

# Bruchmechanische Bewertung von Fehlern in Schweißverbindungen

## **Merkblatt DVS 2401 (August 2004)**

Ersetzt Merkblatt DVS 2401-1 (Oktober 1982)

Merkblatt DVS 2401-2 (April 1989)

Merkblatt DVS 2401-3 (August 1996)

### *Herausgeber:*

Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.,  
Ausschuss für Technik, Arbeitsgruppe „Berechnung und Gestaltung“

**Uwe Zerbst**, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht  
**Peter Hübner**, TU Bergakademie Freiberg

### *Unter Mitarbeit von:*

Brita Pyttel, TU Darmstadt

Ludvik Hodulak, IWM Freiburg

Gert Dehne, TU Magdeburg

## **Haftungsausschluss**

Das DVS-Merkblatt entspricht dem Stand der Technik.

Der Verlag, der DVS, die Verfasser und die beteiligten Fachleute erklären hiermit den Ausschluss jeder Haftung für Schäden, die aus der Anwendung des Merkblattes entstehen können.

Der Anwender hat zu entscheiden, ob das Merkblatt für seine Zwecke geeignet ist.

Seine Anwendung hat mit der erforderlichen Sorgfalt zu geschehen.

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	7
1.1	Konventionelle Qualitätssicherung und bruchmechanische Bauteilbewertung .....	7
1.2	Besonderheiten bei der bruchmechanischen Bewertung von Schweißnähten .....	9
1.2.1	Gefügeinhomogenität .....	9
1.2.2	Schweißeigenspannungen .....	13
1.2.3	Geometrische Imperfektionen .....	14
1.2.4	Festigkeits-Mismatch .....	14
1.2.5	Rissbildung .....	17
<b>2</b>	<b>Zerstörungsfreie Fehlergrößenbestimmung für die bruchmechanische Bauteilbewertung</b> .....	19
2.1	Fehler in Schweißverbindungen und Anforderungen an die zerstörungsfreie Prüfung .....	19
2.2	Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Schweißnähten .....	20
2.2.1	Oberflächenrissprüfung .....	20
2.2.2	Prüfung auf innenliegende Fehler .....	20
2.3	Aufbereitung der Fehlergeometrie .....	24
2.3.1	Idealisierung der Fehlergeometrie .....	24
2.3.2	Rissorientierung .....	24
2.3.3	Interaktion zwischen Rissen sowie zwischen Rissen und freien Oberflächen .....	25
2.3.4	Recharakterisierung von Rissen .....	25
2.3.5	Ausblick .....	26
<b>3</b>	<b>Bruchmechanische Bauteilbewertung bei statischer Beanspruchung</b> .....	27
3.1	Einführung .....	27
3.2	Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte an Schweißverbindungen .....	28
3.2.1	Repräsentativität der Laborproben .....	28
3.2.2	Besonderheiten aufgrund der Gefügeinhomogenität .....	30
3.2.3	Besonderheiten aufgrund der Schweißeigenspannungen .....	34
3.2.3	Besonderheiten aufgrund von Festigkeits-Mismatch .....	37
3.2.5	Behandlung von Pop-ins .....	44
3.2.6	Constraint-bedingte Geometrieabhängigkeit des Risswiderstandes .....	47
3.2.7	Statistische Aspekte .....	52
3.2.8	Erfassung des Temperatureinflusses .....	58
3.3	Analytische Verfahren zur Ermittlung der lokalen Beanspruchung im Bauteil .....	62
3.3.1	Übersicht .....	62
3.3.2	Der linear-elastische Spannungsintensitätsfaktor (K-Faktor) .....	72
3.3.2.1	Methoden zur Ermittlung von Spannungsintensitätsfaktoren .....	72
3.3.2.2	Besonderheiten der Ermittlung von K-Faktoren in Schweißverbindungen .....	74
3.3.2.3	K-Faktoren für Primär- und Sekundärspannungen .....	76
3.3.3	Fließlast und plastische Kollapslast rissbehafteter Bauteile .....	77
3.3.3.1	Definition .....	77
3.3.3.2	Die Ermittlung der Fließlast $F_Y$ .....	78
3.3.3.3	Lokale und globale Fließlast .....	79
3.3.3.4	Fließlastlösungen für Schweißverbindungen mit Festigkeits-Mismatch .....	79
3.4	Die europäische SINTAP-Prozedur .....	81
3.4.1	Prinzip der abgestuften Konservativität .....	81
3.4.2	FAD und CDF als komplementäre Bewertungsphilosophien .....	83
3.4.3	Eingangsgrößen und Modellparameter der SINTAP-Prozedur .....	86
3.4.3.1	Übersicht .....	86
3.4.3.2	Geometrie und Abmessungen des Bauteils .....	86
3.4.3.3	Bauteilbeanspruchung .....	88
3.4.3.4	Idealisierte Fehlerorientierung und -abmessungen .....	88
3.4.3.5	Eingangsgrößen aus dem Zugversuch .....	89
3.4.3.6	Spannungsintensitätsfaktor (K-Faktor) und Fließlast $F_Y$ des rissbehafteten Bauteils .....	91
3.4.3.7	Bewertungsfunktion $f(L_r)$ .....	91

3.4.3.8	Behandlung von Sekundärspannungen .....	91
3.4.4	Ergebnisse einer SINTAP-Analyse .....	96
3.4.5	SINTAP-Analyse-Ebenen: Basis und Standardebene (kein Festigkeits-Mismatch) .....	100
3.4.6	SINTAP-Analyse: Mismatchebene .....	103
3.4.7	Weitere Aspekte der Behandlung des Mismatch-Problems .....	109
3.4.8	Behandlung des Constraint-Effektes .....	112
3.5	Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsbeiwerte .....	113
3.6	Besondere Aspekte der Bruchmechanik-Analyse .....	118
3.6.1	Besonderheiten der Bruchmechanik-Analyse bei schlagartiger Belastung .....	118
3.6.2	Besonderheiten der Bruchmechanik-Analyse bei Mixed Mode .....	119
3.6.3	Anforderungen an den Analyseaufwand bei unterschiedlicher Ligamentplastifizierung .....	122
3.7	Die TWI-Entwurfskurve .....	123
<b>4</b>	<b>Bruchmechanische Bauteilbewertung bei zyklischer Beanspruchung .....</b>	<b>127</b>
4.1	Einführung .....	127
4.2	Spannungen und Spannungsintensitätsfaktoren bei schwingender Belastung .....	128
4.3	Phänomenologische Beschreibung des Ermüdungsrisswachstums .....	130
4.3.1	Die Risswachstumskurve (da/dN- $\Delta K$ -Kurve) .....	130
4.3.2	Risschließeffekt .....	131
4.3.3	Ansätze zur empirischen Beschreibung der Risswachstumskurve .....	132
4.3.4	Kurzrissswachstum .....	135
4.3.5	Rissspitzenparameter bei niederzyklischer Ermüdung (LCF) .....	138
4.3.6	Überlagerter Korrosionseinfluss .....	139
4.4	Berechnung der Restlebensdauer .....	140
4.4.1	Grundlegende Überlegungen .....	140
4.4.2	Lasteingangsgrößen .....	140
4.4.3	Lasteingangsgrößen bei Mixed-Mode .....	142
4.4.4	Bestimmung der Restlebensdauer .....	142
4.4.4.1	Konstante Lastamplitude .....	142
4.4.4.2	Variable Lastamplitude .....	144
4.4.5	Der Schwellenwert $\Delta K_{th}$ als Auslegekriterium? .....	153
4.4.6	Referenzdaten für die Kenngrößen der Risswachstumskurve .....	155
4.4.7	Modifiziertes Wöhlerkurven-Konzept bei Schweißverbindungen .....	158
4.4.8	Vereinfachte Bruchmechanik-Abschätzung für Standardschweißnähte nach den IIW-Empfehlungen .....	159
<b>5</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>162</b>
<b>6</b>	<b>Formelzeichen .....</b>	<b>179</b>
<b>7</b>	<b>Häufig gebrauchte Indizes .....</b>	<b>182</b>
<b>8</b>	<b>Häufig gebrauchte Abkürzungen .....</b>	<b>182</b>
<b>Anhang 1:</b>	<b>Behandlung inhomogener Werkstoffzustände im Rahmen der SINTAP-Version des VTT-Master-Curve-Ansatzes .....</b>	<b>183</b>
<b>Anhang 2:</b>	<b>Überblick über die wichtigsten Methoden der analytischen bruchmechanischen Bauteilbewertung .....</b>	<b>187</b>
<b>Anhang 3:</b>	<b>Prüfrichtlinien für Bruchmechanikennwerte .....</b>	<b>190</b>
<b>Anhang 4:</b>	<b>Klassifizierung der Bruchmechanikproben .....</b>	<b>193</b>
<b>Anhang 5:</b>	<b>K-Faktoren und Fließlastlösungen (Beispiele) .....</b>	<b>195</b>
<b>Anhang 6:</b>	<b>Spannungsüberhöhungen infolge Strukturimperfectionen .....</b>	<b>239</b>
<b>Anhang 7:</b>	<b>Spannungsüberhöhungen infolge der Schweißnahtgeometrie .....</b>	<b>243</b>
<b>Anhang 8:</b>	<b>Schweißeigenstressprofile (Beispiele) .....</b>	<b>248</b>
<b>Anhang 9:</b>	<b>Tabellen der Interaktionsfunktion <math>\Psi</math>, <math>\phi</math> und <math>\xi</math> .....</b>	<b>256</b>
<b>Anhang 10:</b>	<b>Fließlastlösungen bei Festigkeits-Mismatch (Beispiele) .....</b>	<b>262</b>
<b>Glossar</b>	<b>.....</b>	<b>271</b>