

4. Experimentelle Untersuchungen

Zur Gewinnung zusätzlicher Informationen für die bruchmechanische Bewertung auflösbarer und nicht auflösbarer Gruppenanzeigen wurden weitere Proben von drei neuen Ausschusswellen untersucht. Diese wurden in den 90iger Jahren, d. h. mit modernen Erschmelzungsverfahren hergestellt. Eine Zusammenstellung der jeweiligen Fertigungstechnologie und der Werkstoffeigenschaften der Schmiedestücke sind in den Vorprüfungszeugnissen enthalten, Anhang 4.1-4.3.

Die Ultraschallprüfungen wurden sowohl manuell von den Schmiedestückherstellern als auch computergestützt mit mechanisierten Anlagen von ALSTOM Energie GmbH, Nürnberg und von Saarschmiede GmbH, Völklingen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Ultraschallprüfungen sind in Tabelle 4.1 zusammengestellt. Die Gruppenanzeigen lagen jeweils in der Kernzone der Wellen vor. Die Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen den durchgeführten manuellen und automatisierten Ultraschallprüfungen sind sehr gut.

Wellenart	Code	Manuelle US-Prüfung	Automat. US-Prüfung TUROMAN TOMOSCAN	Automat. US-Prüfung TUROMAN FOCUS-Array
Generator Welle	BS	GA/GN KSR =2-2,8 mm	GA/GN KSR =2-2,5 mm	GA/GN KSR =2-2,8 mm
Turbinen- Welle	G1	GA KSR =1,3-1,6 mm	GA KSR =1,3-1,7 mm	-
Turbinen- Welle	G2	GA/GN KSR =<1,8-3,0 mm	-	-
Wellenart	Code	Automat. US-Prüfung SCAN-MASTER	Automat. US-Prüfung Compas-Array	Automat. US-Prüfung Saphir, Phased Array
Generator Welle	BS1	GA/GN KSR =2,1-2,9 mm	GA/GN KSR =2,1-2,9 mm	-
Turbinen- Welle	G1	GA KSR =1,3-1,7 mm	-	-
Turbinen- Welle	G2	GA/GN KSR =1,5-3,3 mm	-	GA/GN KSR =1,5-2,8 mm

Tabelle 4.1: Ultraschallergebnisse der Wellen BS, G1 und G2

Die Lagen und Größen der mit Fehlstellen behafteten Zonen werden in den nachfolgenden Kapiteln einzeln dargestellt.

Der Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen lag in der Durchführung und Auswertung von Zugschwellversuchen und Schleuderversuchen an Proben mit Gruppenanzeigen. Dabei wurden Versuche an 500 mm bis 800 mm langen Zugschwellproben mit einem Schaftdurchmesser von 70 mm und einem Einspanngewindedurchmesser von 120 mm sowie an einer Schleuderprobe mit dem Außendurchmesser von 145 mm durchgeführt. Mit dem Schleuderversuch sollte ein experimenteller Nachweis über das Risswachstumsverhalten von Gruppenanzeigen unter mehrachsiger Beanspruchung, wie sie bei Turbinenwellen vorliegen, erbracht werden. Als Versuchswerkstoffe wurden Turbinenwellenstähle der Werkstoffsorte 1%Cr von verschiedenen Herstellern eingesetzt. Neben dem Werkstoff 26NiCrMoV14-5 (BS) wurden ebenso Proben aus dem Werkstoff 30CrMoNiV5-11 (G1, G2) geprüft.

4.1 Werkstoffcharakterisierung

Die chemischen Zusammensetzungen der verwendeten Werkstoffe sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Probe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	H2
BS	0,26	0,09	0,23	0,004	0,001	1,75	3,64	0,43	-
G1	0,29	0,09	0,68	0,007	0,002	1,3	0,68	1,02	-
G2	0,29	0,09	0,74	0,007	0,002	1,3	0,66	1,02	1,1
Probe	V	Cu	Al	Ti	N	Nb	Sn	As	Sb
BS	0,12	0,11	0,009	-	-	-	0,01	0,009	-
G1	0,282	0,16	0,005	0,0001	0,0062	0,001	0,009	0,0177	0,0033
G2	0,292	0,14	0,005	0,0002	0,0041	0,001	0,008	0,0116	0,0023

Tabelle 4.2: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe in Gewichts-%

Die mechanischen Kennwerte, siehe Tabelle 4.3, wurden aus Zugversuchen bzw. Kerbschlagbiegeversuchen ermittelt.

Probe	T /°C	R _{p0,2} /MPa	R _m /MPa	A ₅ /%	Z /%	Kerb- Form	K _{v1} /J	K _{v2} /J	K _{v3} /J
BS									
T1	RT	782	881	19,7	70	V	167	179	188
T2	RT	822	916	19,1	71	V	176	177	177
G1									
Kopf	RT	580	726	20	66	V	167	132	150
Fuß	RT	579	727	21	69	V	175	171	180
G2									
Kopf	RT	602	737	20	68	V	180	169	168
Fuß	RT	606	734	21	71	V	173	167	172

Tabelle 4.3: Mechanische Kennwerte der untersuchten Werkstoffe, tangentielle Randproben

4.2 Vorgehensweise experimenteller Untersuchungen

Nach einer ersten Ultraschalluntersuchung (US I) an der BS-Welle wird in geeigneten Fehlergebieten ein Bohrkern entnommen. Zur Festlegung der Probenlage und -form wird an dem Bohrkern eine weitere US-Prüfung (US II) vorgenommen. Basierend auf diesen Ergebnissen erfolgt die Probenfertigung, wobei sich die Bereiche mit Gruppenanzeigen in der Probenmitte befinden. Bild 4.1 zeigt die Entnahme der BS1-Großprobe.

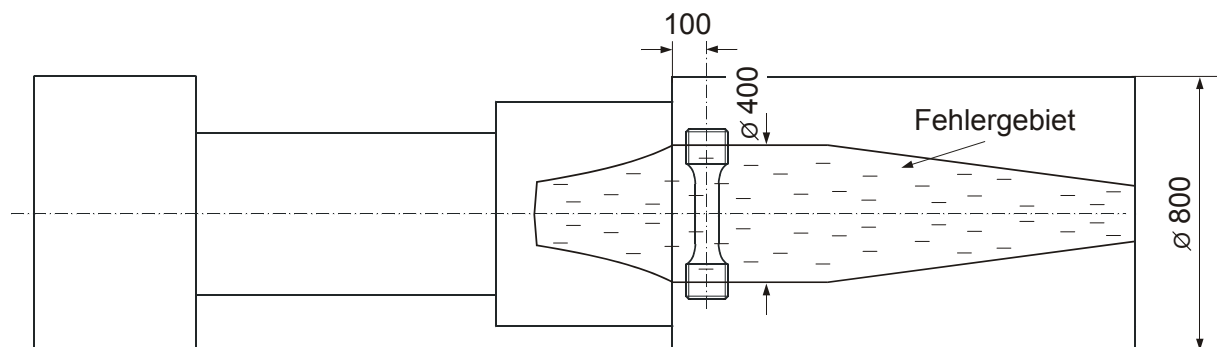


Bild 4.1: Entnahmeplan der BS1-Probe, l=500 mm, Schaftdurchmesser: 70 mm, Werkstoff 26NiCrMoV14-5

Als eigentliche Referenzprüfung vor der Belastung erfolgt dann eine weitere US-Prüfung (US III) an der endgültigen Probenform der Großprobe, die als Vergleich für

die nachfolgenden Untersuchungen bei dem Zwischenausbau und nach Beendigung des Versuchs dient.

Auswertung des Zugschwellversuchs

Nach Beendigung des Zugschwellversuchs wird die Probe unter flüssigem Stickstoff bei etwa -150 °C aufgebrochen und sowohl fraktographisch als auch metallographisch untersucht. Damit ist eine Beschreibung des Schädigungsablaufs, der durch die Fehlstellen ausgelöst wurde und die Ermittlung der Größe und Lage der Gruppenfehler möglich. Ein schematischer Ablaufplan der versuchsbegleitenden Untersuchungen ist in Bild 4.2 dargestellt.

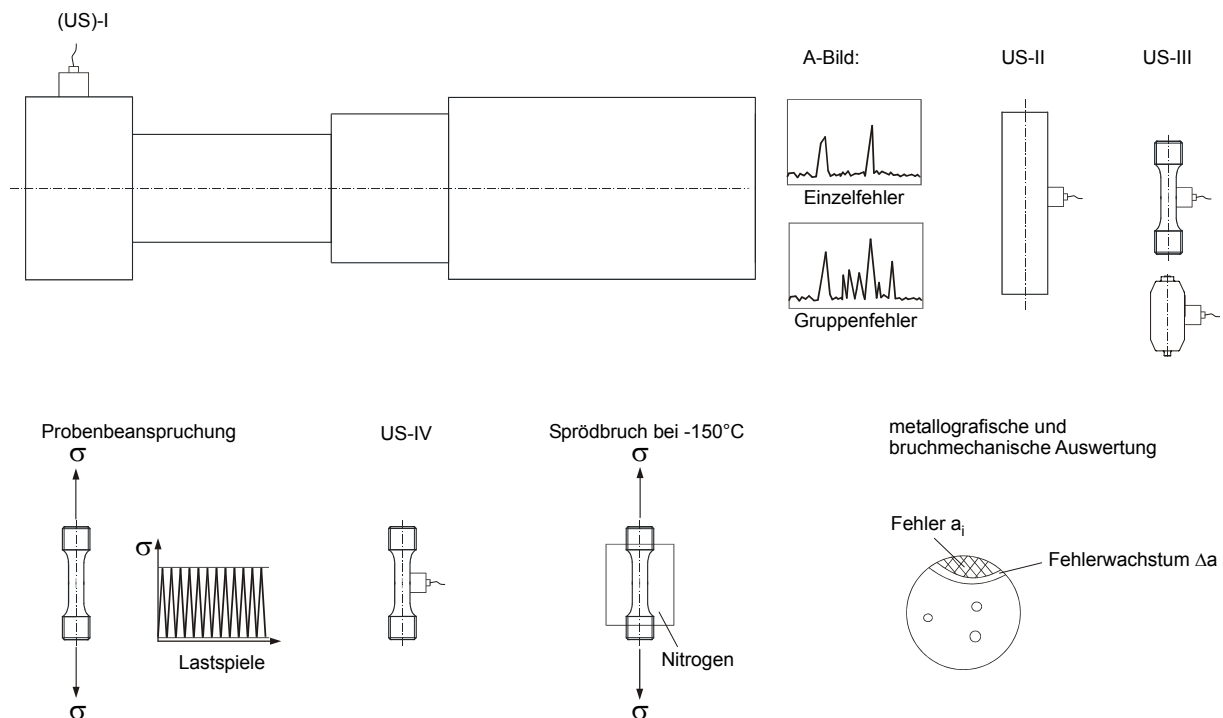


Bild 4.2: Vorgehensweise experimenteller Untersuchungen

Zur Beschreibung des Typs der Fehler (Innen-, Oberflächenfehler) sowie des Risswachstums und der Art des Versagens wurden die Bruchflächen in der Umgebung der Fehlstellen unter Verwendung des Rasterelektronenmikroskops analysiert. Damit ist es möglich, die Fehlergrößen zu bestimmen und eine bruchmechanische Bewertung der Fehlstellen durchzuführen.

4.3 Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung des Schmiedestücks BS und der Zugschwellprobe BS1

Wie in Tabelle 4.1 dargestellt, wurden am Schmiedestück BS auflösbare und nicht auflösbare Gruppenanzeigen (GA/GN) in der Größenordnung von 2-2,8 mm KSR in der Kernzone gefunden. Die Anzeigen verursachten eine Rückwandechoschwä-

chung von ca. 6 dB. Bei der Magnetpulverprüfung (MP) an der Ballenstirnfläche (Bild 4.1, rechte Stirnfläche) wurden eine Vielzahl von Anzeigen mit einer Länge von 1-2 mm ohne eine spezifische Richtungsorientierung ermittelt.

An der fertigbearbeiteten Zugschwellprobe wurden von den Stirnflächen aus mit einem Prüfkopf B2S-E Anzeigen GA/GN in der Größenordnung von 2 mm KSR gemessen. Bei der Magnetpulverprüfung an der Mantelfläche der Probe lagen zahllose Anzeigen mit einer Länge von ca. 1 mm ohne spezifische Richtungsorientierung vor.

Der mittlere Abstand der einzelnen Fehlstellen wurde aus der Echospitzenverteilung des A-Scans der Schmiedestückprüfung bei der TOMOSCAN-Prüfung mit ca. 5-10 mm abgeschätzt. Aufgrund der vorliegenden Schallschwächung konnten als mittlere Fehlerabstände 13 mm ermittelt werden. Die Auswertung der Befunde der Rissprüfung an der Mantelfläche der Zugschwellprobe hinsichtlich des Abstandes der größeren MP-Anzeigen ergab Abstände zwischen 3 und 10 mm. Der am häufigsten vorkommende Abstand ist etwa 5 mm.

4.4 Beschreibung des Versagensverhaltens der BS1-Probe

Die BS1-Probe (26NiCrMoV14-5) wurde bei Raumtemperatur bei einer Zugschwellbeanspruchung ($R = 0,1$) mit einer Oberspannung $\sigma = 685 \text{ MPa}$ geprüft. Die parallel durchgeführten zerstörungsfreien Prüfungen zeigten nach 10000 Lastwechseln noch keine Veränderungen. Nach 25000 Lastwechseln wies die magnetische Rissprüfung und die Ultraschallprüfung starke Veränderungen gegenüber der Ausgangsmessung auf, siehe Anhang 4.4-4.7. Dabei erhöhten sich die in der Ultraschallprüfung anfänglich ermittelten auflösbaren und nicht auflösbaren Gruppenanzeigen von KSR 2 mm auf KSR 3,5 mm. Neben den auflösbaren und nicht auflösbaren Gruppenanzeigen traten zusätzlich Einzelanzeigen auf. Die größeren MP-Anzeigen wiesen mittlere Längen von ca. 8 mm auf (Streuung zwischen 3 und 18 mm). Die MP-Anzeigen lagen zum Teil in enger Nachbarschaft treppenstufenartig zueinander versetzt (siehe Anhang 4.7). Die größte Gesamtanzeige an einer derartigen Anzeigenkonstellation erreichte ca. 37 mm. Diese MP-Anzeigen hatten alle eine Orientierung senkrecht zur Beanspruchungsrichtung. Die Probe wurde aufgrund dieses ZfP-Befundes nach 25000 Lastwechseln unter flüssigem Stickstoff aufgebrochen und fraktographisch und bruchmechanisch untersucht. Der Bruch der Probe erfolgte in der Ebene des MP-Anzeigenbereichs von ca. 37 mm (siehe Anhang 4.7).

Die Bruchfläche weist eine Vielzahl von kleinen Molybdän- und Aluminiumoxideinschlüssen in der Größenordnung zwischen $A_{\text{Fehler}} = 0,009 \text{ mm}^2$ und $A_{\text{Fehler}} = 0,61 \text{ mm}^2$ auf, siehe Bild 4.3. Besonders im oberen Teil der Bruchfläche sind viele kleine Bereiche festzustellen, die nach Beendigung des Versuchs zu einem

großen Fehler zusammengewachsen sind. Einen wesentlichen Schwerpunkt bildet die Prüfung der Fehlerbereiche hinsichtlich ihrer gegenseitigen Lage, Größe, Fehlerausbreitung sowie ihrer gegenseitigen Beeinflussung. Hierzu erfolgt die Auswertung der Bruchfläche durch eine gezielte Betrachtung kleiner signifikanter Ausschnitte innerhalb der gekennzeichneten Bereiche im Rasterelektronenmikroskop. Die nach Murakami berechneten Spannungsintensitätsfaktoren der planimetrierten Ausgangsfehlstellen liegen im Bereich von $\Delta K_{Ii} = 4,65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ und $\Delta K_{Ii} = 19,39 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Eine tabellarische Auflistung der berechneten Ausgangsspannungsintensitätsfaktoren der sieben Bereiche ist im Anhang 4.8 zusammengestellt. Der Schwellwert für Rissausbreitung für den Werkstoff 26NiCrMoV14-5 beträgt etwa $\Delta K_{I0} = 7,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (R=0,1; CT-Probe).

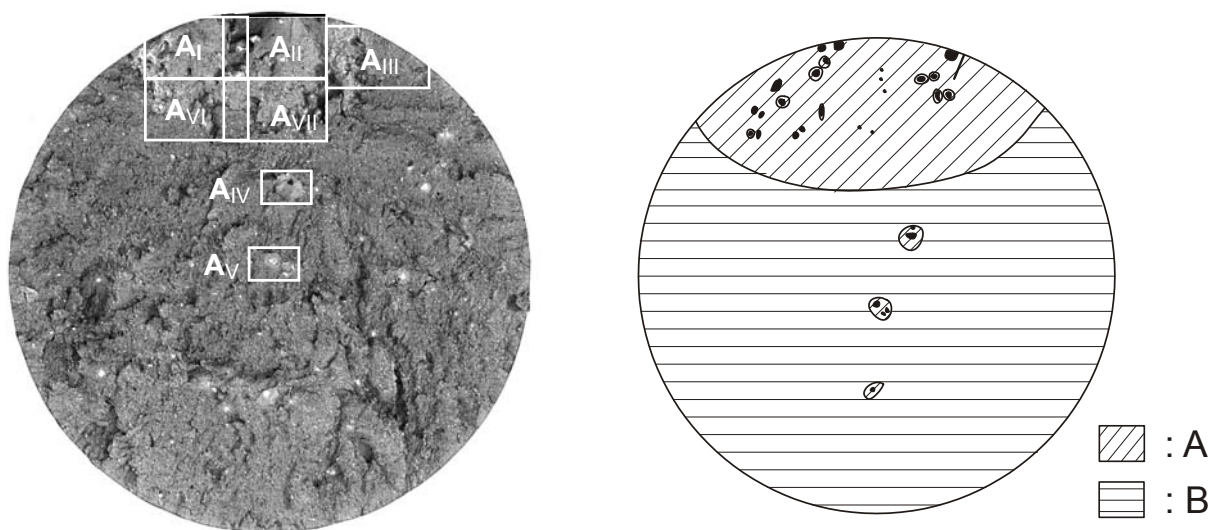


Bild 4.3: Übersicht der Bruchfläche ($\phi = 70 \text{ mm}$), BS1, Werkstoff 26NiCrMoV14-5
Bereich A: duktiler Bereich, Fehlstellen mit Risswachstum
Bereich B: spröder Bereich, vereinzelt kleine Fehlstellen

Dabei zeigt sich im Allgemeinen an denjenigen Fehlstellen örtliches Risswachstum, deren Spannungsintensitätsfaktoren oberhalb des Schwellwertes ΔK_{I0} liegen. Als Auslöser für das „große“ Risswachstum können die Oberflächenfehler 1 und 2 des Bereichs A_I , siehe Bild 4.4 und der Oberflächenfehler 6 des Bereichs A_{II} , siehe Bild 4.7 angesehen werden. Dies folgt auch durch die relativ großen Spannungsintensitätsfaktoren dieser Ausgangsfehlstellen ($\Delta K_{Ii} = 17,68 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $\Delta K_{Ii} = 16,95 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ und $\Delta K_{Ii} = 19,39 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) im Vergleich zu den restlichen innenliegenden Fehlstellen.

Zunächst werden die Fehlstellen des Bereichs A_I betrachtet. Die im Umfeld der Oberflächenfehler 1 und 2 liegenden Fehlstellen 3-18 zeigen teilweise örtliches Risswachstum. Diese lokalen Rissausbreitungen bewirken eine Schwächung des

Querschnitts, so dass das Wachstum der Fehler 1 und 2 des Bereichs A_1 vergleichsweise schnell verläuft. In Bild 4.5 ist das große Risswachstum des Fehlers 1 vergrößert dargestellt.

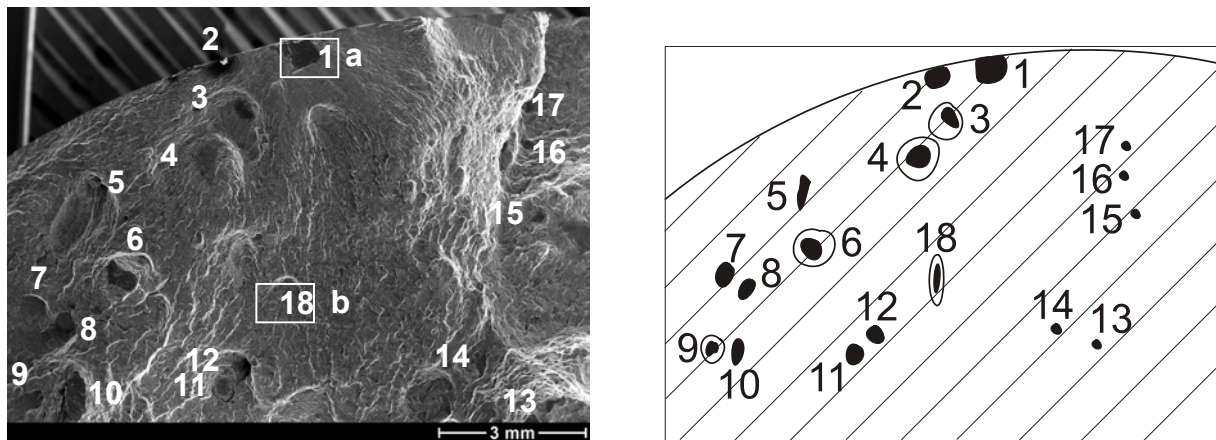


Bild 4.4: Fehlstellen des Bereichs A_1

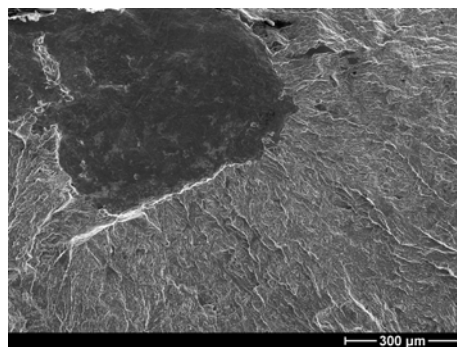


Bild 4.5: Fehlstelle des Bereichs A_1 (Ausschnitt a aus Bild 4.4)

Der Vorgang des Zusammenwachsens zwischen den „Auslösern“ und einer lokalen Fehlstelle ist besonders anschaulich an der Fehlstelle 18 erkennbar, siehe Bild 4.6.

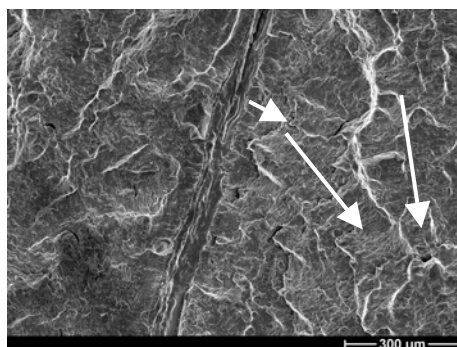


Bild 4.6: Örtliches Risswachstum des Fehlers 18 (Ausschnitt b aus Bild 4.4)

Zu dem Zeitpunkt, bei dem das vom Oberflächenfehler 1 kommende Risswachstum die kleinere Fehlstelle erreicht, wird deren örtliches Wachstum beendet. Es erfolgt eine Vereinigung der kleinen Fehlstelle mit dem Ausgangsfehler.

Dieser Vorgang läuft ähnlich bei den anderen kleineren Fehlstellen ab, so dass sich ausgehend von den Oberflächenfehlern eine große Fehlerfront im Bereich A_I bildet.

In Tabelle 4.4 sind die Spannungsintensitätsfaktoren der Endabmessungen ΔK_{Ie} für Einzelfehlstellen mit Risswachstum im Bereich A_I dargestellt. Dabei ist jedoch nur ein kleiner Unterschied zwischen den einzelnen Spannungsintensitätsfaktoren $\Delta K_{Ie,brutto}$, $\Delta K_{Ie,netto}$ und $\Delta K_{Ie,netto-Summe}$ feststellbar. Ursache hierfür sind die im Vergleich zur gesamten Probenfläche kleinen Ausgangsfehlstellen. Die Mindestbruchzähigkeit wurde nicht experimentell bestimmt, sondern aus der Literatur nach [62] entnommen. Sie ist größer als die berechneten Spannungsintensitätsfaktoren und bestätigt, dass die Probe während des Versuchs nicht gebrochen ist.

Fehler	Typ	a_e / m/10 ³	c_e / m/10 ³	$\Delta K_{Ie,brutto}$ / MPa \sqrt{m}	$\Delta K_{Ie,netto}$ / MPa \sqrt{m}	$\Delta K_{Ie,netto-Summe}$ / MPa \sqrt{m}	$K_{Ic,RT}$ / MPa \sqrt{m}
1	III	großes RW					133 ^{*)}
2	III	großes RW					
3	I	0,3113	0,5661	15,50	15,51	15,67	
4	I	0,6226	0,7925	19,35	19,37	19,56	
6	I	0,4811	0,4811	15,27	15,27	15,43	
9	I	0,3697	0,6792	16,95	16,95	17,13	
18	I	0,0849	0,7584	9,87	9,88	9,98	

Tabelle 4.4: Spannungsintensitäten der Endabmessungen, Bereich A_I

^{*)}: aus Mindestwertkurve nach [62]

Neben dieser Fehlerfront des ersten Bereichs tritt in dem zweiten Bereich (A_{II}) eine weitere Fehlerfront auf, deren Auslöser wiederum ein Oberflächenfehler ist, siehe Bild 4.7. Ein Kennzeichen des Auslösers ist, dass dieser Fehler den größten Spannungsintensitätsfaktor $K_{Ii} = 19,39 \text{ MPa}\sqrt{m}$ aller Fehlstellen aufweist.

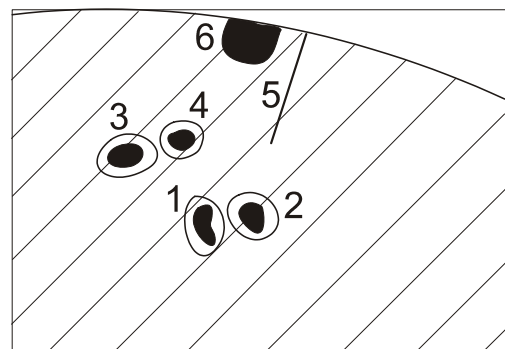
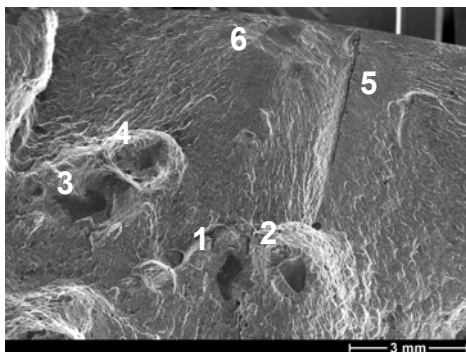


Bild 4.7: Fehlerbereich A_{II}

Der Oberflächenfehler 6 des Bereichs A_{II} zeigt ein gleichmäßiges und großes Risswachstum nach allen Seiten. Der etwas tiefergelegene Fehler 5 besitzt, wie auch aus dem kleinen Spannungsintensitätsfaktor zu schließen ist, kein Risswachstum. Die anderen Fehler 1-4 weisen kleine örtliche Risswachstumsraten ohne gegenseitige Beeinflussung auf. Das starke Risswachstum des Fehlers 6 überläuft zunächst den Fehler 5, anschließend die anderen Fehler. Auch hier bildet sich wie im ersten Bereich eine große Fehlerfront.

Die Spannungsintensitätsfaktoren der Endabmessungen im Bereich A_{II} $\Delta K_{Ie,brutto}$, $\Delta K_{Ie,netto}$ und $\Delta K_{Ie,netto-Summe}$ weisen auch hier nahezu gleiche Werte auf, siehe Tabelle 4.5. Die Mindestbruchzähigkeit für diesen Werkstoff [62] ist um ein Vielfaches höher als die berechneten Spannungsintensitätsfaktoren.

Fehler	Typ	a_e /m/10 ³	c_e /m/10 ³	$\Delta K_{Ie,brutto}$ /MPa√m	$\Delta K_{Ie,netto}$ /MPa√m	$\Delta K_{Ie,netto-Summe}$ /MPa√m	$K_{Ic,RT}$ /MPa√m
1	I	0,8113	1,0944	22,62	22,63	22,86	133
2	I	0,5661	0,8491	19,65	19,66	19,86	
3	I	0,7359	1,1321	22,60	22,64	22,84	
4	I	0,5095	0,7359	18,39	18,40	18,58	
6	III	großes	RW				

Tabelle 4.5: Spannungsintensitäten der Endabmessungen unter Verwendung der größten Einzelfehlstellen, Bereich A_{II}

Auch der Vergleich der einzelnen Nennspannungen (σ_{brutto} , σ_{netto} und $\sigma_{netto-Summe}$) in den Bereichen A_I und A_{II} zeigen keine großen Unterschiede, siehe Tabelle 4.6-4.7. Die Nennspannungen liegen im Bereich um 616 MPa und deutlich unterhalb der Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2}$.

Bereich	Typ	σ_{brutto} /MPa	σ_{netto} /MPa	$\sigma_{netto-Summe}$ /MPa	$R_{p0,2}$ /MPa
1	III	614,4			802
2	III				
3	I		616,5	622,9	
4	I		616,7		
6	I		616,5		
9	I		616,5		
18	I		616,5		

Tabelle 4.6: Vergleich der Nennspannungen, Bereich A_I

Bereich	Typ	σ_{brutto} /MPa	σ_{netto} /MPa	$\sigma_{\text{netto-Summe}}$ /MPa	$R_{p0,2}$ /MPa
1	I	614,4	616,9	622,9	802
2	I		616,7		
3	I		616,8		
4	I		616,6		
6	III				

Tabelle 4.7: Vergleich der Nennspannungen, Bereich A_{II}

Aufgrund der vielen kleinen Fehlergebiete innerhalb der Bereiche A_{III} , A_{VI} und A_{VII} ist der Werkstoff zusätzlich geschwächt, vgl. Bild 4.8a/b/c, so dass die beiden Fehlerfronten der Bereiche A_I und A_{II} sich nach und nach zu einer großen Fehlerfront vereinigen. Im Rasterelektronenmikroskop sind die Rastlinien durch die kleinen Fehlerstellen in den Bereichen A_{III} , A_{VI} und A_{VII} daher nicht so ausgeprägt wie in den Bereichen A_I und A_{II} .

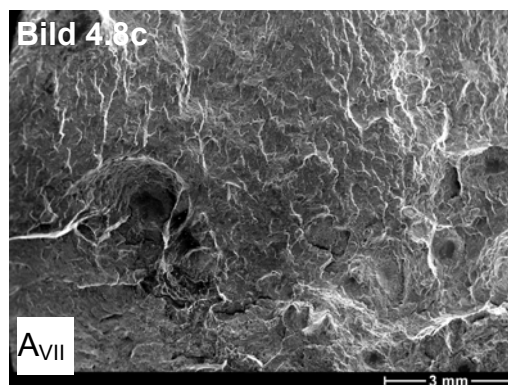
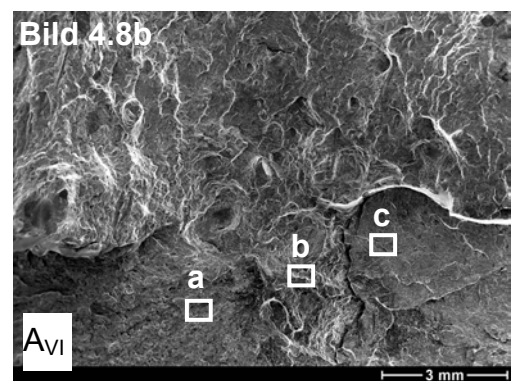
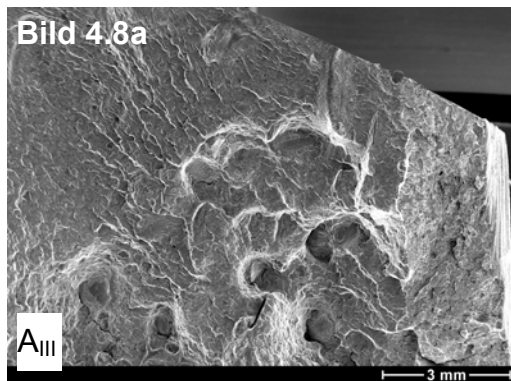


Bild 4.8a/b/c: Fehlerbereiche A_{III} , A_{VI} und A_{VII}

In den Bildern 4.8b und 4.8c ist der Übergang vom Verformungsbruch zur spröde aufgebrochenen Gewaltbruchfläche sichtbar. Eine genauere rasterelektronenmikroskopische Untersuchung des Bereichs A_{VI} weist drei verschiedene Gebiete auf. Das Erste ist ein Bereich (a) in dem etwa 50 % Fehlerfläche und 50 % spröde Anteile ent-

halten sind, das Zweite (b) ist ein reines Fehlergebiet, bei dem die Fehlstellen dicht nebeneinander liegen und das Dritte (c) zeigt eine reine Spröbruchfläche.

In der Probenmitte treten vereinzelt kleine Fehlstellen mit kleinem örtlichen Risswachstum auf. In der Regel ist keine Beeinflussung zwischen den Fehlstellen festzustellen. Typisch hierfür ist der Bereich A_V , siehe Bild 4.9. Eine genaue rasterelektronenmikroskopische Untersuchung zeigt, dass es sich dabei um Fehler handelt, die sich gegenseitig nicht beeinflussen. Im Bereich zwischen Fehler 1 und 3 konnte keine Interaktion nachgewiesen werden, so dass diese Fehler als Einzelfehler anzusehen sind.

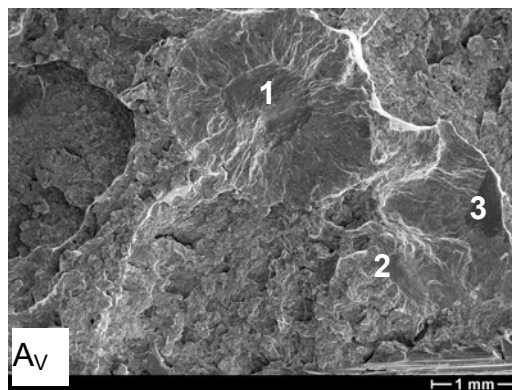


Bild 4.9: Fehlstellen mit Risswachstum ohne gegenseitige Beeinflussung (Bereich A_V)

Eine Ausnahme bildet jedoch der Bereich A_{IV} , siehe Bild 4.10. Hierbei ist zwischen zwei Fehlstellen eine Beeinflussung und damit ein Zusammenwachsen erkennbar. Ausgelöst wird die Interaktion durch den großen Fehler, dessen Risswachstum dominierend ist.

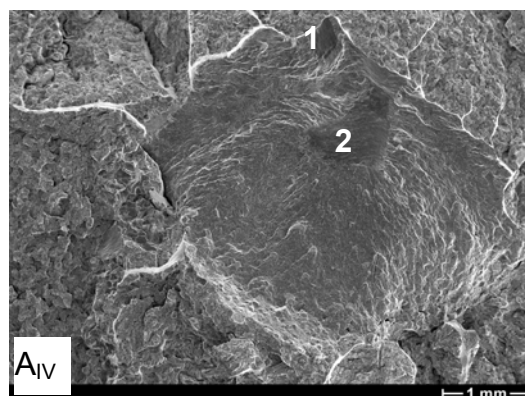


Bild 4.10: Fehlstellen mit Risswachstum (Bereich A_{IV})

In Bild 4.11 sind die im Rasterelektronenmikroskop bestimmten Risswachstumsraten aller Bereiche A_I - A_{VII} der Probe BS1 dargestellt und mit dem am Werkstoff

26NiCrMoV11-5 ermittelten Werten ($C = 6,62 \cdot 10^{-12} \text{m/LW}$, $n=2,93$, $\Delta K_I / \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) des Gesetzes von Paris verglichen. Dabei ist eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den rechnerischen Risswachstumsraten erkennbar.

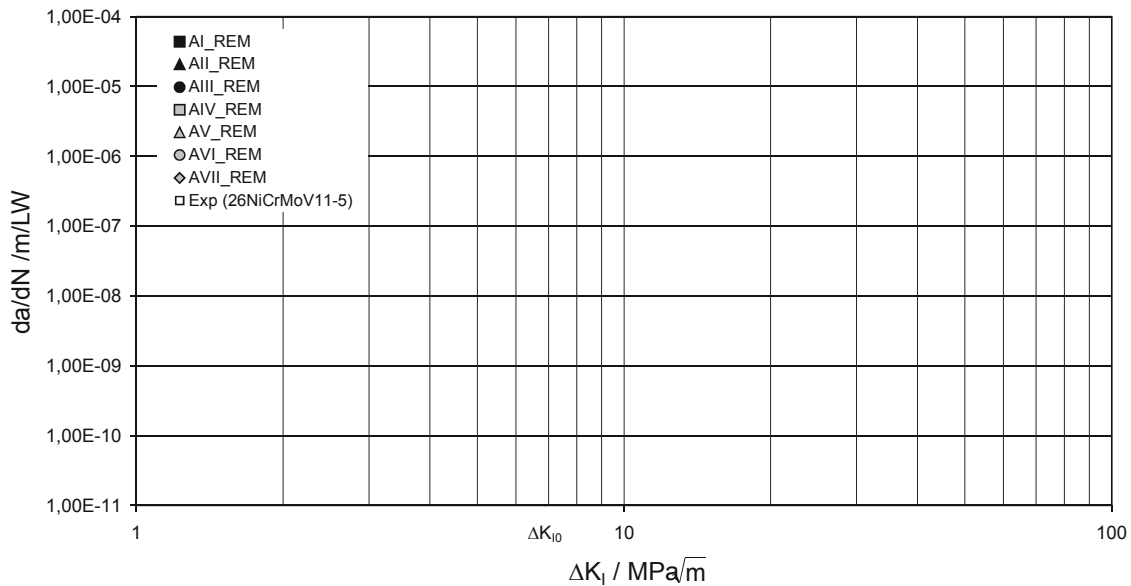


Bild 4.11: Darstellung der im Rasterelektronenmikroskop ermittelten Risswachstumsraten, Probe BS1, Werkstoff 26NiCrMoV14-5

Der beschriebene Versagensverlauf der BS1-Probe ist in **Bild 4.12** schematisch dargestellt. Dabei vereinigen sich ausgehend von den Oberflächenfehlern des Bereichs A_I zunächst die Fehlstellen innerhalb der Fehlerfront 1. Das örtlich an den Fehlstellen auftretende Risswachstum wird durch das im Vergleich zu den anderen Fehlstellen schneller ablaufende Risswachstum der Oberflächenfehler beendet. Parallel zu diesem Vorgang wachsen auf der gleichen Weise die Fehlstellen des Bereichs A_{II} zu einer Fehlerfront 2 zusammen. Auch hier ist als Auslöser wieder ein Oberflächenfehler ermittelbar, der die restlichen örtlichen Risswachstumsraten beendet. In einem nächsten Schritt vereinigen sich diese beiden Fehlerfronten zu einer gemeinsamen Fehlerfront.

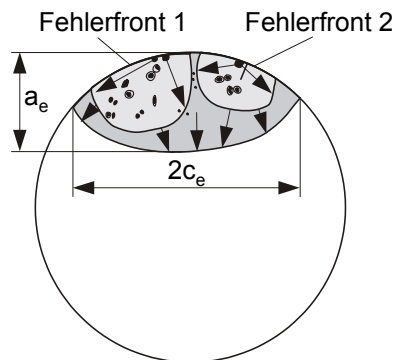


Bild 4.12: Schematischer Ablauf des Versagensvorgangs der BS1-Probe

Die Analyse der Endfehlergröße nach dem Aufbrechen der Probe in flüssigem Stickstoff ergibt eine Fläche mit den Halbachsen $a_e = 13,36 \text{ mm}$ und $c_e = 16,98 \text{ mm}$. Damit können die in Tabelle 4.8 dargestellten Spannungsintensitätsfaktoren für den gesamten Endfehler berechnet werden.

Bereich	Typ	a_e /m/10 ³	c_e /m/10 ³	$\Delta K_{Ie,brutto}$ /MPa \sqrt{m}	$\Delta K_{Ie,netto}$ /MPa \sqrt{m}	$\Delta K_{Ie,netto-Summe}$ /MPa \sqrt{m}	K_{Ic} /MPa \sqrt{m}
A _I -A _{VII}	III	13,36	16,98	96,39	106,22	107,76	40 (-150 °C) 133 (RT)

Tabelle 4.8: Spannungsintensitätsfaktoren der Endabmessungen unter Verwendung aller zusammengewachsenen Fehlstellen

Dabei liegen die ermittelten Spannungsintensitäten $\Delta K_{Ie,brutto}$, $\Delta K_{Ie,netto}$ und $\Delta K_{Ie,netto-Summe}$ unterhalb der nach [62] bei Raumtemperatur bestimmten Mindestbruchzähigkeit. Dies bestätigt die Tatsache, dass die Probe nicht während dem Versuch bei Raumtemperatur gebrochen ist.

Die in der Probe auftretenden Nennspannungen σ_{brutto} , σ_{netto} und $\sigma_{netto-Summe}$ sind in Tabelle 4.9 eingetragen. Diese liegen dabei wiederum unterhalb der Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2}$.

Bereich	Typ	σ_{brutto} /MPa	σ_{netto} /MPa	$\sigma_{netto-Summe}$ /MPa	$R_{p0,2}$ /MPa	R_m /MPa
A _I -A _{VII}	III	614,4	679,3	682,8	802	840

Tabelle 4.9: Vergleich der Nennspannung mit der Ersatzstreckgrenze

Im Hinblick auf die Größenbewertung der bei der Ultraschallprüfung der Welle BS gemessenen maximalen Kreisscheibenreflektor von 2,8 mm ist der Vergleich der Flächen der in der Bruchfläche der Probe BS1 vorliegenden Fehlstellen von Interesse. Für den relevanten Durchmesser des Schallstrahles von ca. 54 mm bei der Laufzeit der Bruchflächenlage ergibt sich eine Gesamtfehlerfläche von $21,1 \text{ mm}^2$ und damit ein äquivalenter Kreisscheibendurchmesser von 5,2 mm. Der Abweichungsfaktor zwischen dem äquivalenten Fehlerflächendurchmesser und dem maximal gemessenen Kreisscheibenreflektor des Schmiedestücks von 2,8 mm beträgt 1,85. Diese Abweichung liegt im Streubereich des Diagramms von Gruppenanzeigen [4], welches aus umfangreichen Untersuchungen von fehlerbehafteten Schmiedestücken erstellt wurde. Die Werte können dabei bis zu einem Faktor von maximal 3,3 abweichen.

Die Fehlerabstände in der Bruchfläche der größeren relevanten Fehlstellen beträgt ca. 6 mm. Bei der Auswertung des A-Scans wurden, wie in Kapitel 4.3 aufgezeigt, 5-10 mm abgeschätzt und aus der vorliegenden Ultraschallschwächung im Gebiet der Gruppenanzeigen etwa 13 mm errechnet. Damit liegt eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Fehlerabständen und den aus Echospitzen des A-Scans ermittelten Abständen vor. Erfahrungswerte aus früheren Untersuchungen liegen bei Abweichungen zwischen den Faktoren 1 bis 3 vor [15].

4.5 Ergebnisse der zerstörungsfreien Untersuchung des Schmiedestücks G1 und der Zugschwellprobe G1

Wie in Tabelle 4.1 aufgeführt, wurden an dem Schmiedestück G1 auflösbare Gruppenanzeigen mit Echohöhen von 1,3 bis 1,6 mm KSR gefunden. Eine Kennzeichnung der Gruppenanzeigen in auflösbare und nicht auflösbare Anzeigen war wegen des geringen Signal-Rauschabstandes nicht sinnvoll. Eine Schwächung des Rückwandechos durch die Gruppenfehlstellen konnte nicht festgestellt werden. In der Zone, die für die Entnahme der Zugschwellprobe vorgesehen war, wurde der mittlere Anzeigenabstand aus den Echospitzen des A-Scans abgeschätzt. Die Auswertung ergab einen mittleren Abstand von 7-9 mm. Die Auswertung ist jedoch mit Unsicherheiten behaftet, da in den meisten Fällen der geringe Signal-Rauschabstand keine eindeutige Auszählung der Anzeigen zuließ. Bei der Ultraschallprüfung der fertigbearbeiteten Zugschwellprobe wurden von den Stirnflächen ausgehend mit einem B2S-E Prüfkopf auflösbare und nicht auflösbare Gruppenanzeigen mit Echohöhen von 2,5 bis 3 mm KSR, d. h. größere Echohöhen als bei der Prüfung des Schmiedestücks ermittelt. Als Ursache wurde ein geometrischer Einfluss infolge der Zentrierbohrung an der Stirnfläche vermutet. Nach der Entfernung der Zentrierbohrung (Ausdrehung auf $\phi = 80 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) erniedrigte sich der Maximalwert auf ca. 2,5 mm KSR, d. h. es wurde gegenüber dem Ausgangswert von max. 1,6 mm immer noch höhere Echohöhen gemessen. Bei der MP-Prüfung der Mantelfläche des Prüfschaftes der Probe wurden nur vereinzelt sehr kurze Anzeigen kleiner als 0,2 mm gefunden.

4.6 Beschreibung des Versagensverhaltens der G1-Zugschwellprobe

Die Probe G1 wurde aus dem Wellenwerkstoff 30CrNiMoV5-11 entnommen, siehe Anhang 4.9 und im Zugschwellversuch ($R = 0,1$) bei Raumtemperatur mit einer Beanspruchung von $\sigma = 520 \text{ MPa}$ (dies entspricht 90% der Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2}$) in Prüfschritten von etwa 10000, 25000, 50000 bis zu einer Lastwechselzahl von 69200 untersucht, siehe Bild 4.13. Während bei der Ultraschallprüfung keine Veränderungen gegenüber der Ausgangsprüfung festgestellt wurden, traten bei der Magnetpulverprüfung Unterschiede auf. Dabei zeigten sich erste merkliche Veränderungen nach 50000 Lastwechseln mit Anzeigenlängen bis ca. 1 mm. Nach 69200

Lastwechseln wurden etwa 40 Anzeigen am Prüfschaft gefunden. Im Anhang 4.10-4.11 sind die Ultraschallergebnisse sowie die Ergebnisse der Magnetpulverprüfung für verschiedene Umfangswinkel dargestellt. Aufgrund dieses Befundes wurde der Zugschwellversuch beendet.

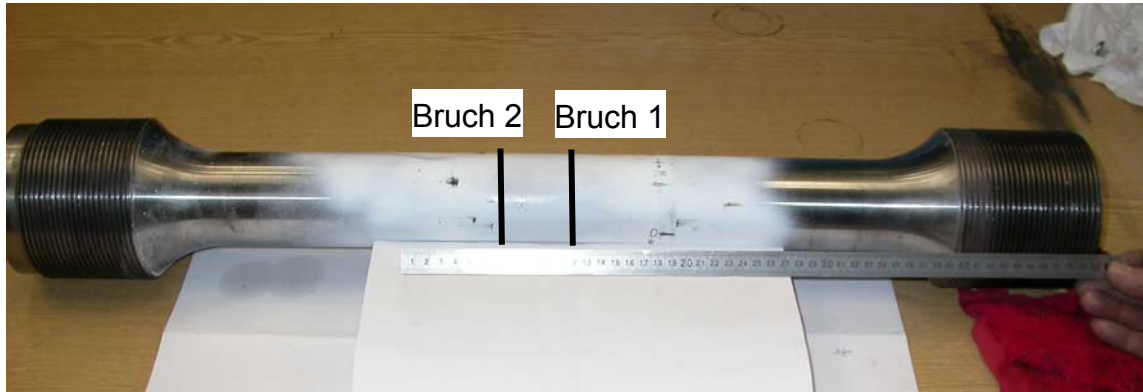


Bild 4.13: G1-Probe nach der MP-Prüfung

Nach dem Aufbrechen der Probe in flüssigem Stickstoff zerbrach sie bei einer Kraft von 2900 kN in drei Teile. Daraus ergibt sich als Bruchspannung ein Wert von 754 MPa, der in etwa der Zugfestigkeit des fehlstellenfreien Werkstoffs ($R_{m,RT} = 726 \text{ MPa}$) entspricht. In Bild 4.14 sind die beiden Bruchflächen der Probe dargestellt.

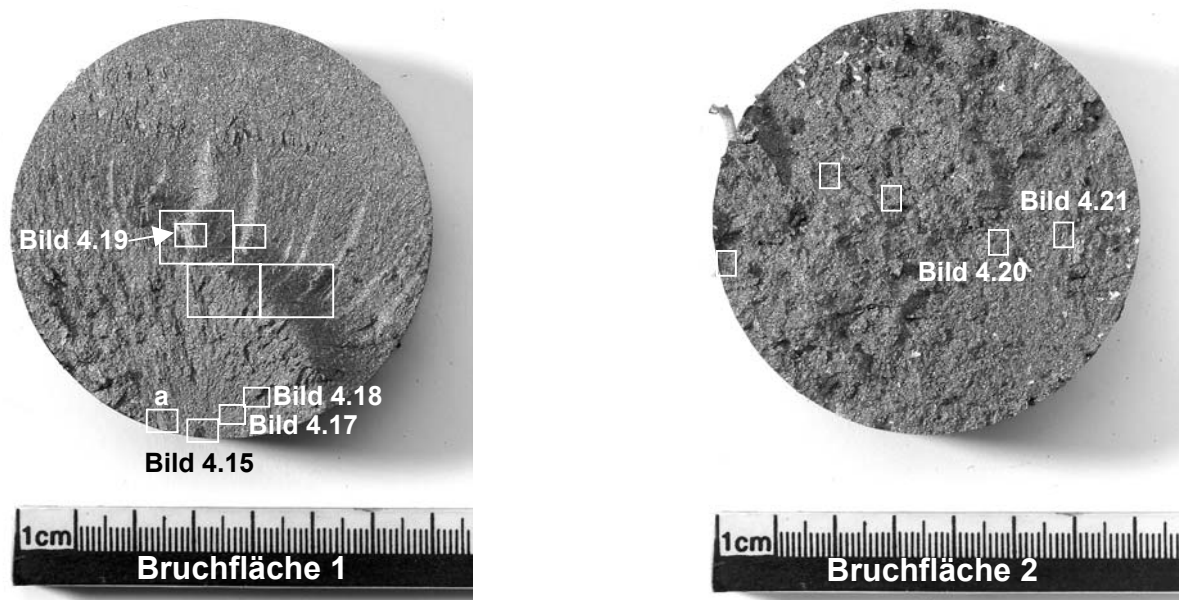


Bild 4.14: Bruchfläche 1 und Bruchfläche 2 der Probe G1, 30CrNiMoV5-11

Dabei zeigen die beiden Bruchflächen prinzipiell unterschiedliche Erscheinungsbilder. Während die Bruchfläche 1 eine relativ homogene Fläche mit einem großflächigen Risswachstum ausgehend von einem Oberflächenfehler aufweist, zeigt Bruchflä-

che 2 eine zerklüftete Oberfläche. Makroskopisch sind nur vereinzelt Fehlstellen und kein deutliches Fehlergebiet erkennbar.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Bruchfläche 1

Die rasterelektronenmikroskopische Analyse der Bruchfläche 1 zeigt drei Oberflächenfehler mit teilweise auftretendem Risswachstum und vereinzelt Innenfehlern ohne Risswachstum. Die untersuchten Gebiete der Oberfläche sind in Bild 4.14 eingezeichnet. In Bild 4.15 sind exemplarisch zwei zusammengewachsene Oberflächenfehler dargestellt. Zur besseren Identifizierung der nichtmetallischen Einschlüsse wurde ein Materialkontrastbild angefertigt.

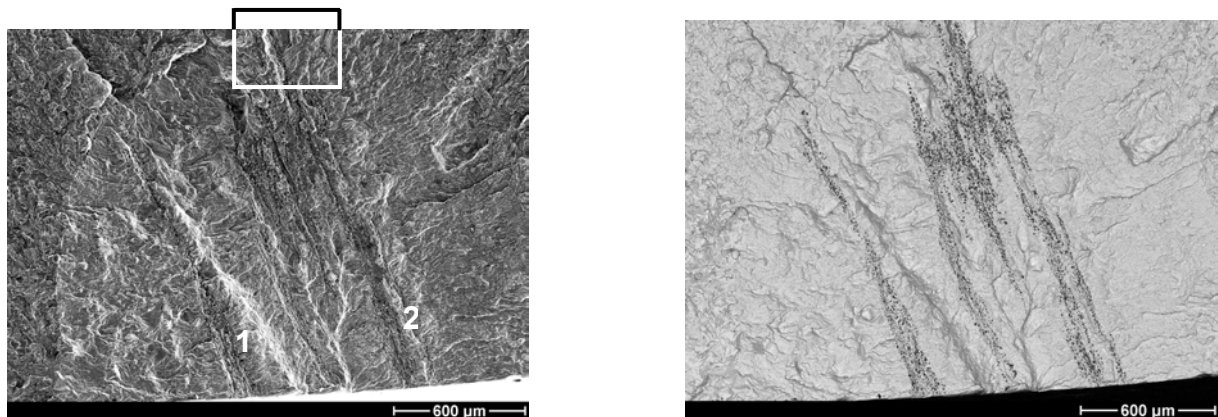


Bild 4.15: Oberflächenfehler 1 und 2 der Bruchfläche 1

Nach einem anfänglichen Risswachstum vereinigten sich beide Oberflächenfehler zu einer Fehlstelle und erreichten nach 69200 Lastwechseln eine Endfehlergröße mit den Halbachsen $a_e = 1,16$ mm und $c_e = 1,67$ mm. In Bild 4.16 ist der in Bild 4.15 gekennzeichnete Ausschnitt vergrößert dargestellt. Dabei ist der Übergang der Risswachstumszone und des sich anschließenden Spaltbruches erkennbar.

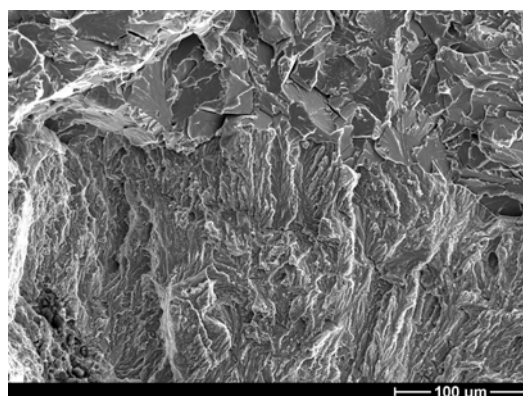


Bild 4.16: Risswachstum des Fehlers 2

Der Oberflächenfehler 3 (innerhalb des Ausschnitts a des Bildes 4.14) weist nur ein sehr kleines lokales Risswachstum von 0,045 mm auf und liegt etwa 6,5 mm links

von der Fehlstelle 1 entfernt. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass keine Beeinflussung der Fehlstellen untereinander auftritt. Zwischen den Oberflächenfehlern liegen reine Spaltbruchflächen vor.

Weitere Untersuchungen innerhalb der Bruchfläche zeigen kleine Fehlstellen ohne Risswachstum. In Bild 4.17 ist eine Anhäufung von MnS-Einschlüssen dargestellt, wobei im Rasterelektronenmikroskop keine Wechselwirkung zwischen den Fehlstellen erkennbar ist.

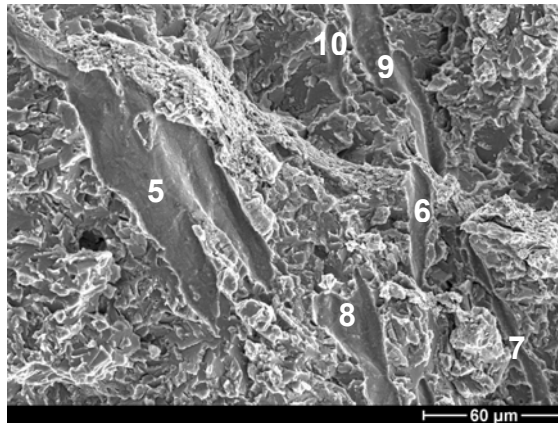


Bild 4.17: MnS-Einschlüsse der Bruchfläche 1

Die Ausmessung der MnS-Einschlüsse ergibt Fehlerachsen in der Größenordnung von $2c_i = 0,035 \text{ mm}$ bis $2c_i = 0,0773 \text{ mm}$. Die Überprüfung der Fehlstellen auf Kurzrisse nach Gleichung (2.44) ergibt, dass die Fehlstellen das Kurzrissekriterium erfüllen. Dabei zeigt sich bei diesen Fehlstellen kein Risswachstum.

Die Berechnung der entsprechenden Spannungsintensitätsfaktoren ergeben Werte zwischen $\Delta K_{II} = 1,5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ und $\Delta K_{II} = 3,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Damit liegen die Spannungsintensitätswerte unterhalb des Schwellwerts für makroskopische Rissausbreitung ($\Delta K_{I0} = 7,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). Dies entspricht dem im Rasterelektronenmikroskop vorliegenden Befund (kein Risswachstum). Die Fehler 11-13 liegen in der Probenmitte und sind ebenfalls MnS-Einschlüsse. Auch sie zeigen weder ein Risswachstum noch eine gegenseitige Beeinflussung.

Neben diesen MnS-Einschlüssen wurden auf der Bruchfläche auch Al_2O_3 -Einschlussnester festgestellt, siehe Bild 4.18.

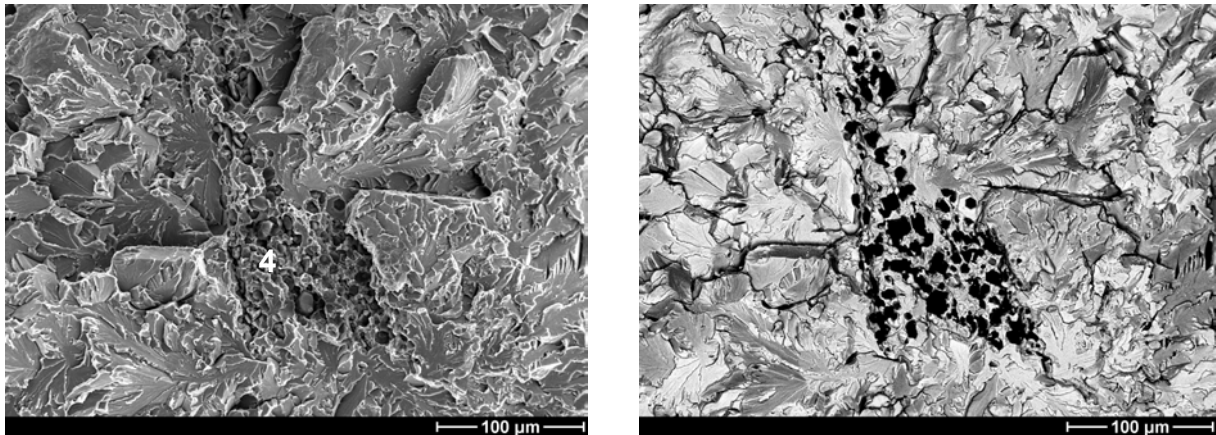


Bild 4.18: Al₂O₃-Einschlussnest und entsprechendes Materialkontrastbild

Das Einschlussnest weist kein Risswachstum auf. Auch hier ist der Spannungsintensitätsfaktor ($\Delta K_{II} = 5,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) unterhalb des Schwellwertes ΔK_{I0} .

In Tabelle 4.10 sind die in der Bruchfläche 1 ermittelten Fehlstellenhalbachsen a und c sowie die entsprechenden Spannungsintensitätsfaktoren eingetragen.

Fehler	Art	a _i /m/10 ³	c _i /m/10 ³	ΔK _{II} /MPa√m	a _e /m/10 ³	c _e /m/10 ³	ΔK _{Ie} /MPa√m
1	III	0,068	1,395	7,5	1,163	1,700	24,0
2	III	0,263	1,665	14,4			
3	III	0,719	3,400	23,6	-	-	-
4 (KR)	I	0,050	0,134	5,2	-	-	-
5 (KR)	I	0,020	0,077	3,4	-	-	-
6 (KR)	I	0,004	0,026	1,6	-	-	-
7 (KR)	I	0,004	0,044	1,6	-	-	-
8 (KR)	I	0,012	0,033	2,5	-	-	-
9 (KR)	I	0,008	0,045	2,3	-	-	-
10 (KR)	I	0,004	0,017	1,5	--	-	-
11	I	0,093	0,7185	7,8	-	-	-
12	I	0,1027	0,8400	8,3	-	-	-
13 (KR)	I	0,0750	0,1425	5,9	-	-	-

Tabelle 4.10: Fehlerabmessungen und Spannungsintensitätsfaktoren der Fehlstellen auf der Bruchfläche 1

KR: Kurzriss nach [49,50]

Typ I: Innenfehler

Typ III: Oberflächenfehler

Dabei zeigt sich, dass die Fehlstellen 4-13 unterhalb bzw. auf dem Niveau des Mindestschwellwertes ($\Delta K_{I0} = 7,9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) liegen und damit auch kein Risswachstum nach 69200 Lastwechseln auftritt. Nach den Berechnungsformeln in [57] würden diese Fehlstellen Risswachstum aufweisen. Dieses konnte jedoch im Rasterelektronenmikroskop nicht nachgewiesen werden. Insgesamt wurden auf dieser Bruchfläche nur kleine Fehlstellen ermittelt, die sich im Wesentlichen gegenseitig nicht beeinflussen. Im Weiteren lag auf der Bruchfläche ein Wechsel zwischen feinkörnigem und grobkörnigem Spaltbruch vor. Auf der Bruchfläche wurden zudem vereinzelt zähe Werkstoffbrücken vorgefunden, die in den Spaltbruchflächen eingebettet sind, siehe Bild 4.19.

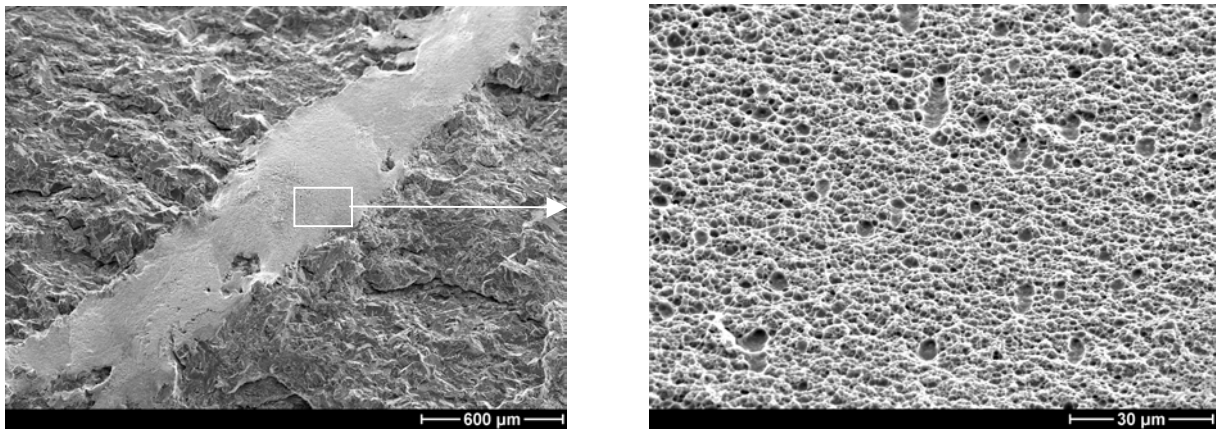


Bild 4.19: Zähe Werkstoffbrücken, eingebettet in Spaltbruchflächen

Diese Zusammenhänge zeigten jedoch keinen Einfluss auf den Versagensprozess. Die hohe Kraft, die zum Aufbrechen benötigt wurde, zeigt, dass die Fehlstellen trotz der hohen Lastwechselzahl von 69200 keinen wesentlichen Einfluss auf die Bruchfestigkeit der Zugschwellprobe hatten.

Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der Bruchfläche 2

Die rasterelektronenmikroskopische Auswertung der Bruchfläche 2 zeigt wiederum kleine Fehlstellen auf der Bruchfläche. Typische Fehlergrößenachsen liegen zwischen $2c_i = 0,25 \text{ mm}$ und $2c_i = 1 \text{ mm}$. Dies entsprechen Spannungsintensitätsfaktoren in der Größenordnung von $\Delta K_{Ii} = 5,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ und $\Delta K_{Ii} = 12,2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. In Bild 4.20 ist eine charakteristische Fehlstelle der Bruchfläche dargestellt.

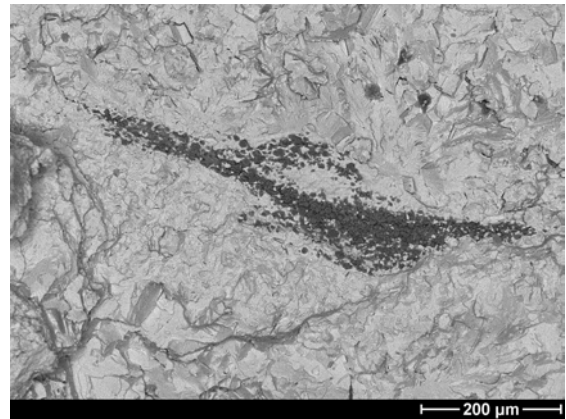
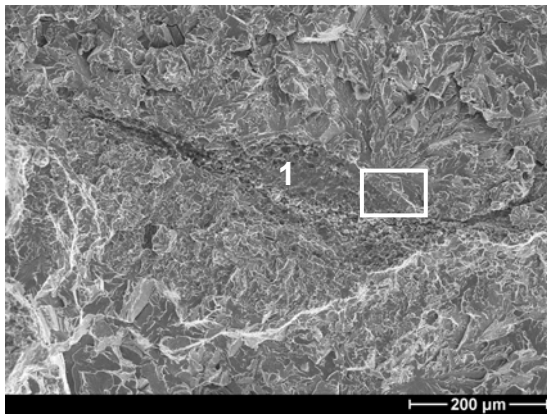


Bild 4.20: Innenfehler 1 mit entsprechendem Materialkontrastbild

Während die Fehlstelle im gekennzeichneten Bereich ein lokal begrenztes Risswachstum von etwa 0,15 mm aufweist, ist an den anderen untersuchten Fehlstellen kein Risswachstum feststellbar. Außerhalb der Fehlstelle sind im Rasterelektronenmikroskop typische Spaltbruchflächen erkennbar.

Die Fehlstelle 2, siehe Bild 4.21, ist zwar größer, hat aber eine „mildere“ Form als die Fehlstelle 1. Sie weist kein Risswachstum auf.

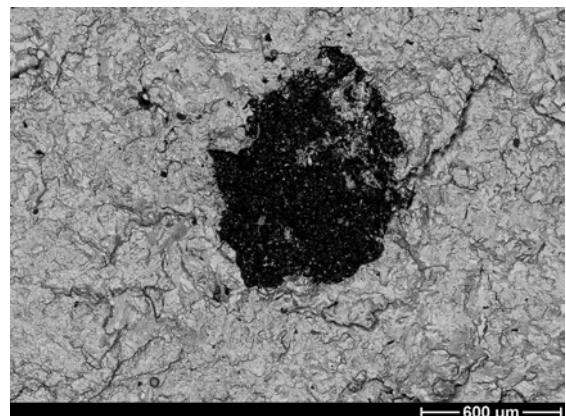
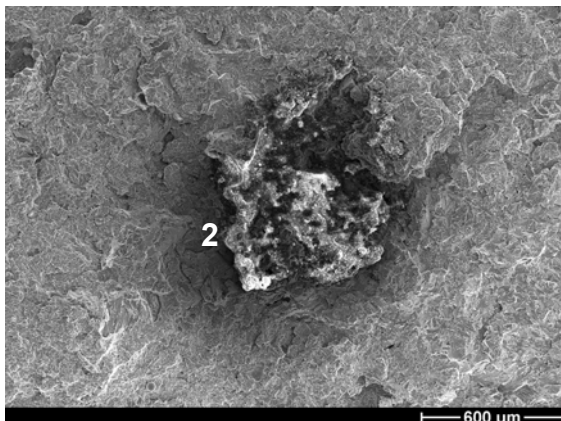


Bild 4.21: Innenfehler 2 mit entsprechendem Materialkontrastbild

In Tabelle 4.11 ist eine Übersicht über charakteristische Fehlstellengrößen der Bruchfläche 2 dargestellt. Die Fehlstellen liegen so weit auseinander, dass keine Interaktion auftritt. Die Spannungsintensitätsfaktoren der ermittelten Fehlstellen liegen in der Regel unterhalb des Mindestschwellwertes ΔK_{I0} .

Fehler	Art	a_i /m/10 ³	c_i /m/10 ³	ΔK_{Ii} /MPa \sqrt{m}	a_e /m/10 ³	c_e /m/10 ³	ΔK_{Ie} /MPa \sqrt{m}
1	I	0,075	0,328	7,5	-	-	-
2	I	0,413	0,548	12,2	-	-	-
3	I	0,047	0,498	5,6	-	-	-
4	I	0,117	0,699 ^{*)}	8,7	-	-	-
5	I	0,056	0,140	5,4	-	-	-
6	I	0,065	0,140	5,6	-	-	-

Tabelle 4.11: Fehlerabmessungen und Spannungsintensitätsfaktoren der Fehlstellen auf der Bruchfläche 2

^{*)}: angenommene Fehlergröße (Fehlstelle halb verdeckt)

Für eine Untersuchung bezüglich der Wechselwirkung von Fehlstellen ist diese Probe nur eingeschränkt einsetzbar. Während in der Bruchfläche 1 nur eine Interaktion zwischen zwei Oberflächenfehlern ermittelt werden konnte, ist auf der Bruchfläche 2 keine entsprechende Fehlerkonfiguration erkennbar.

Ein signifikanter Einfluss der Fehlstellen auf das Risswachstum konnte an beiden Probenhälften nicht nachgewiesen werden. Die Spannungsintensitätsfaktoren lagen häufig unterhalb des Schwellwertes. Mit Hilfe der beim Aufbrechen ermittelten Kraft konnte eine Mindestbruchzähigkeit von $K_{IC} = 35 \text{ MPa}\sqrt{m}$ (-150 °C) abgeschätzt werden. Dabei ist die Bruchzähigkeit der fehlerbehafteten Probe etwas höher, als die Bruchzähigkeit des fehlerfreien Werkstoffes ($K_{IC} = 28 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $T = -150^\circ\text{C}$). Sie kann daher als konservativ angesehen werden.

Bei einem Vergleich der in den Bruchflächen der Probe G1 vom Schallstrahl erfassten Fehlstellen mit der Gesamtfehlerfläche von $9,9 \text{ mm}^2$ bzw. dem äquivalenten Kreisscheibendurchmesser von 3,55 mm mit dem Kreisscheibenreflektor der Ultraschallprüfung des Schmiedestücks G1 von maximal 1,7 mm ergibt sich ein Abweichungsfaktor von 2,09. Die Abweichung ist mit der Probe BS1 und mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen [4] vergleichbar.

4.7 Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung des Schmiedestücks G2 und der Zugschwellprobe G2

Wie in Tabelle 4.1 dargestellt, wurden bei der Ultraschallprüfung des Schmiedestücks G2 auflösbare und nicht auflösbare Gruppenanzeigen mit Echohöhen zwischen 1,5-3,3 mm KSR ermittelt. Bei der Prüfung der fertigbearbeiteten Zugschwellprobe über die Stirnflächen der Probe mit einem Prüfkopf B2S-E wurde eine maxi-

male Echohöhe von 2,2 mm KSR gefunden. MP-Anzeigen an der Mantelfläche des Schaffes konnten keine nachgewiesen werden.

4.8 Beschreibung des Versagensverhaltens der Zugschwellprobe G2

Die Probe G2 wurde aus dem Wellenwerkstoff 30CrMoNiV5-11 entnommen, siehe Anhang 4.12 und im Zugschwellversuch bei Raumtemperatur mit einer Beanspruchung von $\sigma = 544 \text{ MPa}$ (entspricht 90% der Ersatzstreckgrenze $R_{p0,2}$) geprüft. Die parallel zum Versuch durchgeführten Ergebnisse der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sind im Anhang 4.13 aufgeführt. Dabei zeigten sich während des Versuchs eine Erhöhung des KSR von 2,2 mm auf 2,8 mm. Bei der Magnetpulverprüfung wurden Veränderungen gegenüber der Ausgangsprüfung festgestellt, siehe Anhang 4.10. Nach 62268 Lastwechseln brach die Probe spontan während des Versuchs. Die Bruchlage ist im Anhang 4.14 dargestellt. In Bild 4.22 ist eine schematische Skizze der Endfehlergröße des zusammengewachsenen Fehlstellengebietes aufgezeigt.

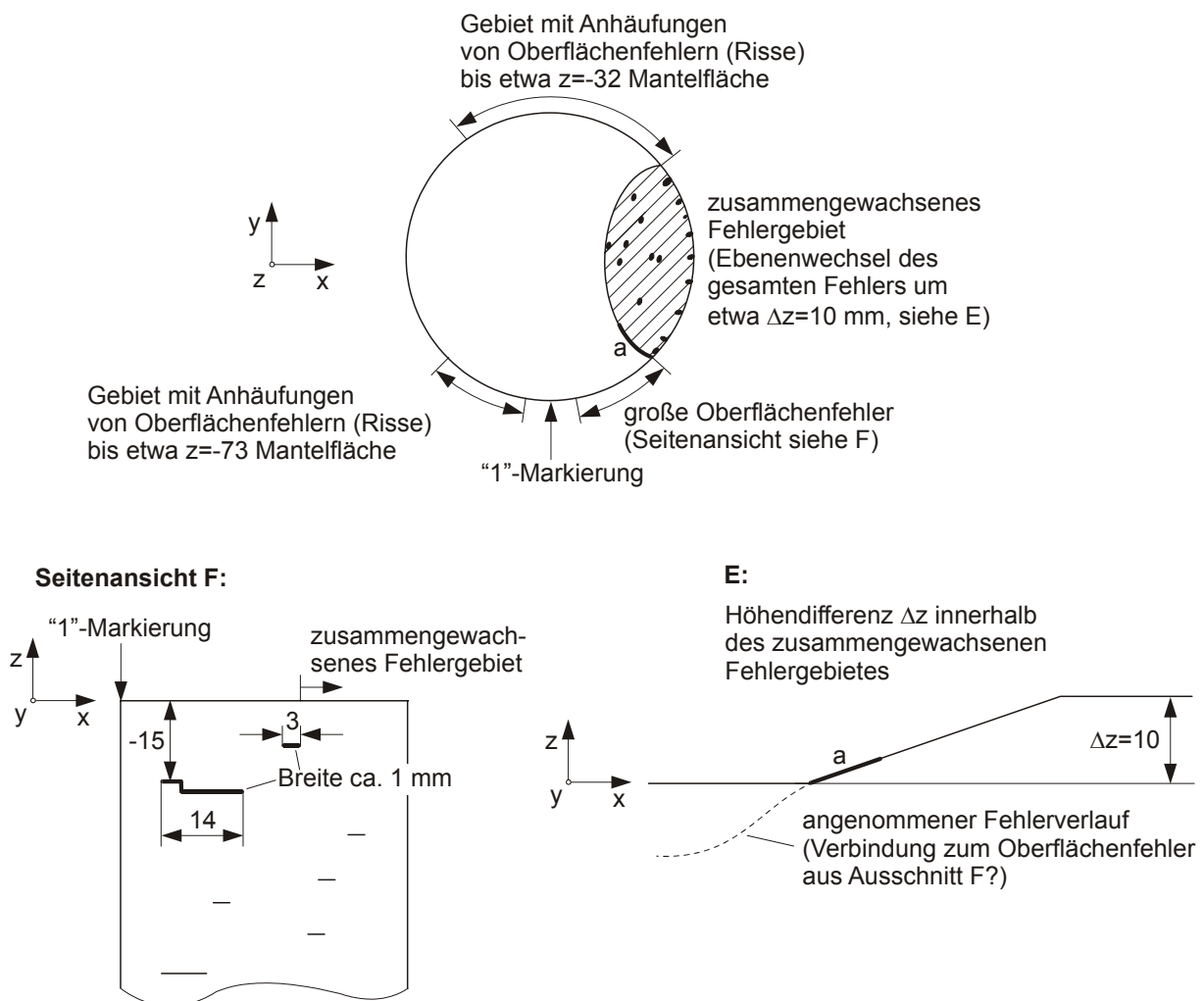


Bild 4.22: Schematische Skizze der Bruchfläche der Zugschwellprobe G2

Im Bereich der Seitenansicht F zeigte sich eine leichte Einschnürung bzw. Verformung der Probe. Auf der anderen Probenhälfte ($z > 0$) waren in Verlängerung zu den in Bild 4.22 gekennzeichneten Gebieten mit Fehleranhäufungen von Oberflächenfehlern weitere Häufungen von Rissen auf der Mantelfläche erkennbar.

In Bild 4.23 ist die Bruchfläche nach dem spontanen Versagen der Zugschwellprobe G2 mit den im Rasterelektronenmikroskop untersuchten Bereichen dargestellt. Dabei ist die Endfehlergröße der zusammengewachsenen Fehlstellen deutlich zu erkennen.

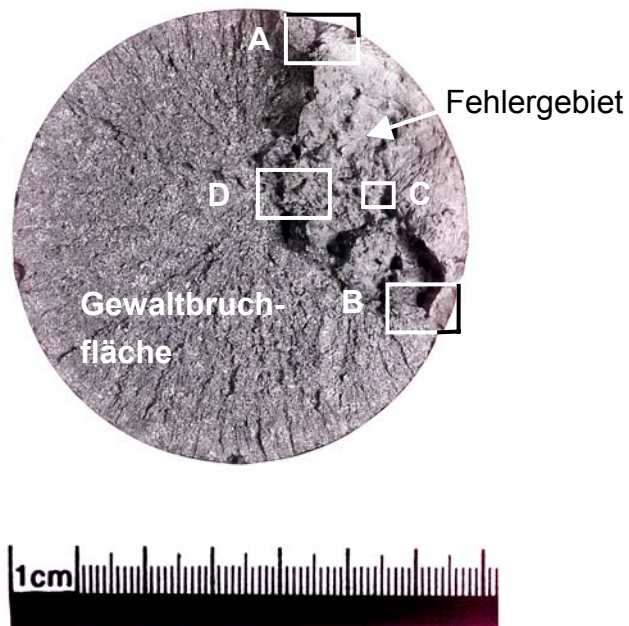


Bild 4.23: Bruchfläche der Zugschwellprobe G2, Werkstoff: 30CrMoNiV5-11

Im Folgenden werden die Bruchfläche charakterisierende Bereiche näher erläutert. In Bild 4.24a ist der Bereich A aus Bild 4.23 dargestellt. Neben dem zähen Fehlergebiet mit einer Vielzahl von kleinen Fehlstellen ist der Übergang zur Gewaltbruchfläche zu erkennen.

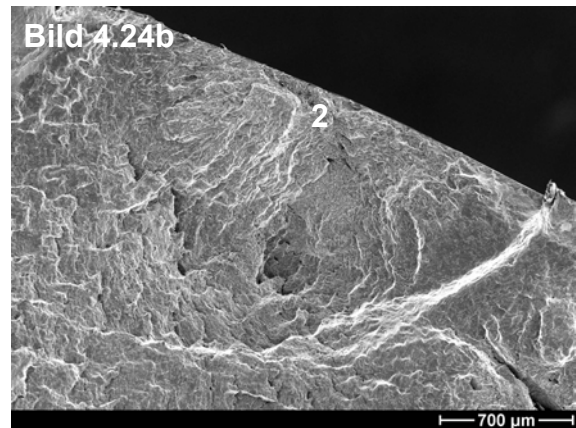
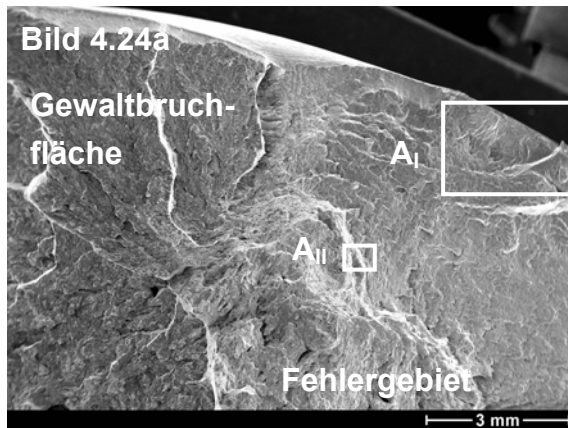


Bild 4.24a/b: Bereich A aus Bild 4.23 und vergrößerte Darstellung A_I des Oberflächenfehlers 2

In Bild 4.24b ist der Oberflächenfehler 2 des Ausschnitts A_I ersichtlich. Dieser Fehler mit den Halbachsen $a_i = 0,26$ mm bzw. $c_i = 0,33$ mm zeigt ein Risswachstum von $\Delta a \approx 0,83$ mm. Im Anhang 4.15 ist das Materialkontrastbild zur besseren Erkennbarkeit des Ausgangsfehlers aufgezeigt. Innerhalb des Fehlergebietes (Bild 4.23) weist die Probe entlang des Probenrandes eine Vielzahl von Oberflächenfehlern auf. Ein weiterer signifikanter Oberflächenfehler 1 mit einem deutlichen Risswachstum ist im Bereich B des Bildes 5.23 im Anhang 4.16 dargestellt.

In den Materialkontrastbildern 4.25a/b sind die Ausgangskonfigurationen zweier Innenfehler auf verschiedenen Ebenen im Bereich A_{II} des Bildes 4.24a erkennbar, siehe auch Anhang 4.17. Der Fehler 4 ist dabei halb verdeckt und konnte daher nicht ausgemessen werden.

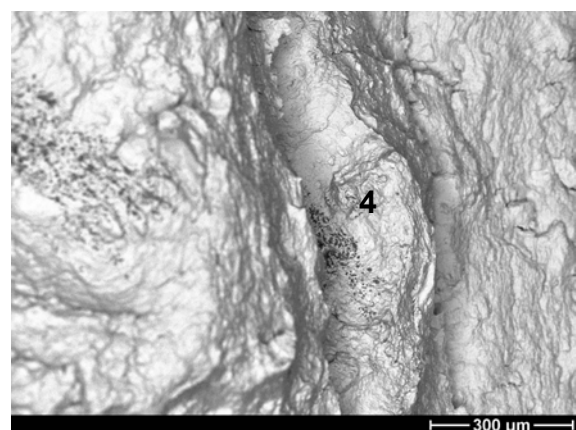
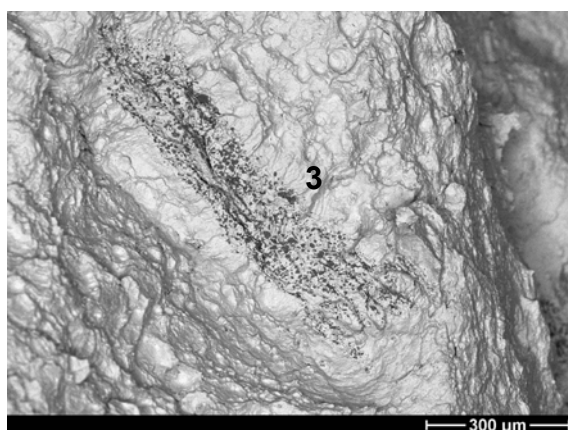


Bild 4.25a/b: Innenfehler 3 und 4 auf unterschiedlichen Ebenen

Diese lokalen Fehler mit örtlichem Risswachstum sind für das gesamte Fehlergebiet charakteristisch. Mit der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung konnten eine Vielzahl von Innenfehlern mit örtlichem Risswachstum innerhalb des Fehlergebietes entdeckt werden. Es zeigte sich jedoch, dass die Abstände zwischen den

Fehlstellen so groß waren, dass im Rasterelektronenmikroskop keine Interaktion zwischen den einzelnen Fehlstellen festgestellt werden konnte. Eine weitere häufig auf der Bruchfläche auftretende Fehlstellenkonfiguration aus der Mitte des zusammengewachsenen Fehlergebietes ist exemplarisch in Bild 4.26a/b (Ausschnitt C des Bildes 4.23) dargestellt.

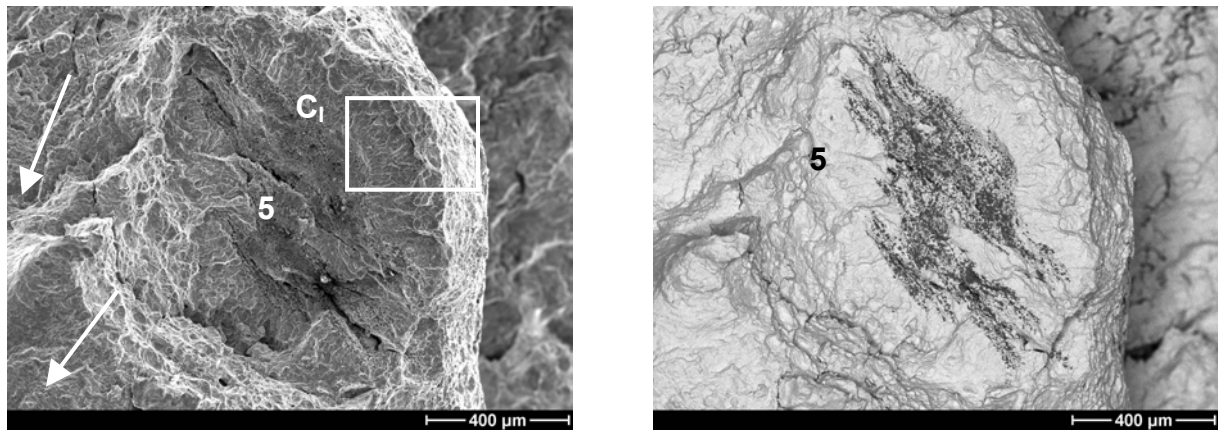


Bild 4.26a/b: Innenfehler 5 des Ausschnittes C vom Bild 4.23

Auch dieser Fehler 5 zeigt ein Risswachstum von etwa $\Delta a \approx 0,135 \text{ mm}$, siehe Anhang 4.18 und liegt auf einer gesonderten Ebene. Am Rand des Fehlers 5 (links) ist ein Risswachstum zu erkennen, welches von der Oberfläche der Probe kommend ins Innere gerichtet ist, siehe Bild 4.26. Dieses Risswachstum wird dann schlagartig beim Bruch der Probe beendet, siehe Bild 4.27 (Ausschnitt D des Bildes 4.23).

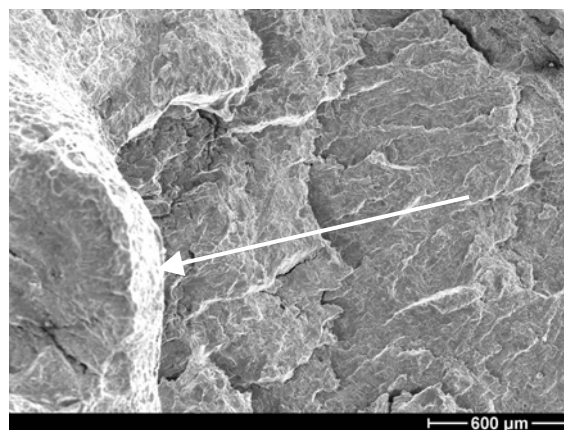


Bild 4.27: Begrenzung des zusammengewachsenen Fehlergebietes

In Tabelle 4.12 sind die Abmessungen und die Spannungsintensitätsfaktoren der Ausgangs- und Endfehlergrößen für die charakteristischen Fehlstellen der Zugschwellprobe G2 eingetragen. Dabei konnten keine Kurzrisse nach Gleichung (2.44) festgestellt werden. Besonders kennzeichnend für die Probe ist, dass die Fehlstellen sich im Allgemeinen auf unterschiedlichen Ebenen befinden und daher keine deutliche Interaktion zwischen den Fehlstellen erkennbar ist.

Fehler	Art	a_i /m/10 ³	c_i /m/10 ³	$\Delta K_{I,i}$ /MPa√m	a_e /m/10 ³	c_e /m/10 ³	$\Delta K_{I,e}$ /MPa√m
1	III	0,203	1,710	13,4	3,375	3,900	37,1
2	III	0,261	0,327	10,5	1,050	1,179	20,6
3	I	0,079	0,450	7,4	0,128	0,500	9,1
4	I	nicht auswertbar, da Fehler halb verdeckt					
5	I	0,205	0,560	11,0	0,345	0,580	12,6

Tabelle 4.12: Ausgangs- und Endfehlergrößen sowie entsprechende Spannungsintensitätsfaktoren der Zugschwellprobe G2

Ein Vergleich zwischen den im Rasterelektronenmikroskop und den mit dem Gesetz von Paris bestimmten Risswachstumsraten ist in Bild 4.28 dargestellt. Dabei wurden auf die in [1] am Werkstoff 30CrMoNiV5-11 ermittelten Konstanten $C = 5,19 \cdot 10^{-14} \text{ mm/LW}$ und $n = 3,19$ ($\Delta K_I / \text{N/mm}^{1,5}$) zurückgegriffen.

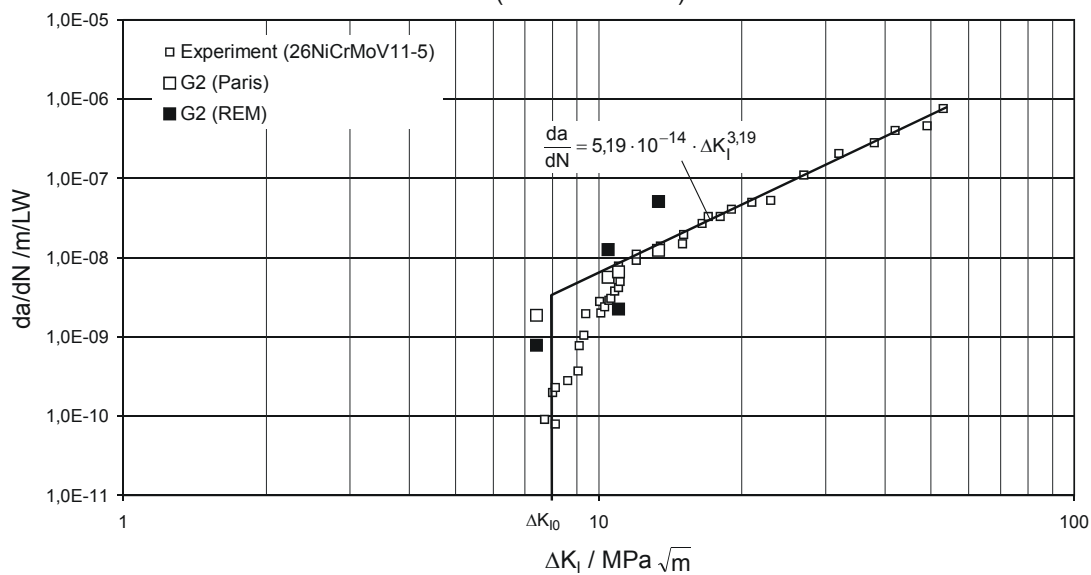


Bild 4.28: Vergleich der Risswachstumsraten, Zugschwellprobe G2, Werkstoff 30CrMoNiV5-11

Es zeigt sich, dass die im Rasterelektronenmikroskop bestimmten Risswachstumsraten mit ausreichender Genauigkeit mit den nach dem Gesetz von Paris berechneten Risswachstumsraten beschrieben werden können.

Die im Rasterelektronenmikroskop bestimmte Endfehlergröße des zusammengewachsenen Fehlergebietes ist in Tabelle 4.13 eingetragen. Dabei überschreitet der Spannungsintensitätsfaktor des Oberflächenendfehlers $\Delta K_{I,e}$ die für einen 1%Cr-Werkstoff ermittelten Mindestbruchzähigkeit bei Raumtemperatur.

Fehler	Art	$a_e / m / 10^3$	$c_e / m / 10^3$	$\Delta K_{I,e} / \text{MPa}\sqrt{m}$	$K_{IC,RT} / \text{MPa}\sqrt{m}$
Endfehler	III	28	27,5	116,2	60 (RT) ^{*)}

Tabelle 4.13: Spannungsintensitätsfaktor des zusammengewachsenen Fehlergebietes

^{*)}: aus Mindestwertkurve nach [62]

Eine weitere Ursache für das spontane Versagen der Probe wird unter Betrachtung der Spannungen deutlich. Dabei erreichte die Restspannung in der Probe $\sigma_{\text{netto-Summe}}$, d.h. die Spannung, die sich aus der Gesamtfläche abzüglich des zusammengewachsenen Fehlergebietes ergibt, die Zugfestigkeit des Werkstoffes, siehe Tabelle 4.14.

Fehler	Art	$a_e / m / 10^3$	$c_e / m / 10^3$	$\sigma_{\text{netto-Summe}} / \text{MPa}$	R_m / MPa
Endfehler	III	28	27,5	794	734-737

Tabelle 4.14: Vergleich der Festigkeitskennwerte unter Verwendung der Endfehlergröße

Der Versagensvorgang der Zugschwellprobe G2 basiert dabei auf der Vielzahl von Fehlstellen mit lokalen Rissausbreitungen, die sich auf unterschiedlichen Ebenen befinden. Nach einer gewissen Zeit erreichen die Fehler nach dem Durchbrechen der Ebenen die in Bild 4.22 dargestellte Endfehlergröße. Der Restquerschnitt kann die aufgebrachte Beanspruchung nicht mehr ertragen und die Probe versagt.

4.9 Beschreibung des Versagensverhaltens der Schleuderprobe G2

Die Schleuderprobe wurde aus einem Bohrkern des Wellenwerkstoffes 30CrMoNiV5-11 hergestellt, siehe Anhang 4.9. Bei der Festlegung der Probenlage ging man davon aus, dass wie bei dem Schmiedestück BS, die Fehlstellen orientierungslos im Wellenquerschnitt vorliegen. Bei der Ultraschallprüfung der Schleuderprobe vor dem Versuch wurden zwei Fehlergebiete etwas außerhalb der Probenmitte gefunden. Bei radialer Einschallung in die Probe ergaben sich je nach Umfangsposition maximale KSR zwischen 0,5 mm und 0,8 mm. Bei axialer Einschallung zeigten sich in der Mitte der Schleuderprobe maximale KSR von 2,5 mm bzw. am Absatz KSR 3,5 mm, siehe Anhang 4.19-4.23. Entgegen den Erwartungen wiesen die Fehlstellen eine bevorzugte flächenhafte Ausdehnung in axialer Richtung der Welle auf. Damit ergaben sich durch die ausgewählte Probenlage für den Schleuderversuch ungünstige Bedingungen für den erwünschten Rissfortschritt, da für die maximale Zugbeanspruchung (Tangentialspannung) der Schleuderprobe nur eine geringe Fehlstellenausdehnung gegeben ist.

Die Probe wurde bei Raumtemperatur mit einer Schleuderdrehzahl zwischen 8000 U/min und der mit der Prüfeinrichtung maximal möglichen 46000 U/min geprüft. Die maximal auftretende Spannung in der Probenmitte ist dabei $\sigma_t(x=0) = 382 \text{ MPa}$. Nach 9150 Lastwechseln wurde die Probe nochmals zerstörungsfrei untersucht. Dabei konnten jedoch keine signifikanten Änderungen festgestellt werden. Die Ergebnisse sind ebenso im Anhang 4.19-4.23 dargestellt.

Zur Überprüfung, ob unter den gegebenen Bedingungen eine Fortsetzung des Schleuderversuchs sinnvoll ist, wurden auf Basis der ZfP-Ergebnisse Abstandsrechnungen zwischen den Fehlstellen vor und nach dem Schleuderversuch durchgeführt, siehe Anhang 4.24. Dabei konnten bei radialer Einschallung (KSR 0,5 mm-0,8 mm) Abstände zwischen 2,36 mm und 2,63 mm vor dem Versuch, bzw. Abstände zwischen 2,44 mm und 2,94 mm nach dem Versuch ermittelt werden. Bei axialer Einschallung (KSR 2,5 mm-3,5 mm) ergaben sich Abstände zwischen 10,25 mm und 11,86 mm.

Zur Klärung der Frage, ob mit einer Interaktion der Fehlstellen bei den aufgetragenen Beanspruchungen innerhalb der Schleuderprobe zu erwarten ist, wurden für die ermittelten KSR die entsprechenden Spannungsintensitätsfaktoren und daraus mit Hilfe des Gesetzes von Paris die Rissausbreitungen nach 9150 bzw. nach 40000 Lastwechseln berechnet, siehe Tabelle 4.15. Bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass der KSR in etwa der Größe der WEFG entspricht. Damit ist eine Abschätzung möglich, ob mit einer Wechselwirkung der Fehlstellen zu rechnen ist.

WEFG /mm	$a = \frac{\text{WEFG}}{\sqrt{10}}$ /mm	ΔK_I /N/mm ^{3/2}	nach 9150 LW da/mm	nach 40000 LW da/mm	nach 40000 LW 2 · da/mm	d /mm
0,5	0,16	270,8	0,0273	0,1195	0,239	2,36-2,44
0,7	0,22	317,6	0,0455	0,1987	0,397	2,58-2,94
0,8	0,25	338,5	0,0554	0,2424	0,4847	2,55-2,63
2,5	0,8	605,6	0,3563	1,557	3,115	11,86
3,5	1,107	712,4	0,5980	2,615	5,229	10,25

Tabelle 4.15: abgeschätztes Risswachstum mit dem Gesetz von Paris
($C = 5,19 \cdot 10^{-14} \text{ mm/LW}$, $n = 3,19$)

Dabei zeigt sich, dass die mit dem Gesetz von Paris abgeschätzten Rissausbreitungen $2 \cdot da$ nach 40000 Lastwechseln für alle zerstörungsfrei ermittelten Anzeigen deutlich unterhalb der Fehlstellenabstände d liegen. Daher wurde der Versuch abgebrochen, da kein Zusammenwachsen der Fehlstellen zu erwarten ist.