstoffblatt 063 .....	209
6.6.2	British Standard 5135 .....	210
6.6.3	CRM-Methode aus Belgien .....	210
6.6.4	Konzept vom Institut de Soudure, Frankreich .....	210
6.6.5	Japanische Vorschläge .....	211
6.7	Anwendungsgrenzen der Kaltrißsicherheitskonzepte .....	212
6.8	Sonstige Proben zur Prüfung der Rißanfälligkeit .....	212
6.8.1	Lehigh-Probe .....	212
6.8.2	Fisco-Test .....	212
6.8.3	Ringsegment-Probe .....	213
6.8.4	Doppelkehlnahtprobe .....	213
<b>7</b>	<b>Anwendungsbezogene Prüfungen .....</b>	<b>214</b>
7.1	Schweißer-Handfertigkeitprüfungen .....	214
7.2	Fertigungsbeschichtungen .....	214

7.3	Betonstahl .....	216
7.4	Bolzenschweißungen .....	217
7.5	Punktschweißungen .....	217
7.5.1	Statische Beanspruchung .....	217
7.5.2	Schwingende Beanspruchung .....	218
7.5.3	Schlagartige Beanspruchung .....	218
7.5.4	Strukturanalyse .....	220
7.6	Rollennahtschweißung .....	220
7.7	Abtrennstumpf- und Reibschweißverbindungen .....	221
7.8	Längsnahtgeschweißte Rohre .....	223
7.9	Rohreinschweißungen .....	223
7.10	Auftragschweißungen, Plattierungen .....	226
7.10.1	Verschleißfeste Auftragschweißungen (Panzerungen) .....	226
7.10.2	Chemisch beständige Auftragschweißungen und Plattierungen .....	228
7.11	Terrassenbruch .....	229
7.12	Gealterte Stähle .....	232
7.13	Versprödung durch Gasaufnahme .....	237
7.14	Porenanfälligkeit umhüllter Stabelektroden .....	238
<b>8</b>	<b>Werkstoffanalyse .....</b>	<b>239</b>
8.1	Physikalische Prüfverfahren .....	240
8.1.1	Grundlagen .....	241
8.1.2	Röntgenstrukturanalyse .....	243
8.1.3	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) .....	244
8.1.4	Elektronenspektroskopie (Mikroanalyse) .....	245
8.1.4.1	Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDAX) .....	246
8.1.4.2	Wellenlängendispersive Röntgenspektroskopie (ESMA) .....	246
8.1.5	Oberflächenanalysen .....	246
8.1.5.1	Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES) .....	247
8.1.5.2	Sekundärionen-Massenspektroskopie (SIMS) .....	247
8.1.5.3	Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) .....	247
8.1.6	Absorptions- und Emissions-Spektroskopie .....	247
8.1.6.1	Atom-Absorption-Spektralanalyse (AAS) .....	247
8.1.6.2	Induktiv gekoppeltes Plasma-Verfahren (ICP) .....	247
8.1.7	Optische Emissions-Spektroskopie (OES) .....	248
8.2	Chemisch-physikalische Prüfverfahren .....	248
8.3	Naßchemische Analyse .....	249
8.3.1	Gravimetrie .....	249
8.3.2	Volumetrie (Titration) .....	249
8.4	Gasanalyse .....	249
8.5	Kohlenstoffbestimmung .....	249
8.6	Tüpfelanalyse .....	249

8.7	Schleiffunkenanalyse .....	250
8.8	Ferritbestimmung an austenitischen Schweißgütern .....	251
8.8.1	Grundlagen .....	251
8.8.2	Magne-Gage-Verfahren (Haftkraftmessung) .....	252
8.8.3	Permeabilitätsmessung .....	252
8.8.4	Metallographisches Bestimmungsverfahren .....	253
8.8.5	Rechnerische Bestimmungsverfahren .....	254
<b>9</b>	<b>Metallographische Prüfverfahren</b> .....	<b>256</b>
9.1	Probenentnahme und -bearbeitung .....	256
9.2	Makroschliffpräparation .....	256
9.3	Lichtmikroskopie .....	258
9.3.1	Qualitative Gefügeanalyse .....	258
9.3.2	Quantitative Gefügeanalyse .....	260
9.4	Elektronenmikroskopie .....	262
9.4.1	Durchstrahlungselektronenmikroskop (TEM) .....	262
9.4.2	Rasterelektronenmikroskop (REM) .....	263
<b>10</b>	<b>Prüfung der Korrosionsbeständigkeit</b> .....	<b>265</b>
10.1	Grundlagen der elektrolytischen Korrosion .....	266
10.2	Korrosionsarten .....	269
10.3	Korrosionsversuche .....	272
10.3.1	Korrosionsversuche ohne mechanische Beanspruchung .....	272
10.3.1.1	Flächenkorrosion .....	273
10.3.1.2	Mulden-, Loch- und selektive Korrosion .....	274
10.3.1.3	Prüfung auf Beständigkeit gegen interkristalline Korrosion .....	274
10.3.2	Korrosionsversuche mit zusätzlicher mechanischer Beanspruchung .....	276
10.3.2.1	Prüfung auf Beständigkeit gegen Spannungs- und Schwingungsrißkorrosion .....	276
10.3.2.2	NACE-Test .....	278
10.3.2.3	Maßnahmen zur Vermeidung von Spannungsrißkorrosion .....	278
<b>11</b>	<b>Schrifttum</b> .....	<b>279</b>
11.1	Buchveröffentlichungen .....	279
11.2	Sonstige Veröffentlichungen .....	282
<b>12</b>	<b>Sachwortverzeichnis</b> .....	<b>302</b>