

WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-330

September 2001

ISSN 1437-322X

Archiv-Ex.:

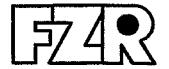
Ute Bergmann

**Ultraschallverfahren zur
Rißfortschrittmessung für die Ermittlung
von Rißwiderstandskurven**

Herausgeber:
Forschungszentrum Rossendorf e.V.
Postfach 51 01 19
D-01314 Dresden
Telefon +49 351 26 00
Telefax +49 351 2 69 04 61
<http://www.fz-rossendorf.de/>

Als Manuskript gedruckt
Alle Rechte beim Herausgeber

FORSCHUNGSZENTRUM ROSSENDORF



WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHE BERICHTE

FZR-330

September 2001

Ute Bergmann

**Ultraschallverfahren zur
Rißfortschrittsmessung für die Ermittlung
von Rißwiderstandskurven**

Dissertation

**Ultraschallverfahren zur Rißfortschrittsmessung
für die Ermittlung von Rißwiderstandskurven**

Von der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden
zur
Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
angenommene Dissertation

Dipl.-Ing. Ute Bergmann
geb. am 24. 01. 1968 in Dresden

Tag der Einreichung: 23. 06. 2000
Tag der Verteidigung: 10. 01. 2001

Gutachter: Herr Prof. Dr. rer. nat. M. Schaper
Herr Prof. Dr.-Ing.habil.Dr.-Ing.e.h. H. Blumenauer
Herr Dr.-Ing. J. Böhmert

Vorsitzender der Promotionskommission: Herr Prof. Dr.-Ing. habil. G. Zouhar

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Sicherheitsforschung im Forschungszentrum Rossendorf.

Mit diesen einleitenden Worten möchte ich mich bei all denen bedanken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. M. Schaper, der diese Arbeit als Hochschullehrer wissenschaftlich betreute und unterstützte.

Für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme eines Gutachtens bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing.e.h. H. Blumenauer.

Herrn Dr.-Ing. J. Böhmert danke ich besonders für die stete fachliche Unterstützung und für sein förderndes Interesse am Fortgang dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. F. Bergner. Er führte mich an das Thema der Arbeit heran und begleitete die Arbeit mit ungezählten Hinweisen und engagierten Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. H. Richter danke ich für viele Diskussionen und wertvolle Anregungen.

Allen Mitarbeitern der damaligen Abteilung "Neutronenversprödung" im Institut für Sicherheitsforschung sei gedankt für die Durchführung und die aufwendige Auswertung der Versuche. Namentlich möchte ich Herrn Wolfgang Webersinke erwähnen, der die Arbeit durch seine stete Hilfsbereitschaft und sein kollegiales Interesse unterstützte. Frau Behrens und Frau Christalle danke ich für die zahlreichen REM-Untersuchungen und Bruchflächenvermessungen, Frau Rott für die Unterstützung bei der Bewältigung des umfangreichen Datenmaterials.

Für die Ermöglichung der Simulationsarbeiten zur Schallfeldausbreitung und die anschließende umfangreiche Diskussion der Ergebnisse möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.rer.nat. K.J. Langenberg und Dipl.-Ing. Ch. Hofmann bedanken. Herrn Dr.-Ing. B. Köhler danke ich für die stroboskopischen Messungen und die anschließende Diskussion der Ergebnisse. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Dr. rer. nat. habil. E. Kühnicke für die Durchführung von Schallfeldberechnungen bedanken.

Ein besonderes Dankeschön gilt meiner Familie, die während des Entstehens dieser Arbeit auf viele gemeinsame Stunden verzichtete.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis.....	IV
1 Einführung.....	1
2 Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung.....	3
2.1 J-Integralkonzept der Fließbruchmechanik.....	3
2.2 Ableitung von Rißinitiierungskennwerten	5
2.3 Prüfkonzept von Mehr- und Einprobenverfahren.....	8
2.4 Experimentelle Einprobenverfahren zur Ermittlung von Rißwiderstandskurven.....	9
2.4.1 Teilentlastungsverfahren.....	9
2.4.2 Elektropotentialverfahren.....	11
2.4.3 Ultraschallverfahren.....	13
2.5 Kurvenanalytische Verfahren.....	14
3 Rißfortschrittsmessung auf der Grundlage des Ultraschalls	17
3.1 Grundlagen des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens.....	17
3.2 Numerische Simulation der Wellenausbreitung.....	19
3.3 Ultraschallverfahren zur Rißfortschrittsermittlung.....	20
3.3.1 Reflexions-/Transmissionsverfahren.....	21
3.3.2 Amplituden-Beugungsverfahren.....	22
3.3.3 Laufzeit-Beugungsverfahren.....	23
4 Aufgabenstellung	29
5 Methodische Entwicklung des Ultraschall-Laufzeit- Beugungs-Verfahrens	32
5.1 Meßprinzip.....	32
5.1.1 meßtechnische Realisierung.....	32
5.1.2 Interpretation des Empfangssignals.....	33
5.2 Numerische Simulation der Schallwellenausbreitung.....	35
5.2.1 Schallwellenausbreitung ohne Modenwandlung	35
5.2.2 Schallwellenausbreitung mit Modenwandlung.....	37
5.2.3 Echobildung im Empfangsfall.....	39
5.2.4 Veränderung der Echofolge bei Rißfortschritt.....	42
5.2.5 Veränderung der Echofolge bei Probendurchbiegung.....	44
5.2.6 Einfluß von Rißinitiierungsprozessen.....	45
5.2.7 Modifizierung der angeregten Wellenart.....	47
5.2.8 Experimentelle Verifizierung der Simulationen.....	48
5.2.9 Fazit der Simulationen.....	51
5.3 Praktische Umsetzung in die Rißfortschrittsmessung.....	53
5.3.1 Kalibrierung des Meßaufbaus.....	53
5.3.2 Ermittlung des Rißfortschritts.....	54
5.3.3 Berücksichtigung der Probendurchbiegung.....	57
5.3.4 Bildgebendes Auswerteverfahren.....	59

5.4 Grenzen und Genauigkeit des Verfahrens.....	61
6 Experimentelles.....	64
6.1 Werkstoffe und Proben.....	64
6.1.1 Auswahl der Werkstoffe.....	64
6.1.2 Eigenschaften und mechanische Werkstoffkennwerte.....	64
6.1.3 Proben.....	65
6.2 Versuchsdurchführung.....	69
6.2.1 Dreipunktbiegeversuch.....	69
6.2.2 Ultraschallmeßplatz	69
6.2.3 Schallfeldcharakteristik in der ISO-V-Probe.....	70
6.2.4 Teilentlastungsverfahren.....	72
6.2.5 Fraktografische Auswertung.....	73
7 Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens.....	76
7.1 Ergebnisse des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens.....	76
7.2 Ermittlung von J-Rißwiderstandskurven.....	79
7.2.1 Vorbemerkungen.....	79
7.2.2 Bruchmechanische Charakterisierung des Materials 10CrMo9-10	81
7.2.3 Erprobung des Verfahrens für das Material S460N.....	87
7.2.4 Erprobung des Verfahrens für das Material 20MnMoNi5-5.....	88
7.2.5 Erprobung des Verfahrens für das Material EN-GJS-400-24C..	89
7.2.6 Erprobung des Verfahrens für das Material AA 2024.....	91
7.3 Bestimmung eines Rißinitiierungskennwertes aus Meßdaten des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens.....	94
8 Bewertung des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens.....	99
8.1 Verfahrensvergleich des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs- Verfahrens mit dem Gleichstrompotentialverfahren und dem Teilentlastungsverfahren.....	100
8.2 Vergleichende Bewertung der Verfahren zum Nachweis von Rißinitiierung.....	102
9 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschall- Laufzeit-Beugungs-Verfahrens.....	104
9.1 Rißfortschrittsmessung beim instrumentierten Kerbschlag- biegeversuch.....	104
9.2 Messung der Ermüdungsrißausbreitung und des Rißschließeffektes.....	106
10 Zusammenfassung.....	109
Literatur	
Anhang	

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Die Zusammenstellung soll die Lesbarkeit der Arbeit erhöhen. Alle aufgeführten Symbole und Abkürzungen sind im Text ausführlich erklärt.

Symbole

A	Regressionskonstante für J-Rißwiderstandskurven
A_g	Gleichmaßdehnung
A_5	Bruchdehnung, kurzer Proportionalstab
a	Rißlänge
a_0	Anfangsrißlänge
a_{0opt}	mittels Meßmikroskop ermittelte Anfangsrißlänge
a_{0us}	mit Ultraschall ermittelte Anfangsrißlänge
a_1	Endrißlänge
B	Probendicke
B_e	effektive Probendicke
B_n	Probennettodicke
B_{US}	Einschallbereich der Ultraschallwandler
C	Regressionskonstante für J-Rißwiderstandskurven
c_l	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle
c_t	Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle
D	Regressionskonstante für J-Rißwiderstandskurven
d	Probendurchbiegung
d_n	Verfestigungskoeffizient
d_n^*	grafisch ermittelter Verfestigungskoeffizient
ds	Linienelement eines Integrationsweges
dU	potentielle Energie vor der Rißspitze
E	Elastizitätsmodul
E^*	effektiver Elastizitätsmodul
H_i	geometrischer Korrekturfaktor
J	J-Integral
J_{el}	elastischer Anteil des J-Integrals
J_{pl}	plastischer Anteil des J-Integrals
J_i	physikalischer Rißinitiierungskennwert
J_{iUS}	Rißinitiierungskennwert aus Ultraschallmeßdaten
$J_{0,2}$	technischer Rißinitiierungskennwert bei $\Delta a = 0,2 \text{ mm}$
$J_{0,2/BL}$	technischer Rißinitiierungskennwert als Schnittpunkt der J-R-Kurve mit der um $\Delta a = 0,2 \text{ mm}$ verschobenen Rißabstumpfunggerade
K	Spannungsintensitätsfaktor
m	Anstiegswinkel
P	Last
$R_{p0,2}$	technische Dehngrenze
R_m	Zugfestigkeit
r	Rotationsfaktor

S	Abstand zwischen den Auflagerollen
T_i	Komponente des Spannungsvektors
t_m	gemessene Laufzeit
t_0	Schallvorlaufzeit im Prüfkopf
U	Formänderungsenergie
U_c	Faktor der Reihenentwicklung zur Nachgiebigkeitsbestimmung
U_{pl}	plastischer Anteil der Formänderungsenergie
u	Verschiebungsvektor längs eines Integrationsweges
V	Lastpunktverschiebung
W	Probenbreite, Probenabmessung in Rißausbreitungsrichtung
W_e	auf das Volumen bezogene Formänderungsarbeit
x	kartesische Koordinaten
y	kartesische Koordinaten
δ	Rißspitzenöffnungsverschiebung
η	Formfaktor
σ_F	Fließspannung
ν	Poissonsche Konstante
Δa	aktueller Rißfortschritt

Abkürzungen

ACPD	Wechselstrompotentialverfahren (Alternating Current Potential Drop Method)
ASTM	American Society for Testing and Materials
CT	Crack Tension - Probenform
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
DCPD	Gleichstrompotentialverfahren (Direct Current Potential Drop Method)
EFIT	Elastodynamische Finite Integrationstechnik
EFAM	Engineering Flaw Assessment Method
EGF	Europaen Group of Fracture
EPBM	Elastisch-plastische Bruchmechanik
ESIS	Europaen Structural Integrity Society
GPIB	General Purpose Interface Bus
IKSBV	instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch
ISO-V-Geometrie	Probenform nach DIN 50115
J-R-Kurve	J-Rißwiderstandskurve
KSBV	Kerbschlagbiegeversuch
L-Welle	Longitudinalwelle
MU3F	Measurement by Ultrasound Focused on Fatigue Front
RC	row cosinus
REM	Rasterelektronenmikroskop

SENB-Proben	Single Edge Notched Bending - Probenform
SZW	Stretchzonenbreite (Stretch Zone Width)
SZW _c	kritische Stretchzonenbreite
TOFD	Time of Flight Diffraction Technique

Bezeichnung wichtiger Ultraschallsignale entsprechend ihrer Entstehung

T-Welle	Transversalwelle
T/L	Echo der aus der Rißspitzenbeugung der einfallenden T-Welle entstandenen L-Welle
T/T	Echo der rißspitzengebeugten T-Welle
T/L/L	Echo einer rückwandreflektierten L-Welle, entstanden durch die einfallende T-Welle, die an der Rißspitze gebeugt und dort zu einer L-Welle modekonvertiert wurde
T/T/L	Echo einer rückwandreflektierten L-Welle, entstanden durch die einfallende T-Welle, die an der Rißspitze gebeugt und dort zu einer T-Welle modekonvertiert wurde
T	Echo der rückwandreflektierten T-Welle

1. Einführung

Das Materialverhalten bei Rißausbreitung wird auf der Grundlage der Bruchmechanik bewertet. Der Kennwert Bruchzähigkeit kennzeichnet den Riausbreitungswiderstand unter monotoner Belastung. Bei Auftreten vorkritischer Rißausbreitung haben sich Rißwiderstandskurven bewährt, die den Zusammenhang zwischen einem bruchmechanischen Parameter, z.B. dem J-Integral, und dem Rißfortschritt beschreiben. Für ihre experimentelle Bestimmung ist neben der Messung der aufgewandten Last und der Lastpunktverschiebung eine unabhängige Messung der während der Belastung erzeugten Rißverlängerung notwendig. Am zuverlässigsten, jedoch auch am aufwendigsten sind Verfahren, bei denen die Rißverlängerung direkt an der Bruchfläche ausgemessen wird. Zur Durchführung dieser Prüfverfahren wird eine große Anzahl identischer Proben benötigt, da jeder Versuch lediglich einen Meßpunkt zur J-Rißwiderstandskurve beisteuert. Die Nachteile der Methode, hoher Materialverbrauch und zeitlicher Aufwand, sind offensichtlich. Der kritische Anfangsbereich der Rißeinleitung wird nicht durch eine ausreichend hohe Meßpunktdichte nachvollzogen. Gerade dieser Bereich ist jedoch zur Einschätzung der Belastungsgrenzen duktiler Werkstoffe von hohem Interesse. Ein Rieinleitungskennwert, der den beginnenden Fortschritt eines bereits vorhandenen Anrisses erfassen soll, wird anhand des ersten Abweichens der Rißwiderstandskurve von der Rißabstumpfungsgerade (blunting-line) bestimmt.

Seit längerem wird an der Entwicklung und Vervollkommnung von Verfahren gearbeitet, die die Ausbreitung des Risses direkt während des Versuches zu messen gestatten. Diese Einprobenverfahren setzen eine möglichst kontinuierliche Erfassung einer Meßgröße voraus, die deutlich vom Rißfortschritt Δa abhängig ist, so daß die Rißausbreitung während des gesamten Versuchs mit hoher Auflösung aufgezeichnet werden kann. An die Anwendung derartiger Einprobenverfahren ist die Erwartung geknüpft, nicht nur die Rißwiderstandskurve, sondern auch einen wahren Rißinitiierungskennwert meßtechnisch erfassen zu können. Ihre Beeinflussung durch meßtechnisch oder versuchsmethodisch bedingte Nebeneffekte wird jedoch gleichzeitig kritisch bewertet. Neben erfolgreichen Anwendungen wird daher ebenso über die Infragestellung dieser Verfahren berichtet [1,2,3].

Die vorliegende Arbeit soll zeigen, daß Ultraschallverfahren geeignet sind, das Rißausbreitungsverhalten in bruchmechanischen Biegeproben aus duktilen Werkstoffen mit hinreichender Genauigkeit zu erfassen. Die Arbeit hat das Ziel, ein In-situ-Ultraschallverfahren zur Ermittlung stabilen Rißfortschritts für bruchmechanische Kleinproben in ISO-V-Geometrie zu entwickeln. Die Ultraschalltechnik ist eine der verbreitetsten Methoden in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Sie besitzt prinzipiell das Potential, die an bruchmechanische Einprobenverfahren formulierten Erwartungen zu erfüllen. Sie scheint besonders geeignet, da sie in ihrer Anwendbarkeit nicht auf einzelne Werkstoffgruppen beschränkt bleibt. Ultraschallmethoden liefern mehrparametrische Prüfergebnisse, die hinsichtlich ihrer Informationen über das Materialverhalten im Rißspitzenbereich in verschiedener Weise ausgewertet werden können. Zwischen der Meßgröße Signallaufzeit und der gesuchten Rißlänge besteht ein einfacher, monotoner und gut bekannter

Zusammenhang. Die in bruchmechanischen Versuchen vorliegende Meßsituation ist für das Erreichen einer hohen Meßgenauigkeit sogar außerordentlich günstig, da der Riß in seiner Lage und Ausbreitungsrichtung bekannt ist und so durch eine geeignete Probeninstrumentierung genau erfaßt werden kann. In der Vergangenheit wurden bereits Ultraschallaboranwendungen für verschiedenste Probengeometrien (Dreipunktbiegeprobe, CT-Probe, CCT-Probe, C-förmige Probe) zur Lösung spezifischer bruchmechanischer Aufgabenstellungen vorgestellt. Sie haben bisher jedoch kaum Akzeptanz in der experimentellen Bruchmechanik erlangt.

Die vorliegende Arbeit ordnet sich in Forschungsarbeiten zur Reaktorsicherheit ein. Die Bedingungen, unter denen das Ultraschallverfahren anzuwenden ist, sind besonders für die Erfassung des Beginns stabiler Rißausbreitung kritisch. Es wird mit bruchmechanischen Kleinproben (ISO-V-Geometrie) gearbeitet, wie sie in den Surveillanceprogrammen zur Reaktorsicherheit zum Einsatz kommen. Bei diesen Proben ist die Rißausbreitung durch ausgedehnte plastische Verformung begleitet. Das hat zur Folge, daß Rißnachweisverfahren, die üblicherweise bei der bruchmechanischen Prüfung eingesetzt werden, erhebliche Unsicherheiten bei der Versuchsauswertung bedingen, da sie die Rißausbreitung nicht unabhängig von plastischen Verformungseffekten erfassen. Zudem ist für die bruchmechanischen Kleinproben die Charakterisierung des Rißeinleitungs- und Rißausbreitungsverhaltens mittels Ultraschall-Einprobenverfahren allein aufgrund der geringen Probenabmessungen (Meßfehlereinfluß) noch nicht zufriedenstellend gelöst.

2. Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung

2.1 J-Integralkonzept der Fließbruchmechanik

Konzepte der Fließbruchmechanik beschreiben das Versagensverhalten von Bauteilen mit Rissen oder rißähnlichen Defekten bei deutlicher Plastifizierung. Diese Konzepte berücksichtigen, daß für Rißausbreitung neben der Energie zur Bildung neuer Bruchflächen beträchtliche Energieanteile zur Verlagerung und Ausweitung der plastischen Zone benötigt werden. Die am intensivsten untersuchten Konzepte sind die des J-Integrals nach Rice und das CTOD-Konzept nach Wells. Eine kritische Beschreibung dieser Konzepte befindet sich bei Kanninen [4].

Das J-Integral ist ein wegunabhängiges Energieintegral mit einem geschlossenen Integrationsweg um die Rißspitze (Abb. 2-1). Die Wegunabhängigkeit ermöglicht die Bewertung des rißspitzennahen Beanspruchungszustandes, ohne daß lokale Spannungen und Verzerrungen im Bereich der geometrischen Diskontinuitäten berechnet werden müssen [5].

$$J = \int_{\Gamma} (W_e dy - T_i \frac{du}{dx} ds) \quad (2.1)$$

- W_e - die auf das Volumen bezogene Formänderungsarbeit,
- u - der Verschiebungsvektor längs des Integrationsweges um die Rißspitze Γ ,
- ds - ein Linienelement des Integrationsweges,
- T_i - Komponenten des Spannungsvektors längs des Linienelementes ds ,
- x, y - kartesische Koordinaten.

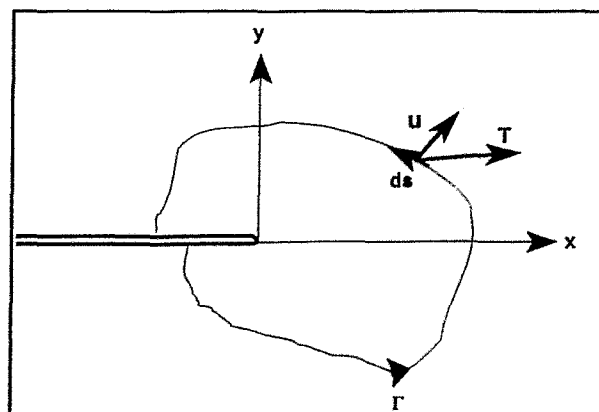


Abb. 2-1. Integrationsweg für das J-Integral

Von Rice wurde eine Beziehung angegeben, die eine vereinfachte Möglichkeit zur experimentellen Bestimmung des Rifeldparameters J bietet.

$$J = - \frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2.2)$$

B - Probendicke

In dieser Interpretation beschreibt das J-Integral den Unterschied der potentiellen Energie dU vor der Rißspitze bezogen auf den Rilngenunterschied um da bei gleichartiger Verformung zweier bis auf die Rißlänge identischer Proben.

Für die experimentelle Bestimmung des Wertes des J-Integrals hat sich dessen Zusammenhang mit der Verformungsarbeit U bewährt. Das J-Integral setzt sich aus einem elastischen und einem plastischen Anteil der Formänderungsenergie zusammen. In den Normenwerken finden elastische sowie plastische Verformungen in folgender Form Berücksichtigung. Für den ebenen Verformungszustand gilt [6]:

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{K^2}{E} (1 - \nu^2) + \frac{\eta U_{pl}}{B(W - a_o)} \quad (2.3)$$

- K - Spannungsintensitätsfaktor
- E - Elastizitätsmodul
- ν - Querkontraktionszahl
- a_o - Anfangsrißlänge (Kerb + Ermüdungsriß)
- η - von Probengeometrie und Belastung abhängiger Faktor,
 $\eta = 2$ für Biegeproben
- U_{pl} - plastischer Anteil der Formänderungsenergie U

Der Anwendung des J-Integrals sind Gültigkeitsgrenzen gesetzt, die sich aus der Abhängigkeit des Beanspruchungszustandes in unmittelbarer Rispitzenumgebung von Probengeometrie und Beanspruchungsart (Hutchinson-Rice-Rosengreen-Bedingungen) ableiten lassen [7].

In [6] wird eine Beziehung angegeben, die keine Partitionierung der Arbeit unter der Kraft-Durchbiegungskurve in einen elastischen und einen plastischen Anteil enthält und eine Korrektur des J-Integrals bezüglich des vorkritischen Rißfortschritts Δa vorsieht.

$$J = \frac{\eta U}{B_n(W-a)} \left[1 - \frac{(0.75 \eta - 1) \Delta a}{W - a_o} \right] \quad (2.4)$$

B_n	-	Probennettobreite, bei Proben mit Seitkerbung zu verwenden
W	-	Probenabmessung in Rißausbreitungsrichtung
Δa	-	Rißfortschritt

Das J-Integral-Konzept ist äquivalent mit dem Konzept der Rißöffnungsverschiebung (Crack Tip Opening Displacement). Das Konzept soll nur erwähnt werden, da das zur Berechnung des CTOD aus der am Probenrand meßbaren Kerbaufweitung verwendete geometrische Modell der Probenrotation im Rahmen dieser Arbeit von Bedeutung ist. Dabei wird angenommen, daß sich der Drehpunkt der beiden fiktiven Probenhälften während der Probendurchbiegung in einem Abstand $r(W-a)$ vor der eigentlichen Rißfront befindet. Der Faktor r wurde für Biegeproben zu 0.4 bestimmt [8].

Durch Ermittlung des J-Integrals (aus der Messung von Kraft, Lastpunktverschiebung und zunehmender Rißlänge) werden J-Rißwiderstandskurven (J-R-Kurven) aufgestellt. Sie charakterisieren innerhalb der Gültigkeitsgrenzen des J-Integralkonzepts den Rißwiderstand des Materials durch die Rißeinleitzähigkeit und durch den Rißausbreitungswiderstand und ermöglichen die Kennwertermittlung für den Beginn der Rißausbreitung sowie für stabile Rißausbreitung. Die J-R-Kurven erfassen den gesamten Bereich der duktilen Werkstoffschädigung mit den an der Spitze eines Risses ablaufenden mikrostrukturellen Schädigungsprozessen: Rißabstumpfung, Rißeinleitung und Rißausbreitung. Der J-Wert für Beginn stabiler Rißeinleitung kann als ein echter geometrieunabhängiger Werkstoffkennwert [5, 9] angesehen werden. Die J-R-Kurven gestatten demgegenüber nur bedingt die Übertragung der Versuchsergebnisse auf das allgemeine Bauteilverhalten [7], da sie von der Probengeometrie, der Probengröße und dem Beanspruchungszustand abhängig sind.

2.2 Ableitung von Rißinitiierungskennwerten

Als Materialwiderstand gegen Rißeinleitung (Bruchzähigkeit) wird der kritische Wert des J-Integrals bei Beginn der Rißausbreitung ermittelt. Der Punkt der Rißeinleitung ist jedoch aus der Kraft-Lastpunktverschiebungskurve nicht eindeutig ersichtlich. Zu seiner Bestimmung existieren verschiedene methodische Ansätze, deren Hintergrund zunächst durch Veranschaulichung des makroskopischen Rißausbreitungsprozesses veranschaulicht werden soll (Abb. 2-2.).

Die einzelnen, unter stetiger Lastzunahme ablaufenden Stadien der duktilen Rißausbreitung sind in Abb. 2-2. schematisiert und der J-R-Kurve gegenübergestellt. Im rißspitzennahen Bereich kommt es zur Ausbildung einer plastischen Zone, in der sich die Rißspitze durch intensive plastische Verformung abstumpft und vorwölbt, gleichzeitig können sich vor der Rißspitze Hohlräume bilden. Unter weiterer Energiezufuhr setzt an der Rißspitze Werkstofftrennung, d.h. duktile Rißinitiierung ein, wobei sich die nächstgelegenen Hohlräume mit dem Anriß verbinden. Die Rißabstumpfung ist abgeschlossen und hat ihren maximalen, kritischen Wert SZW_c (Stretch-Zone-Width) erreicht. Einige Werkstoffe (duktiler Gußeisenwerkstoffe, austenitische Stähle) weisen im Ablauf der Rißausbreitungsstadien die Besonderheit

auf, daß der bereits initiierte Riß durch Gleitbruchbnder erneut aufgefangen wird und ein weiteres Abstumpfen der Rißspitze auftritt [10].

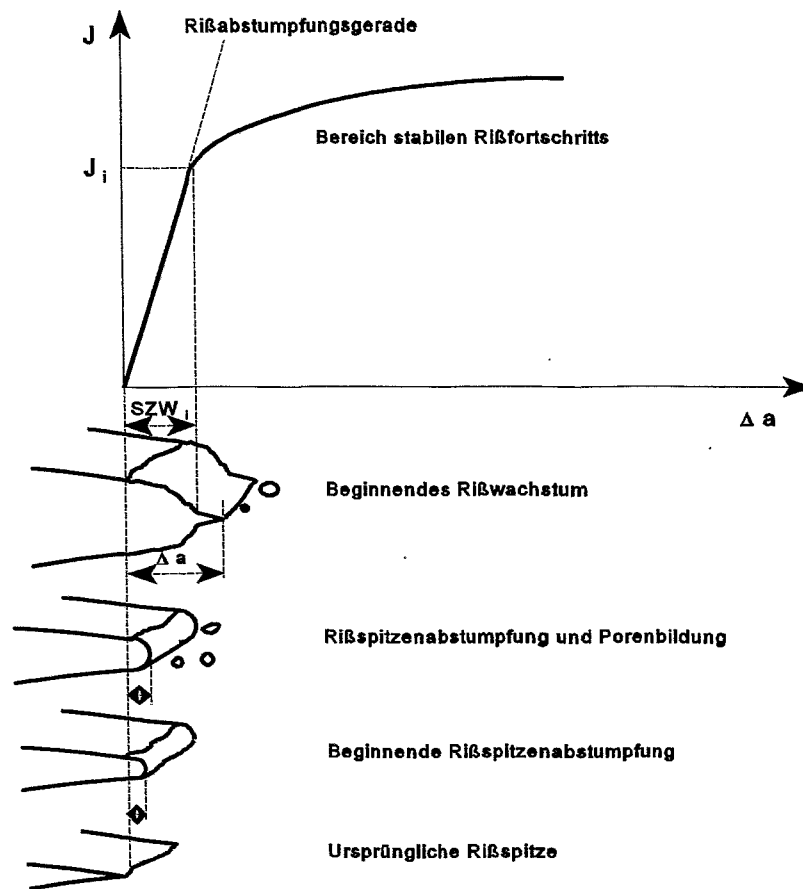


Abb. 2-2. Schematische Gegenüberstellung von J-Rißwiderstandskurve und Riwachstumsproze

U. a. Roos und Eisele schlugen den physikalischen Rieinleitungskennwert J_i als einen tatsächlichen Werkstoffkennwert vor, der sich auf der J-R-Kurve im Punkt $\Delta a = SZW_c$ ergibt [11,12], wobei für SZW_c ein Mittelwert aus mindestens neun über die Rißfront gleichverteilten Messungen eingesetzt wird. In einem Laborvergleich [13] wurde manifestiert, daß dieser Rißinitiierungskennwert J_i einen geometrie- und grenunabhngigen Werkstoffkennwert darstellt und daher zur Kennwertermittlung an bruchmechanischen Kleinproben anwendbar ist. Das Verfahren wird in der Prüfempfehlung EFAM GTP94 vorgeschlagen [14]. Eine Geometrieabhängigkeit der Kennwerte ergibt sich lediglich in Hinblick auf das Verhältnis von Anfangsrißlänge zu Probenbreite im Bereich $a/W < 0.45$ [15].

Der Bereich der Stretchzone wird auf der Bruchfläche mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmt. Die Vermessung bereitet jedoch oft Schwierigkeiten, da sich die Stretchzone nicht gleichmäßig entlang der Rißfront ausbildet oder abschnittsweise gar

nicht vorhanden sein kann. Bei Stretchzonenmessungen ist mit einem Fehler von $\pm 25\%$ zu rechnen [16].

Aufgrund der komplizierten Verfahrensweise der Ermittlung des physikalischen Rißinitiierungskennwertes ist die Ermittlung eines technischen Kennwertes in den Normenwerken ausdrücklich zugelassen. Der technische Rißinitiierungskennwert $J_{0,2}$ wird aus der J-R-Kurve bei einer Rißverlängerung (Rißvorwölbung + Rißfortschritt) von $\Delta a = 0.2$ mm bestimmt. Der technische Rißinitiierungskennwert $J_{0,2/BL}$ leitet sich aus dem Schnittpunkt der J-R-Kurve mit der um 0.2 mm verschobenen Rißabstumpfungsgerade ab [14,17].

Da die Kenntnis der Rißabstumpfungsgerade für die Ermittlung von technischen Rißinitiierungskennwerten von besonderer Bedeutung ist, wird hier auf ihre Herleitung gesondert eingegangen. Die Rißabstumpfungsgerade beschreibt das Werkstoffverhalten bei Rißabstumpfung im Anfangsbereich der J-R-Kurve durch einen linearen Anstieg. Die Nutzung eines linearen Zusammenhanges zur Beschreibung dieses Vorgangs wurde von Landes und Begley [18] vorgeschlagen und ist mit Abwandlungen bis heute in vielen Normen gebräuchlich. Das Modell wurde aus folgenden Überlegungen heraus abgeleitet: Als Rißfortschritt Δa bis zur Rißinitiierung wird der Radius der als halbkreisförmig angenommenen Rißspitze eingesetzt, so daß gilt:

$$\Delta a = \delta / 2 \quad (2.5)$$

Die Rißspitzenöffnungsverschiebung δ kann durch

$$\delta \approx J / \sigma_F \quad (2.6)$$

angenähert werden. Hieraus ergibt sich

$$J = 2 \sigma_F \Delta a \quad (2.7)$$

σ_F ist eine mittlere Fließspannung, die aus der technischen Dehngrenze $R_{p0,2}$ und der Zugfestigkeit R_m ermittelt wird.

$$\sigma_F = \frac{1}{2} (R_{p0,2} + R_m) \quad (2.8)$$

Gleichung 2.7 wurde nach zahlreichen experimentellen Untersuchungen durch eine Gleichung der allgemeineren Form

$$J = m \sigma_F \Delta a \quad (2.9)$$

bestätigt. Die Rißabstumpfunggerade hängt vom Verfestigungsvermögen des Werkstoffes ab, so daß der Anstiegsfaktor $m = 2 \dots 6$ betragen kann. In der Prüfpfehlung ESIS P2-92 [6] wird die Rißabstumpfunggerade nach der Gleichung:

$$\Delta a = 0.4 d_n^* J/E \quad (2.10)$$

ermittelt, die den Einfluß der Verfestigung und Rißspitzenabstumpfung des Materials durch die Größe d_n^* beschreibt. Die Norm schreibt eine komplizierte rechnerische oder grafische Ermittlung des Koeffizienten d_n^* vor. Landes schlug 1995 eine vereinfachte Beziehung vor [19]:

$$\Delta a = \frac{J}{3.75 R_m} \quad (2.11)$$

R_m ist die Zugfestigkeit.

Keine der Gleichungen ist in der Lage, den Kurvenanstieg aller Testmaterialien gleichermaßen gut zu beschreiben, die ESIS- Rißabstumpfunggerade scheint jedoch den physikalischen Vorgang der Rißspitzenabstumpfung am besten nachzuvollziehen. Kobayashi [20] schlägt vor, aufgrund der geringen Übereinstimmung experimenteller Ergebnisse mit der errechneten Rißabstumpfunggeraden die Werte überhaupt für jedes Material experimentell zu bestimmen.

Die Möglichkeit der direkten Messung von Rißinitiiierung und Rißverlängerung besteht bei der Anwendung eines kontinuierlichen Einprobenmeßverfahrens, bei dem aus dem Verhalten einer von der Rißverlängerung abhängigen Meßgröße auf einzelne Rißausbreitungsstadien geschlossen wird. Auf die Aussagefähigkeit einzelner Verfahren wird in folgenden Abschnitten eingegangen.

2.3 Prüfkonzept von Mehr- und Einprobenverfahren

Für die Ermittlung der J-R-Kurve ist die zuverlässige Ermittlung des während des Versuchs erzeugten Rißfortschritts in Abhängigkeit von der aufgetragenen Prüflast notwendig. Das am einfachsten zu realisierende und in allen Normen und Normenentwürfen aufgeführte Verfahren ist das Mehrprobenabbruchverfahren. Dabei liefert jede Probe einen Punkt der J-R-Kurve. Die einzelnen Versuche werden bei unterschiedlichen Stadien der Belastung abgebrochen. Die zur Probenverformung aufgewandte Energie wird aufgezeichnet und in der nachfolgenden fraktografischen Bruchflächenanalyse der erzeugte Rißfortschritt vermessen; die Werte werden entsprechend Gl. 2.4 weiterverarbeitet. Die Prüfnormen schreiben eine Mindestanzahl

an Experimenten und zusätzliche Gültigkeitsgrenzen für die einzelnen Versuche vor, so daß eine erhebliche Menge an Probenmaterial zu Verfügung stehen muß. Die auf diese Weise gewonnene J-R-Kurve erlaubt eine Aussage über das mittlere Reißwiderstandsverhalten des geprüften Werkstoffs.

Einprobenverfahren basieren dagegen auf der Messung einer von der stabilen Reißausbreitung abhängigen Größe, so daß die Reißverlängerung während eines Versuches weitgehend kontinuierlich erfaßt wird. Mit dem Bestreben, den Material- und Prüfaufwand zu senken (Inspektionen von im Betrieb befindlichen Bauteilen, Werkstoffentwicklung, Gefahrenstoffe), wurde die Entwicklung der Einprobenverfahren vorangetrieben. Mit einem Einprobenverfahren wird eine individuelle J-R-Kurve ermittelt, wodurch auch Informationen über Eigenschaftsschwankungen des untersuchten Werkstoffs gewonnen werden können. Die Methoden reagieren empfindlich auf lokale Gefügeunterschiede, die häufig Ursache für unerwartetes Versagen sind. Ein weiterer Vorteil der Einprobenverfahren ist, daß die physikalische Reißinitiierung und die Neigung der Reißwiderstandskurve aufgrund der erheblich höheren Anzahl an Meßpunkten zuverlässiger ermittelt werden.

Infolge dieser potentiellen Vorteile, die die Einprobenverfahren für eine rationelle bruchmechanische Kennwertermittlung besitzen, wurden sie in der Vergangenheit mehrfach gründlichen Untersuchungen unterzogen (z.B.[2, 21-25]). Teilweise werden in einem Versuch simultan mehrere Einprobenverfahren angewandt.

2.4 Experimentelle Einprobenverfahren zur Ermittlung von Reißwiderstandskurven

2.4.1 Teilentlastungsverfahren

Das Teilentlastungsverfahren ist ein sehr weit verbreitetes Einprobenmeßverfahren. Die Verfahrensweise ist in mehreren Standards (z. B. ASTM 813-89 und folgenden sowie ESIS P2-92) aufgeführt. Die Grundlage des Verfahrens bildet der Zusammenhang zwischen Anrißtiefe einer Probe und ihrer elastischen Nachgiebigkeit. Das Verfahren wurde 1976 von Clarke erstmals vorgestellt [26]. Die Probe wird während der bruchmechanischen Prüfung in regelmäßigen Abständen partiell ent- und wieder belastet. Aus den weitgehend linearen Abschnitten der Teilentlastungskurven wird die elastische Nachgiebigkeit C (Compliance) ermittelt (Abb. 2-3.). Die Reißlänge berechnet sich letztlich aus dem reziproken Wert des Anstiegs der Teilentlastungskurve (Gl. 2.11), wobei die Lastpunktverschiebung V und die Last P berücksichtigt werden müssen.

$$C = V/P \quad (2.12)$$

Der tatsächliche Zusammenhang zwischen Reißtiefe und Probennachgiebigkeit der Form $C = f(a/W)$ kann experimentell ermittelt werden oder steht bei bekannten K -Faktor als analytisch ermittelte Compliancefunktion zur Verfügung.

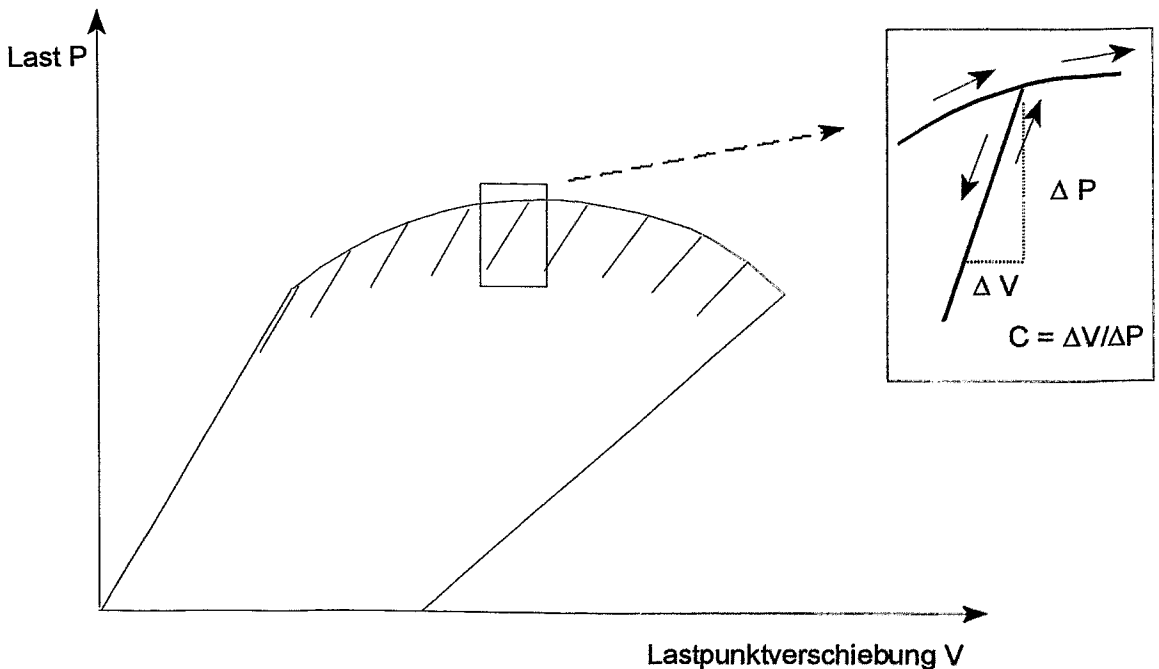


Abb. 2-3. Teilentlastungsverfahren, Schema eines Meßschriebs

Als Hauptvorteile des Verfahrens sind zu nennen:

- Außer den im bruchmechanischen Biegeversuch ohnehin benötigten Meßgrößen müssen keine zusätzlichen aufgezeichnet werden.
- Mit dem Teilentlastungsverfahren steht ein Einprobenmeßverfahren zur Verfügung, mit dem eine theoretische Genauigkeit der Rißlängenbestimmung von 0.01 mm erreicht werden kann [27].
- Das Teilentlastungsverfahren wird bei der bruchmechanischen Prüfung in einem breiten Temperaturbereich eingesetzt und steht als Prüfverfahren zur bruchmechanischen Werkstoffprüfung in aggressiven Medien zur Verfügung.

Als Nachteile des Verfahrens sind folgende Punkte zu nennen:

- Das J-Integral ist streng genommen nur für monoton steigende Belastung definiert; der nach einer Entlastung im plastischen Bereich vorliegende Eigenspannungsanteil wird nicht berücksichtigt [28, 29]. Um den Bruchvorgang selbst nicht signifikant zu beeinflussen, dürfen nach den Empfehlungen der Prüfnormen die teilweisen Entlastungen höchstens 10 - 20% der Maximallast erreichen [24]. Neuere Untersuchungen sagen jedoch aus, daß selbst vollständige Zwischenentlastungen die statische J-R-Kurve nicht verändern [30].

- Die Rißfortschrittsmessung erfolgt mit dem Teilentlastungsverfahren nur in diskreten Abständen.
- In der Anfangsphase des Teilentlastungsversuches treten systematische Meßfehler auf, die sich nur mit hohem Aufwand beseitigen lassen, bzw. zu scheinbarem negativen Rißwachstum führen können [1].
- Typischerweise werden mit dem Teilentlastungsverfahren Rißlängen bei sehr duktilem Material überschätzt und umgekehrt bei sprödem Material unterschätzt. Gründe dafür liegen in der Methodik der Nachgiebigkeitsmessung (Genauigkeit der Lastpunktverschiebungsmessung, Reibung im Meßsystem) [31].

2.4.2 Elektropotentialverfahren

Sehr zuverlässige Rißfortschrittsmessungen sind mit den Elektropotentialverfahren erreichbar. Sie sind in der ASTM E 647-91 [32] als Prüfverfahren zur Rißfortschrittsmessung bei Ermüdungsversuchen standardisiert, in der ASTM E 813-89 [17] und in der EFAM GTP 94 [14] zur Ermittlung von J_{IC} und in der ASTM E1737 - 96 [33] zur Ermittlung der J-R-Kurve beschrieben.

Die Grundlage der Elektropotentialverfahren bildet die Veränderung der Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten beiderseits des Risses einer angerissenen und stromdurchflossenen Probe bei Rißwachstum. Zwischen der aktuellen Rißlänge und der über dem Riß abgegriffenen Potentialdifferenz einer stromdurchflossenen Probe besteht ein reproduzierbarer Zusammenhang. Bei der Auswahl des geeigneten Meßverfahrens muß ein Kompromiß zwischen möglicher Meßgenauigkeit und experimentellem Aufwand geschlossen werden. Im wesentlichen haben sich zwei Methoden zur Messung des Rißfortschritts bewährt (Abb. 2-4.): das Wechselstrompotentialverfahren (ACPD) und das Gleichstrompotentialverfahren (DCPD).

Bei der ACPD-Methode wird durch einen hochselektiven Spannungsverstärker nur die zur Spannungsquelle frequenzsynchrone Potentialdifferenz abgegriffen, so daß Störfrequenzbereiche ausgeblendet werden. Ein Vorteil der Methode ist ihre hohe Genauigkeit. Nach [34] können mit der ACPD-Methode Ermüdungsrißlängen mit einer Genauigkeit bis zu 10 μm gemessen werden. Aufgrund des Skineffektes lassen sich mit zunehmender Arbeitsfrequenz genauere Ergebnisse erzielen.

Im Versuchsaufbau der Gleichstrompotentialmethode wird die Potentialdifferenz über dem Riß abgegriffen, verstärkt und registriert. Mit steigender elektrischer Leitfähigkeit des zu prüfenden Materials nimmt die Auflösung der Rißlängenmessung ab. Laut Norm muß für die Prüfung von Stahl eine Genauigkeit von 50 μm erreicht werden [32]. Eine Modifizierung erfährt die DCPD-Methode durch Anlegen eines pulsierenden Gleichstroms. Damit werden thermoelektrische Effekte unterdrückt und nur die durch die Rißverlängerung veränderte Potentialdifferenz [35- 37] gemessen.

Zur Erfassung der Rißlänge aus den Meßdaten muß unter Verwendung einer Vielzahl von Eichproben pro Material, Probenform und -größe eine Kalibrierkurve erstellt

werden [1]. Einige Prüfeempfehlungen sehen vor, jeden Versuch neu zu kalibrieren, indem der ermittelte Rißinitiierungswert als Punkt 0 der Rißausbreitung festgelegt wird [14, 38]. Im Fall der DCPD-Methoden kann außerdem der Zusammenhang zwischen Potentialdifferenz und Rißlänge analytisch hergeleitet werden. Dabei stehen die Gleichungen nach Johnson [39] und Hackett [40] zur Verfügung. Rißinitiierung wird durch ein Potentialminimum (ACPD, DCPD) oder durch einen Umschlagpunkt im Kurvenanstieg in der Last-Potentialkurve (DCPD) nachgewiesen. Es wird darauf verwiesen, daß nur für ferromagnetische Werkstoffe eine gute Übereinstimmung zwischen Potentialminimum und einsetzendem Rißwachstum besteht [41, 42]. Aufgrund des hohen experimentellen und Kalibrierungsaufwandes bei der Anwendung der Potentialverfahren (das elektrische Potential wird nicht nur durch das Restligament einer Probe bestimmt, sondern wird auch durch plastische Deformationen, thermisch sowie elektromagnetisch induzierte Spannungen beeinflusst [35]) besteht die Forderung nach umfassender Standardisierung der experimentellen Rahmenbedingungen [43, 44].

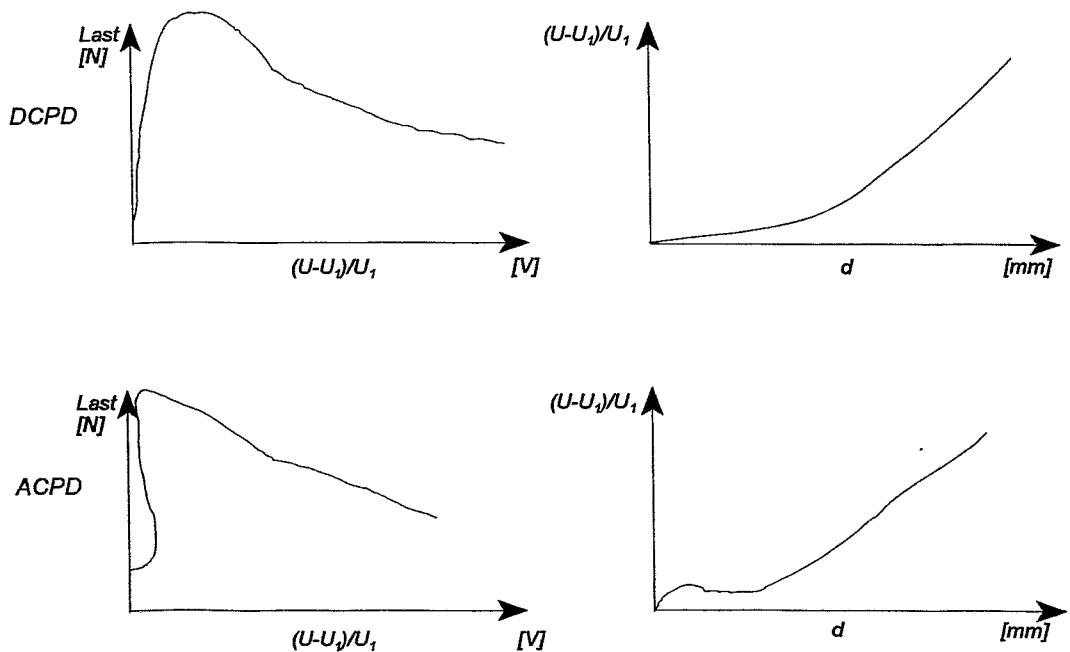


Abb. 2-4. Gegenüberstellung von Gleich- und Wechselstrompotentialverfahren (oben - unten), Schematisierte Last-Potentialverläufe (links) und Potential-Durchbiegungsverläufe (rechts) für eine Dreipunktbiegeprobe aus Stahl nach [42]

Der Vorteil beider Methoden liegt in folgendem:

- Die Elektropotentialverfahren ermöglichen eine kontinuierliche Rißfortschrittsermittlung in bruchmechanischen Einprobenuntersuchungen bereits von Beginn der Ermüdungsrißeinbringung an [45, 46].
- Die Verfahren sind in einem Temperaturbereich und bei der Prüfung in Umgebungsmedien einsetzbar.

Allgemeine Nachteile der Methoden sind:

- Prüfbar sind ausschließlich elektrisch leitfähige Werkstoffe.
- Die Ermittlung der Ausgangsrißlänge ist nicht mit Sicherheit möglich, da zu Versuchsbeginn vorliegende lokale Rißuferkontakte zu Veränderungen der Potentialdifferenz führen [34] und das Meßergebnis verfälschen können.
- Die Ermittlung der Rißinitiierung ist problematisch und bleibt Gegenstand vieler Untersuchungen [41,45,47-50]. Als Indikator für Rißbeginn gilt eine deutliche Änderung im Kurvenanstieg der Potential-Durchbiegungskurve, die jedoch noch nicht vollständig verstanden wird. [41, 51, 52]. In jedem Fall ist dieser Umschlagpunkt ein summarisches und dabei nicht separierbares Ergebnis des Einflusses sowohl plastischer Verformung als auch des Rißwachstums auf die elektrische Potentialdifferenz. Zu Widerstandsänderungen kann schon allein die Plastizität duktiler Materialien führen, ohne daß Rißwachstum vorliegt [35]. Der Beginn von Rißwachstum kann also nicht eindeutig bzw. nicht mit der geforderten Genauigkeit wiedergegeben werden [41, 42, 44, 45, 47-50, 53, 54].
- In verschiedenen Untersuchungen wird die Übereinstimmung zwischen Potentialminimum und Rißinitiierung in Frage gestellt, da der Umschlagpunkt im Kurvenanstieg von der Versuchsführung abhängt (Probengeometrie und Probenkontaktierung, Arbeitsfrequenz bei ACPD-Methode) [37, 43, 48].

2.4.3 Ultraschallverfahren

Ultraschallverfahren wurden erstmalig 1965 zur Messung von Ermüdungsrisen vorgeschlagen [55]. Die in bruchmechanischen Versuchen vorliegende Meßsituation ist generell für Ultraschallmeßverfahren außerordentlich günstig, da der Riß in seiner Lage und Ausbreitungsrichtung bekannt ist und so durch eine geschickte Probeninstrumentierung genau erfaßt werden kann. Mit Ultraschallprüfmethode können an den verschiedensten Probengeometrien (Dreipunktbiegeprobe, CT-Probe, CCT-Probe, C-förmige Probe) Messungen vorgenommen werden.

In der Vergangenheit wurde das Potential der Ultraschallverfahren bei der Lösung unterschiedlicher bruchmechanischer Aufgabenstellungen demonstriert. In mehreren Labors wurden Methoden zur Rißlängenmessung bei Ermüdungsrißausbreitung, zur Erfassung des Rißschließeffectes, zur Ermittlung des Rißinitiierungspunktes und zur Ermittlung einer J-R-Kurve entwickelt.

Die Ultraschallmeßverfahren haben jedoch keine weitreichende Verbreitung in der experimentellen Bruchmechanik erfahren. Im Gegensatz zu dem Teillastungsverfahren und den Potentialsondenmeßverfahren sind sie in den

Normenwerken als Einprobenverfahren nicht zur Ausführung vorgeschlagen oder gar im Detail beschrieben worden, allenfalls werden sie erwähnt [17 und folgende, 56].

In Kapitel 3 werden Ultraschallmeßverfahren zur Rißinitiierungsermittlung und zur Ermittlung einer J-R-Kurve ausführlich dargestellt.

2.5 Kurvenanalytische Verfahren

Alternativ werden verschiedene Methoden der Ermittlung der Rißeinleitung oder sogar des gesamten Rißfortschritts über einen Vergleich von Meßkurven mit analytischen Voraussagen vorgeschlagen. Die Rißaufweitung einer Probe ist von den Belastungsbedingungen, der Probengeometrie und den Verformungsmechanismen abhängig, so daß prinzipiell ein funktionaler Zusammenhang erstellt werden kann, der die Ermittlung von Rißeinleitung und Rißfortschritt allein aus der Kraft-Rißaufweitungskurve bzw. Kraft-Lastpunktverschiebungskurve ermöglicht.

Es existieren verschiedene kurvenanalytische Methoden, mit denen aus der Auswertung des Kraft-Rißaufweitungsverlaufes ein Rißinitiierungspunkt bestimmt wird.

- In der von G. Krüger und W. Löbner vorgestellten Methode des dritten Knicks [57] geht man davon aus, daß der Zusammenhang zwischen Kraft und Rißaufweitung durch drei Hauptprozesse beeinflusst wird. Bei doppelt-logarithmischer Auftragung der Last-Rißöffnungskurve werden drei Knickpunkte deutlich, die den unterschiedlichen Versuchsstadien: elastische Rißaufweitung, Rißaufweitung durch plastische Verformung und Rißaufweitung durch stabiles Rißwachstum zugeordnet werden. Der dritte Knickpunkt kennzeichnet nach dieser Verfahrensweise die Rißinitiierung.
- Bei der Compliance-Changing-Rate-Methode wird ein Zusammenhang zwischen der Last und einer Änderung der momentanen Probennachgiebigkeit formuliert [58]. Aus der grafischen Darstellung der Nachgiebigkeitsänderung über der Lastpunktverschiebung wird ein Übergangspunkt der Nachgiebigkeitsänderung aufgrund von Verfestigung zu einer Nachgiebigkeitsänderung aufgrund einer Querschnittsverminderung bestimmt. Dieser Übergang wird als Rißinitiierung gewertet. Die Gültigkeit der Theorie wurde an CT-Proben demonstriert.
- Bei einer von Lai et. al. vorgestellten Methode [59] wird ein Potenzzusammenhang zwischen der Lastpunktverschiebung und der bezüglich des Probenquerschnittes normierten Last formuliert, mit dem ein subkritisches Rißwachstum beschrieben wird. Ein Rißinitiierungskennwert wird aus der bei Versuchsende vorliegenden Last, der entsprechenden Lastpunktverschiebung und dem Rißfortschritt sowie den aus der grafischen Darstellung der Lastpunktverschiebung über der normierten Last ermittelten Koeffizienten des Potenzzusammenhangs ermittelt. Der Zusammenhang wurde für SENB-Proben hergeleitet.
- Von G. Ullrich und K. Krompholz wurde ein Initiierungskennwert auf der Basis des Theorems der übereinstimmenden Zustände vorgestellt [60]. Für CT- sowie SENB-Proben kann auf den energetischen Zustand bei Rißinitiierung

geschlossen werden, wenn auf der Grundlage energetischer Gleichgewichtsbetrachtungen zwei übereinstimmende Zustände des instabilen Verhaltens, der Höchstlastpunkt K_{max} bei linear-elastischem Verhalten und der Höchstlastpunkt K_{max} bei elastisch-plastischem Verhalten, festgelegt werden. Mittels trigonometrischer Beziehungen wird aus der grafischen Darstellung des Spannungsintensitätsfaktors über der Lastpunktverschiebung ein elastisches Spannungsniveau entnommen, daß zur Berechnung des Reißinitiierungskennwertes nach dieser Verfahrensweise benötigt wird.

Wenige analytische Verfahren gestatten sogar die Ermittlung einer vollständigen J-R-Kurve aus der Kraft-Rißaufweitungskurve mit Hilfe von berechneten oder experimentell bestimmten Modellkurven:

- Bei der Key-Kurve-Methode [61] wird angesetzt, daß die Last eine Funktion der Rißaufweitung und der Rißlänge ist. Zunächst wird eine Schar von Last-Rißaufweitungsdigrammen mit abgestuften, aber jeweils konstante Rißlängen berechnet oder experimentell ermittelt. In diese Kurvenschar der Key-Curves wird eine tatsächliche, im Experiment ermittelte Kraft-Rißaufweitungskurve eingetragen. Die dabei entstehenden Schnittpunkte mit der Kurvenschar entsprechen den im Versuch erreichten jeweiligen Rißlängen.
- Bei der Methode der Linearen Normierung [62] wird die Last als eine Funktion der Rißlänge und der plastischen Verformung aufgefaßt und ein linearer Zusammenhang zwischen der Änderung der auf die Rißlänge normierten Last und der Endrißverlängerung formuliert und experimentell bestätigt. Dieser Zusammenhang kann in einem Diagramm mehrerer rechnerisch ermittelter Kurvenscharen der Laständerung über der Rißverlängerung, die jeweils für eine Last ermittelt wurden, dargestellt werden. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit den Modellkurven liefert den aktuellen Rißfortschritt.

Alle diese kurvenanalytischen Verfahren haben berechtigterweise ihren Anwendungsbereich:

- Durch die Anwendung dieser Normierungskonzepte läßt sich der experimentelle Aufwand und teilweise auch der Materialaufwand bei der Meßwertgewinnung einschränken.
- Die Verfahren können dort erfolgreich eingesetzt werden, wo mit den experimentellen Einprobenverfahren nach dem derzeitigen Stand der Technik kein Rißfortschritt gemessen werden kann (mit Teilerfolgen wurden einzelne Verfahren auf den dynamischen Kerbschlagbiegeversuch angewandt [63, 64]).
- Die Normierungsverfahren ermöglichen zudem, die in früheren Versuchen aufgezeichneten Meßergebnisse unter neuen Gesichtspunkten auszuwerten.

Nachteilig wirkt sich aus, daß die aufgeführten Methoden von den Autoren jeweils an verschiedenen Materialien und an verschiedenen Probenformen verifiziert worden sind und eine Gegenüberstellung bzw. Systematisierung von erreichbaren Genauigkeiten, Vor- und Nachteilen der einzelnen Normierungskonzepte noch nicht vorgenommen worden ist. Die kurvenanalytischen Verfahren basieren auf einer Vielzahl von

Modellannahmen und mathematischen Vereinfachungen, die sich auf die Zuverlässigkeit der Ergebnisse auswirken müssen. Nach Möglichkeit sollte den experimentell ermittelten Ergebnissen gegenüber den Ergebnissen der Kurvenanalyse der Vorrang gegeben werden.

3 Rißfortschrittsmessung auf der Grundlage des Ultraschalls

3.1 Grundlagen des Laufzeit-Beugungs-Verfahrens

Ultraschall breitet sich in Form mechanischer Schwingungen einzelner Stoffteilchen aus. Auf die Ausbreitung der Ultraschallwellen sind die für Licht gültigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Reflexion und Brechung übertragbar. Aufgrund des tensoriellen Charakters eines Schallwellenfeldes kommen einige Besonderheiten hinzu: Im Festkörper kann außer Longitudinalwellen (L-Wellen) eine weitere Art von Volumenwellen, die Transversalwelle (T-Welle), existieren. Es können zwei T-Wellen mit unterschiedlicher Polarisierungsrichtung (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht zueinander) entstehen. Bei schrägem Einfall einer L-Welle auf eine Grenzfläche (Winkelprüfkopf) entstehen im allgemeinen eine reflektierte L-Welle, eine reflektierte und modekonvertierte T-Welle, eine gebrochene L-Welle, eine gebrochene und modekonvertierte T-Welle. Die Polarisierungsrichtung der reflektierten und der gebrochenen T-Welle liegt in der Einfallsebene, d. h. derjenigen Ebene, die durch Einfallrichtung und Grenzflächennormale aufgespannt wird. Bei einem kritischen Einfallswinkel wird anstelle der gebrochenen T-Welle eine Grenzflächenwelle (Rayleighwelle) angeregt.

Fällt eine Ultraschallwelle auf einen Riß oder ein spaltförmiges Hindernis, so tritt außer Reflexion und Modewandlung auch Rißspitzenbeugung auf. Die einfallende Schallwelle wird an den Rißspitzen in alle Ausfallwinkel, bis auf wenige diskrete Ausnahmen, gebeugt [65]. In Abb. 3-1. ist dieser Fall für eine einfallende T-Welle dargestellt. Die Darstellung entspricht einem Ausschnitt aus dem Rißspitzenbereich in Abb. 3-2., in dem die in dieser Arbeit vorliegende Prüfsituation schematisiert ist. Die unter 45° einfallende T-Welle in Abb. 3-1. ist in der Zeichnungsebene polarisiert, wie es der Anregung gemäß Abb. 3-2. entspricht. Die T-Welle erzeugt

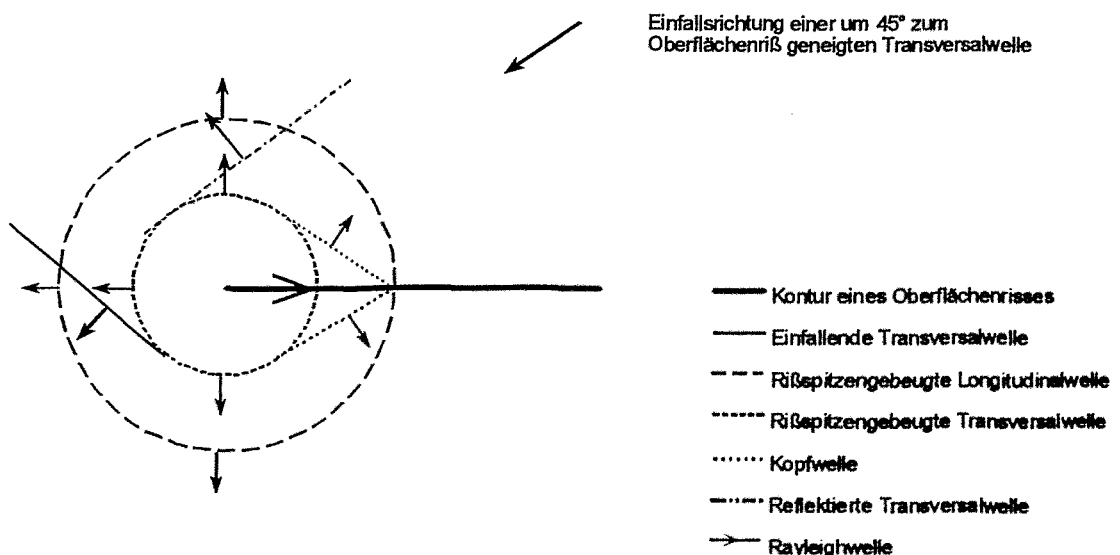


Abb. 3-1. Schema der Schallwellenausbreitung an einem Spalt nach Achenbach [65]

bei Einfall auf die Rißspitze eine kreisförmige T-Wellenfront und eine dieser vorausseilenden L-Wellenfront. Ein Teil der einfallenden T-Welle passiert den Riß. Ein Teil wird an der Rißfläche reflektiert. Bei einem Einfallswinkel von 45° wird dabei keine L-Welle reflektiert. Außerdem entstehen Rayleighwellen entlang der Rißufer und eine sogenannte Kopfwelle, die der Tatsache Rechnung trägt, daß die gebeugte L-Welle nicht die Randbedingungen an der Oberfläche erfüllt. Im Rahmen dieser Arbeit sind die in Richtung Empfangswandler gebeugten L- und T-Wellen von besonderer Bedeutung (Abb. 3-2.).

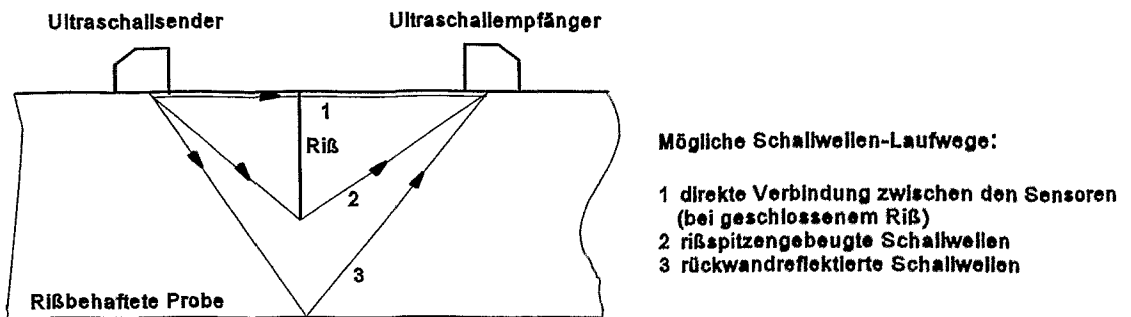


Abb. 3-2. Strahlengangdiagramm in rißbehafteten Proben

Rißspitzenechos haben eine sehr geringe Intensität, die bis zu 20 dB geringer ist als das reflektierte Hauptecho [66]. Die Intensität der rißspitzengebeugten Echos ist in starkem Maß vom Einfallswinkel des anregenden Ultraschallimpulses und Beugungswinkel, unter dem das Echo empfangen wird, abhängig [67]. Nach [68] wird die höchste Meßgenauigkeit der Rißlängenmessung im Symmetriefall von Einfall- und Beugungswinkel = 45° erreicht. Das T-Wellenecho ist in einem großen Winkelbereich von ca. $10 - 80^\circ$ auswertbar, im Winkelbereich zwischen ca. $40 - 60^\circ$ ist die Amplitude des gebeugten T-Wellenechos am höchsten.

Wird eine L-Wellenfront an einer Rißspitze gebeugt, findet ein Phasensprung des gebeugten Echos um 180° statt. Werden T-Wellen gebeugt, tritt der Fall der Phasenumkehr des gebeugten Signals in Abhängigkeit von Einfalls- und Beugungswinkel nur teilweise ein. Das Diagramm Abb. 3-3. veranschaulicht die Abhängigkeit der Phasenlage des gebeugten T-Wellenechos von Einfall- und Beugungswinkel der Wellenfronten [69]. Abb. 3-3. zeigt einen Konturplot zur Darstellung des Phasensprungs der an der Rißspitze gebeugten Transversalwellen. Die gestrichelten

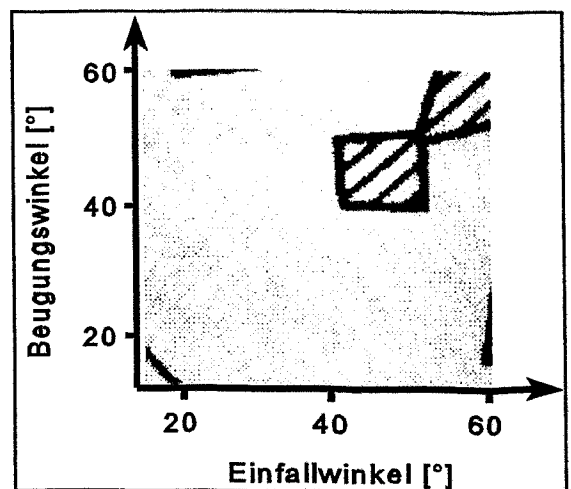


Abb. 3-3. Konturplot zur Darstellung des Phasensprungs an der Rißspitze gebeugter T-Wellen [69]

Bereiche kennzeichnen den Winkelbereich, in denen die Welle einen Phasensprung um 180° erleidet. Bei Symmetrie von Einfall- und Beugungswinkel tritt hiernach ab einem Winkel von ca. 40° der Fall der Phasenumkehr ein. Anhand dieser Darstellung läßt sich sehr gut verdeutlichen, daß zur besseren Rekonstruierbarkeit experimentell ermittelter Echofolgen eine symmetrische Meßanordnung von Sende- und Empfangswandlerpaaren vorteilhaft ist.

Das gebeugte Rißspitzensignal erlangt seine herausragende Bedeutung aufgrund der Tatsache, daß die wesentlichen Informationen über das Wachstum eines Risses aus dem Rißspitzenbereich gewonnen und so von rißspitzengebeugten Signalen getragen werden. Das Prinzip wird von der "Time-of-Flight-Diffraction-Technique" genutzt, mit der aus der Laufzeit eines an der Rißspitze gebeugten Ultraschallimpulses Risse lokalisiert und ihre Länge ermittelt wird (Abb. 3-2.) [70, 71].

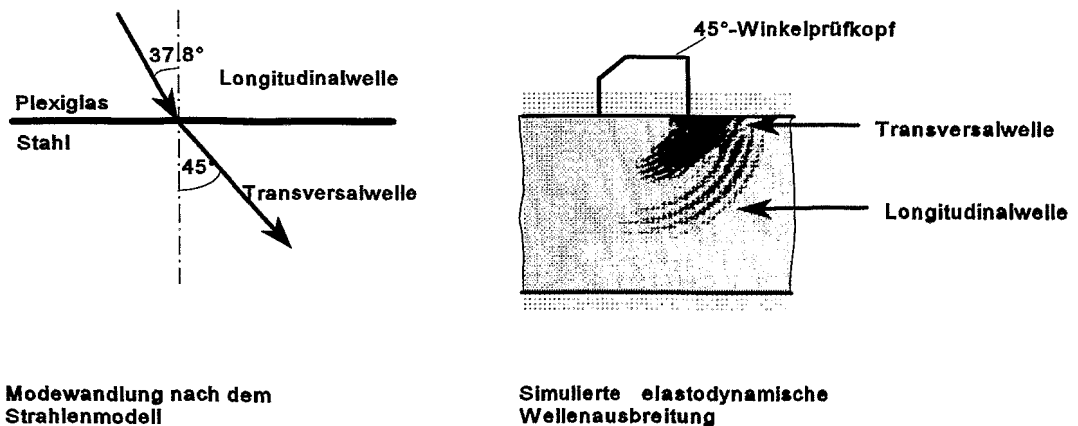
3.2 Numerische Simulation der Wellenausbreitung

Der Darstellung der Wellenausbreitung in Abb. 3-2. liegt implizit die Vorstellung des Strahlenmodells und des Modells der Ausbreitung ebener Wellen zugrunde. Beide Modelle stellen Idealisierungen dar. In der Realität werden Wellenfronten lokal angeregt und breiten sich in endlich großen Werkstücken aus, so daß mit endlichen und nicht ideal ebenen Wellenfronten gearbeitet wird.

In Bild 3-4. sind am Beispiel der Erzeugung einer um 45° geneigt eingeschallten T-Welle zwei Interpretationsmöglichkeiten gegenübergestellt, die anhand des Strahlenmodells und die umfassendere Beschreibung des Vorgangs mit Hilfe der EFIT-Methode (Elastodynamische Finite Integrations-Technik). Während mit dem Strahlenmodell die Grundtendenz der Wellenausbreitung erklärbar ist, lassen sich bei Berücksichtigung endlicher, nicht ideal ebener und mehrfrequenter Wellenfelder (EFIT-Methode) eine Reihe weiterer wesentlicher Ausbreitungseffekte erkennen und verstehen.

Im Rahmen der Elastodynamik werden die Wellenfelder auf der Grundlage der elastodynamischen Bewegungsgleichungen (Hookesches Gesetz und Newton-Cauchy-Gleichung) beschrieben. Zur rechnerischen Simulation realistischer Prüfexperimente werden die Grundgleichungen der linearen Elastodynamik zumeist mit direkten numerischen Lösungsverfahren gelöst. Der numerische Modellierungscode EFIT ist ein Werkzeug zur quantitativen Modellierung der Anregung, Ausbreitung und Streuung von Ultraschallwellen [72]. In diesem Programmcode wird die Ausbreitung elastischer Wellenfelder unter Nutzung der Finiten Integrationstechnik numerisch gelöst. Die zeitliche Diskretisierung wird mit einem Finiten-Differenzen-Schema durchgeführt. Die zu untersuchende Testgeometrie wird dabei in kubische Elementarzellen zerlegt. Mit zwei gegeneinander versetzten diskreten Gittern lassen sich die in integraler Form erstellten elastodynamischen Bewegungsgleichungen lösen. Der vorherrschende

Feldzustand wird dann durch wechselseitiges Errechnen der um je eine halbe Gitterzelle versetzten Komponenten von Teilchengeschwindigkeitsvektor und Spannungstensor iterativ weiterverfolgt. Im Ergebnis liegen die Werte des elastodynamischen Feldes, Teilchengeschwindigkeit und Spannungstensor, für jeden Zeitschritt an jedem Punkt des Gitters vor. Durch eine Grauwertskalierung des Betrages des Teilchengeschwindigkeitsvektors ist es möglich, die Ultraschallausbreitung im Festkörper in zeitlicher Folge als "Schnappschüsse" zu veranschaulichen. In der vorliegenden Arbeit werden alle Simulationen in einer zweidimensionalen Betrachtung durchgeführt.



Modewandlung nach dem Strahlenmodell

Simulierte elastodynamische Wellenausbreitung

Abb. 3-4. Anregung einer geneigten Transversalwelle nach dem Strahlenmodell und dem Modell der elastodynamischen Wellenausbreitung

Mit dem EFIT-Modellierungscode ist ein Werkzeug geschaffen worden, daß eine umfassende Simulation konkreter Prüfsituationen erlaubt. Mit dem Modellierungscode lassen sich wesentliche prüfmethodische Einflußfaktoren, wie die endliche Ausdehnung des Prüfkopfes, seine Impulsform, die Bildung mehrfrequenter Wellenfelder sowie konkrete geometrische Gegebenheiten berücksichtigen [73].

Zur Interpretation von Simulationsergebnissen kann es aus Gründen der Übersichtlichkeit von Vorteil sein, die Ergebnisse zunächst einmal mit Methoden der akustischen Wellenausbreitung zu erzeugen, in denen nur L-Wellen zugelassen werden.

3.3 Ultraschallverfahren zur Rißfortschrittsermittlung

Ultraschallverfahren fanden bereits Eingang in verschiedene Bereiche der experimentellen Bruchmechanik (Ermüdungsrißausbreitung, duktiles Rißwachstum).

Nachfolgend werden für diese Arbeit wichtige Verfahren nach der Art des zur Messung ausgenutzten Schallausbreitungseffektes in Reflexions-/Transmissions- und Beugungsverfahren gegliedert, nach der Art der Signalauswertung in Amplituden- und Laufzeitverfahren unterschieden und nach dem Zeitpunkt des Erscheinens der Publikation (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) aufgeführt. In Tabelle 3-1. ist eine Übersicht über die Entwicklung von Ultraschallverfahren zur Rißausbreitungsmessung in der experimentellen Bruchmechanik zusammengestellt.

3.3.1 Reflexions-/Transmissionsverfahren

Die ersten Anwendungen der Ultraschalltechnik zu bruchmechanischen Fragestellungen (1962) betrafen die Detektion von Ermüdungsrißausbreitung, indem die Amplitude eines am Riß reflektierten Schallstrahls ausgewertet wurde [74].

Klima et al. stellten erstmalig 1965 ein Ultraschallmeßprinzip zur Beobachtung von Ermüdungsrißausbreitung vor [75], dessen Weiterentwicklung bereits die Detektion der Rißinitiierung bei duktilem Rißfortschritt ermöglichte. Yasunaka et. al. befestigten einen Prüfkopf gegenüber der Rißfront (End-on-Methode, siehe Abb. 3-5.) und konnten durch Aufzeichnung der Amplitudenänderung des reflektierten Signals einzelne Rißausbreitungsstadien erkennen [76]. Zur Rißinitiierungsmessung an SENB-Proben modifizierten die Autoren das Amplituden-Reflexionsverfahren durch Schrägeinschallung des Schallimpulses.

Salzmann et al. [77] nutzten die sogenannte Top-on-Methode (Abb.3-5.), bei der ein Prüfkopf oder ein Prüfkopfpaar so befestigt werden, daß der Schallstrahl senkrecht auf die Rißfront gerichtet ist und der Riß bei Ausbreitung in den Schallstrahl hineinwächst. Beginnendes Rißwachstum läßt sich demnach an der Amplitudenänderung des zum Senderprüfkopf reflektierten oder des zum Empfängerprüfkopf transmittierten Schallstrahls erkennen. Diese Methode läßt sich prinzipiell auch zur Ermittlung der Rißausbreitungsgeschwindigkeit nutzen, wenn man mehrere Prüfköpfe über die Probenfront verteilt anordnet und die Zeitpunkte markanter Signaländerungen mißt .

In verschiedenen Arbeiten wurde die gemeinsame Anwendung der Top-on- und der End-on-Methode zur Informationsgewinnung vorgeschlagen [78,79]. Hirano entwickelte ein Verfahren, in dem er durch Kombination der Amplituden- und Laufzeitauswertung in dieser Anordnung Rißschließen untersucht und Rißfortschritt mißt. Underwood [80] schließt aus der Amplitudenänderung in End-on-Anordnung auf Rißinitiierung und aus der Laufzeit des rißspitzengebeugten Signals auf den aktuellen Rißfortschritt.

In [3] wird die mit den Reflexions-/Transmissionsmeßverfahren auf der Grundlage der Amplitudenauswertung erreichbare Meßgenauigkeit zur Rißfortschrittsermittlung bereits als ungenügend eingeschätzt. Dabei ist eine gute Meßgenauigkeit dann zu erwarten, wenn plastische Verformungen während der Prüfung weitgehend klein

bleiben, oder die Auflagefläche des Prüfkopfes klein gegenüber den Werkstoffverformungen an der Probenrückseite ist. Der Übergang von Rißspitzenabstumpfung zu Rißinitiierung ist mit Amplitudenverfahren kaum separierbar. Die Rißinitiierungsermittlung anhand der Amplitude des reflektierten oder transmittierten Rißspitzensignals setzt eine genügend breite Rißspitzenaufwölbung voraus, um eine deutliche Änderung der Signalintensität zu erhalten.

Ebenfalls den Amplituden-Transmissionsverfahren zuzuordnen ist eine Methode von Rehbein et al. [82], die mit Hilfe der analytischen Signalverarbeitung aus der Frequenzabhängigkeit des Transmissionskoeffizienten auf das Wachstumspotential von Ermüdungsrissen schließen.

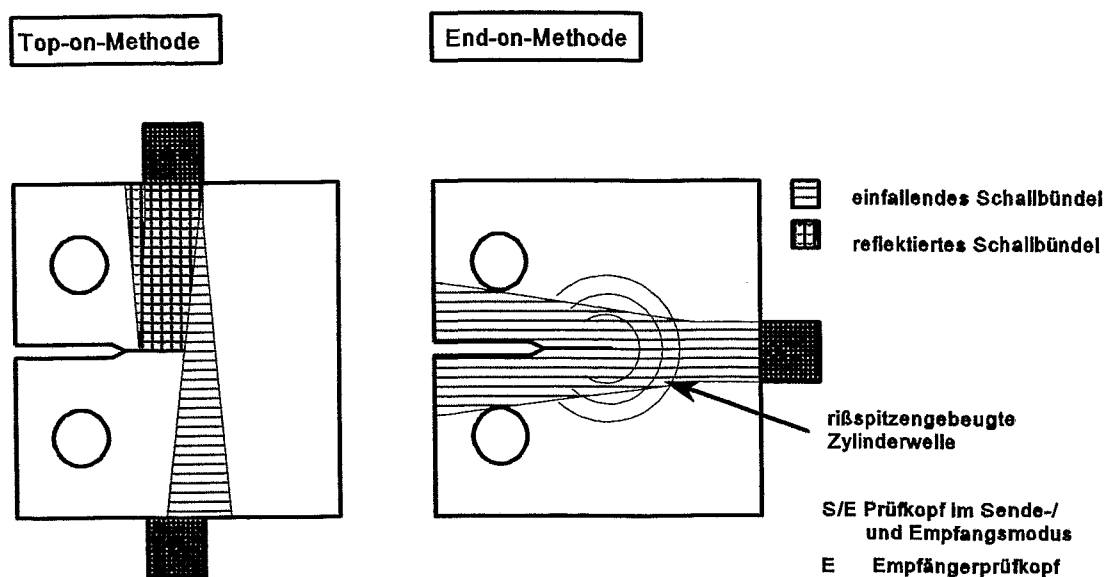


Abb. 3-5. Angewandte Ultraschallinstrumentierung an CT-Proben

3.3.2 Amplituden-Beugungsverfahren

Den Amplituden-Beugungsverfahren liegt der Effekt der Rißspitzenbeugung zugrunde. Es wurden mehrere Ultraschallverfahren entwickelt, mit denen unter Ausnutzung der Amplitude des rißspitzengebeugten Signals Rißinitiierung bzw. Rißschließen detektiert wird [83,84]. Ein hervorragendes, anwendungsreifes Verfahren "MU3F" (Measurement by Ultrasound Focused on Fatigue Front) zur Rißfortschrittsermittlung an CT-Proben wurde von de Vadder entwickelt [85,86].

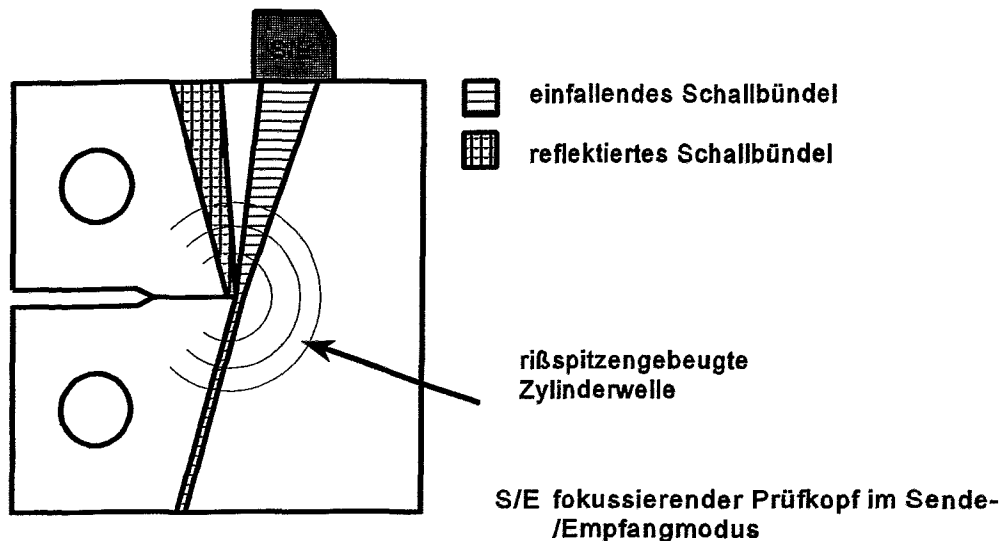


Abb.3-6. "MU3F", Schrägeinschallung eines fokussierten Schallbündels

Durch Schrägeinschallung eines fokussierten Schallbündels auf die Rissfront wird erreicht, daß ein Anteil des gebeugten Rissspitzensignals zum Prüfkopf zurück gebeugt wird und registriert werden kann (Abb. 3-6.). Durch Längsscannen entlang der Probenseitenfläche kann das sich verändernde Amplitudenmaximum verfolgt werden, das die jeweils aktuelle Position der Rissspitze wiedergibt. Zusätzlich wird durch Scannen entlang der Probenbreite die aktuelle Form der Rissfront erfaßt. Mit diesem Verfahren läßt sich nach Angabe der Autoren der duktile Rißfortschritt mit einer Genauigkeit von 100 µm ermitteln, der Beginn von Rißwachstum mit einer Genauigkeit von 50 µm. Allerdings verhindern der hohe experimentelle Aufwand (es wird in Tauchtechnik geprüft) und die Tatsache, daß das Verfahren nicht auf kleine CT- und SENB-Proben übertragbar ist, seinen universellen Einsatz in der bruchmechanischen Werkstoffprüfung. Die komplizierte Abscanteknik und die nur diskontinuierliche Messung des Rißfortschrittes beschränken die Anwendbarkeit der Methode auf kleine Rißausbreitungsgeschwindigkeiten (Ermüdungs-rißausbreitung, quasistatische Rißausbreitung).

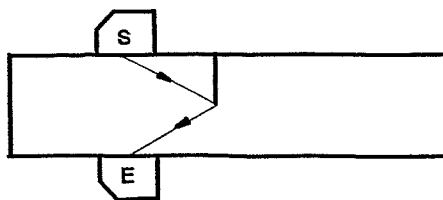
3.3.3 Laufzeit-Beugungsverfahren

Günstigere Voraussetzungen zur Ermittlung von Rißfortschritt bietet die Messung der Laufzeit eines Rissspitzensignals [86, 87]. Der Effekt der Beugung einer einfallenden Welle zu einer Zylinderwelle in nahezu alle Richtungen ermöglicht eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten des Meßprinzips an unterschiedlichen Probenformen. In ausschließlich für CT-Proben angepaßten Versionen wird ein Ultraschallimpuls auf die Rissspitze gelenkt und die Laufzeit des zum Sende-

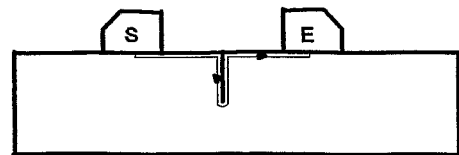
/Empfangsprüfkopf zurückgebeugten Anteils des Rißspitzensignals zur Rißfortschrittsmessung herangezogen [86]. In [87] wird der Beugungseffekt zur Ermittlung des Rißprofils oberflächenverbundener Risse genutzt.

In der von Silk vorgeschlagenen TOFD-Technik [67] werden ein Ultraschallwandlerpaar (Sender- und Empfängerprüfkopf) beidseitig des Risses so positioniert, daß ihr Schallfeld den Riß überstreicht (Abb. 3-2.). In nicht rißbehafteten Werkstücken oder bei geschlossen vorliegendem Riß werden als einziges die Signale der Kriechwelle 1 und darauffolgend die der rückwandreflektierten Wellen 3 empfangen. Bei geöffnetem Riß kann die Kriechwelle 1 nicht empfangen werden, statt dessen werden in zeitlicher Reihenfolge vor den rückwandreflektierten Signalen rißspitzengebeugte Signale detektiert. Silk nutzte den Effekt der Rißspitzenbeugung zur kontinuierlichen Inspektionen an Großanlagen und erreicht bei der Rißlängenüberwachung eine Meßgenauigkeit von bis zu 100 µm [88].

In Abwandlung der von Silk favorisierten Meßanordnung an Biegeproben wurde von Lien [90] vorgeschlagen, ein Sender-/Empfängerpaar auf einer Probenhälfte an der Probenoberfläche bzw. der Rückseite anzubringen, um so die empfangenen Reflexions- und Beugungssignale zur Einschätzung des Rißwachstumspotentials



a. Probeninstrumentierung zur Einschätzung des Rißwachstumspotentials nach Lien [90]



b. Probeninstrumentierung zur Rißinitiations- und Rißfortschrittsmessung nach Date et. al [91]

Abb. 3-7. Ultraschallrißfortschrittsmessungen an SENB-Proben

von Ermüdungsrissen und der Ausdehnung der plastischen Zone zu nutzen (Abb. 3-7.a). Bei Rißfortschrittsmessungen an Ermüdungsrissen wurde eine Genauigkeit von 20 µm erreicht.

Für Biegeproben ist eine weitere Veränderung der TOFD-Technik denkbar, indem die Laufzeit einer sich entlang der Probenoberflächen und Rißfronten ausbreitenden und an der Rißspitze gebeugten Rayleighwelle ausgewertet wird (Abb. 3-7.b). Prinzipiell trägt diese Welle Informationen sowohl über Rißbildungsvorgänge als auch Rißausbreitungsvorgänge an der Rißspitze. In [91] nutzte man die Laufzeit der Oberflächenwelle zur Rißlängenmessung an Biegeproben (40x20x160 mm³), wobei Rißlängen bis zu ca. 1,2 mm mit einer Genauigkeit von 100 µm detektiert werden konnten. Diese Art der Rißfortschrittsmessung kann jedoch für kleine Biegeproben (10x10x55 mm³) nicht empfohlen werden. Experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen

der Wellenausbreitung in dieser Prüfsituation haben ergeben, daß die Oberflächenwellen schwer bzw. nicht aus der Vielzahl anderer Signale separierbar sind. Zudem ändert sich mit zunehmender Rißlänge die zeitliche Reihenfolge aller auftretenden Echos [92, 93], ohne daß der Experimentator das erkennen kann.

Es kann zusammengefaßt werden, daß für eine Reihe von Anwendungsfällen (Ermüdungsrißausbreitung, Rißinitiierung, duktiler Rißwachstum) für typische bruchmechanische Proben unterschiedliche Ultraschall-Einprobenprüfkonzepte vorgeschlagen wurden. Ungeachtet der Unzulänglichkeiten des einen oder anderen Meßprinzips hinsichtlich der Meßgenauigkeit ist jedoch festzustellen, daß für die besondere Situation der Prüfung von kleinen Biegeproben mit ausgeprägtem duktilen Materialverhalten, wie sie Untersuchungsgegenstand der Reaktorsicherheitsforschung sind, keine geeignet erscheinende Lösung vorliegt und somit der Bedarf an einer Weiterentwicklung besteht.

Tab. 3-1. Ultraschallverfahren zur Rißinitiierungs- und Rißfortschrittsermittlung

Verfasser	Jahr	Meßprinzip	Probentyp	Detektion einzelner Bruchstadien	Einsatz in der bruchmechanischen Werkstoffprüfung (Ermittlung von Rißfortschritt)	angegebene Genauigkeit
Reflexions-Transmissions-Verfahren						
Hauthal, Kähling [74]	1962	Auswertung der Amplitude des rißfrontreflektierten Signals	Rundprobe	Rißausbreitung	Ergebnisse noch nicht bruchmechanisch interpretiert	
Klima, Lesco, Freshe [55]	1965		CT	Ermüdungsrißausbreitung	Ergebnisse noch nicht bruchmechanisch interpretiert	
Klima, Fisher, Buzzard [75]	1976	End-on-Methode bei CT-Proben, Auswertung der Amplitude des transmittierten Signals, Schrägeinschallung bei SENB-Proben	CT, SENB	Rißinitiierung, qualitatives Rißwachstum	Autoren weisen auf das Potential der Methode zur R-Kurvenermittlung hin	
Curry, Milne [3]	1980	Überblicksbericht über Einprobenverfahren und Bewertung ihrer Zuverlässigkeit			Autoren weisen auf das Potential der US-Methoden zur R-Kurvenermittlung hin	1 mm
Salzmann, Varga [77]	1983	Top-on-Methode, Messung der Amplitude des reflektierten Schallbündels	CT	Rißinitiierung		
Yasunaka, Iwao, Kimura [76]	1983	Top-on-Methode, Messung der Amplitude des transmittierten Signals (Punktfokusprüfkopf auf Rißspitze gerichtet)	CT	Rißinitiierung, Porenbildung		
Loibnegger [78]	1985	Auswertung der Amplitude des reflektierten Signals	SENB	Rißinitiierung		
Hirano [80]	1986	Top-on-Methode für Crack-Closure, End-on-Methode für Rißinitiierungs- und Rißfortschrittsermittlung	CT	Rißinitiierung, Rißfortschritt, Rißschließen	Einprobenverfahren in der EPBM	

Verfasser	Jahr	Meßprinzip	Probentyp	Detektion einzelner Bruchstadien	Einsatz in der bruchmechanischen Werkstoffprüfung (Ermittlung von Rißfortschritt)	angegebene Genauigkeit
Lundberg, Bryne [79]	1988	Top-on-Methode, Rißwachstumsgeschwindigkeit bei mehreren über die Probenfront verteilten Prüfköpfen	CT	Rißinitiierung, Rißwachstumsgeschwindigkeit	Ermüdungsrißausbreitung	
Rehbein, van Wyk [82]	1990	Auswertung der Frequenzabhängigkeit des Transmissionskoeffizienten in Top-on-Anordnung	CT	Wachstumspotential von Ermüdungsrisen		Rißlängen: 500 µm
Amplituden-Beugungs-Verfahren						
Golan, Aron [83]	1983	Messung der Amplitude und der Laufzeit des an der Rißspitze und an Kontaktstellen der Rißufer gebeugten Signals	CT	Rißschließen, Rißschließkraft		
Bouami, de Vadder [85]	1985	Auswertung der Echodynamik des rißspitzengebeugten Signals, Scan entlang der Probenfront	CT	Rißinitiierung, Rißfortschritt	Ermüdungsrißausbreitung, Einprobenverfahren in der EPBM	
Yasunaka [84]	1985	End-on-Methode, Messung der Amplitude des an der Rißspitze gebeugten bzw. reflektierten Signals (nicht mittig angeordneter Winkelprüfkopf)	CT	Blunting, Rißinitiierung, qualitativer Rißfortschritt		konservative J_{IC} -Ermittlung
de Vadder [86]	1991	"MU3F" (Measurement by Ultrasound Focused on Fatigue Front): siehe [Bouami, de Vadder]	CT	Rißinitiierung, Rißfortschritt	Ermüdungsrißausbreitung, Einprobenverfahren in der EPBM	Rißinitiierung: 50µm, Rißfortschritt: 100µm

Verfasser	Jahr	Meßprinzip	Probentyp	Detektion einzelner Bruchstadien	Einsatz in der bruchmechanischen Werkstoffprüfung (Ermittlung von Rißfortschritt)	angegebene Genauigkeit
Laufzeit-Beugungs-Verfahren						
Silk [87]	1978	beschreibt die Beugung eines auf die Rißspitze treffenden Ultraschallsignales, Messung der Laufzeit des Signals um Rißspitze, eingeführt unter: TOFD (Time-of-Flight-Diffraction-Technique)			Autor weist auf die Bedeutung des Effektes zur Rißlokalisierung hin	
Underwood [81]	1978	End-on-Methode, Messung der Laufzeit des rißspitzengebeugten Signals	CT	Rißfortschritt in diskreten Abständen	Einprobenverfahren in der EPBM	
Hirano [88]	1987	End-on-Methode, Messung der Laufzeit des rißspitzengebeugten Signals	SCT	Rißinitiierung, Rißschließen, Rißprofil		
Lien [90]	1980	Messung der Laufzeit des rißspitzengebeugten Longitudinalwellensignals, Prüfkopf an rißverbundener und rückwärtiger Probenseite (Bild)	SENB	Rißwachstumspotential, Ausdehnung der plastischen Zone	Ermüdungsrißausbreitung	Absolute Rißlänge: 100µm Rißfortschritt: 20µm
Date, Shimada [91]	1982	Messung der Laufzeit der Oberflächenwellen entlang der Rißufer (um Rißspitze)	SENB	Rißinitiierung, Rißfortschritt	Einprobenverfahren in der EPBM, Einschränkung: Probenmaße 40X20x160	100µm, Rißlängen bis zu ca. 1,2 mm
Silk, Hobbs [89]	1990	TOFD	kontinuierliche Überwachung der Rißausbreitung			100µm

4. Aufgabenstellung

Einprobenverfahren zur Ermittlung der J-Rißwiderstandskurve haben ihren festen Platz in der bruchmechanischen Kennwertermittlung erhalten. Sie dienen der rationellen und kostengünstigen Werkstoffcharakterisierung und ermöglichen im Unterschied zur Mehrprobenmethode die Werkstoffcharakterisierung für Werkstoffe mit ausgeprägtem Eigenschaftsgradienten (z.B. Schweißnaht, Materialinhomogenitäten) oder bei kleiner verfügbarer Probenzahl (z.B. Versprödungsüberwachungsprogramm). Dennoch ist bei der Wahl eines geeigneten Einprobenverfahrens den eingangs diskutierten Vor- und Nachteilen Beachtung zu schenken. Es gibt noch kein in jeder Hinsicht befriedigendes Einprobenverfahren. Zum einen gelten Anwendungsbeschränkungen beim Einsatz auf spezielle Werkstoffgruppen und Probenformen. Zum anderen ist die Erfassung der Rißinitiierung und des Anfangsbereiches der Rißausbreitung nach wie vor problematisch. Plastische Deformationen und Rißuferkontakt führen auch ohne Rißfortschritt zu einer Änderung der Potentialdifferenz bei den Elektropotentialverfahren bzw. zu einer Änderung der Probennachgiebigkeit beim Teilentlastungsverfahren und können so eine Änderung der Rißlänge vortäuschen. Ein weiteres Kriterium für die Wahl eines Einprobenverfahrens ist der erforderliche zusätzliche Aufwand zur Versuchsvorbereitung und Probeninstrumentierung (Umgang mit Gefahrenstoffen).

Die vorliegende Arbeit hat das Ziel, die Voraussetzungen für die Anwendung des Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens als Einprobenmethode zur Ermittlung von quasistatischen J-Rißwiderstandskurven zu schaffen und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens nachzuweisen. Das Verfahren eröffnet potentiell die Möglichkeit, eine Reihe derzeit bestehender Einschränkungen bei der Anwendung der Einprobenverfahren zu überwinden:

- Ultraschallverfahren sind prinzipiell auf elektrisch nichtleitende und viskoelastische Materialien anwendbar.
- Zwischen dem Rißfortschritt und der zur Auswertung herangezogenen Ultraschalllaufzeit besteht ein direkter, durch eine einfache mathematische Beziehung beschreibbarer Zusammenhang, der zur Kalibrierung ausgenutzt werden kann.
- Mit dem Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren läßt sich der Einfluß des Rißuferkontakts im Anfangsbereich der J-R-Kurve erfassen und somit eliminieren.
- Der Einfluß der plastischen Verformung auf die Schallgeschwindigkeit ist außerordentlich gering und insofern für die Rißfortschrittmessung in dieser Meßanordnung ohne Bedeutung.
- Im Anfangsbereich der J-R-Kurve kann eine hohe Meßgenauigkeit erreicht werden, wodurch die Bestimmung eines physikalischen Rißinitiierungskennwertes ermöglicht wird.
- Die Anwendung dieser Ultraschallmethode ist einfach und ohne großen experimentellen Aufwand erreichbar.

Für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung ist es heute Stand der Technik, die Detektion von Rissen und die Rißlängenmessung auf der Grundlage der Ultraschallrißspitzenbeugung durchzuführen. Das gleiche gilt für Ultraschallanwendungen zur bruchmechanischen Untersuchung der Ermüdungsrißausbreitung. Für die Entwicklung eines Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens zur Rißfortschrittmessung im quasistatischen Dreipunktbiegeversuch an genormten Bruchmechanikproben stellt sich die Forderung, die Eignung von Ultraschallrißspitzenbeugung zur Erfassung stabilen Rißfortschritts nachzuweisen und typische Besonderheiten des quasistatischen Dreipunktbiegeversuchs zu berücksichtigen (Rißspitzenabstumpfung und Rißverlängerung bei nicht zu vernachlässigender Probenverformung). Die Arbeit gliedert sich deshalb in folgende Schwerpunkte:

1. Aufgabenkomplex: Voraussetzungen zur experimentellen Anwendung des Meßprinzips

Im Vorfeld der experimentellen Anwendung des rißspitzengebeugten Ultraschallsignals zur Messung von Rißfortschritt sollen Untersuchungen erfolgen, durch die geklärt werden kann, unter welchen Bedingungen das zur Messung herangezogene Rißspitzenecho entsteht und unter welchen Bedingungen es während eines vollständigen Dreipunktbiegeversuches aus den aufgezeichneten Echofolgen separiert werden kann.

- Die Schallwellenausbreitung in der Probe und deren Beeinflussung durch einen Riß wird mit Hilfe von Simulationsrechnungen zur Schallausbreitung [EFIT] sichtbar gemacht.
- Durch gezielte Variationen der simulierten Versuchsanordnung (Wandlerpositionen, Apertur, Einschallwinkel, Wellenmode, Frequenz) wird eine Optimierung von Aussagegehalt und Meßgenauigkeit der Ergebnisse erlangt.
- Die numerischen Ergebnisse der Simulation der Schallfeldausbreitung werden experimentellen Ergebnissen von stroboskopischen Messungen der Schallwellenausbreitung an den Randbereichen der Biegeprobe gegenübergestellt und somit experimentell bestätigt.

2. Aufgabenkomplex: Experimentelle Verifizierung des Meßprinzips

Das Prinzip der Laufzeitmessung des rißspitzengebeugten Ultraschallsignals zur Rißfortschrittsermittlung wird im quasistatischen Dreipunktbiegeversuch integriert und meßtechnisch realisiert.

- Für die während des Versuches auftretende große Datenmenge ist es erforderlich, geeignete spezielle Methoden zur Signalverarbeitung, Bildgebung und Bildverarbeitung zu erarbeiten.
- Durch die Entwicklung einer geeigneten und möglichst analytischen Kalibrierungsbeziehung ist ein Zusammenhang zwischen der Meßgröße 'Laufzeit' und der Zielgröße 'Rißfortschritt' herzustellen.

- Der Einfluß der während des Dreipunktbiegeversuches auftretenden plastischen Probenverformung auf die Laufzeit des Rißspitzensignals ist zu prüfen und erforderlichenfalls in einer entsprechenden Kalibrierbeziehung zu berücksichtigen.

3. Aufgabenkomplex: Erprobung des Verfahrens und Einschätzung seiner Zuverlässigkeit

Das entwickelte Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren (ULB-Verfahren) soll zur zuverlässigen Ermittlung von J-R-Kurven an bruchmechanischen Kleinproben eingesetzt werden.

- Der mittels ULB-Verfahren erfasste Rißfortschritt wird zur Ermittlung von J-R-Kurven im Einprobenverfahren genutzt.
- Das Einprobenverfahren wird auf seine Anwendbarkeit zur Prüfung von Werkstoffen unterschiedlichen Zähigkeitsniveaus hin untersucht.
- Im Rahmen der Erprobung sind die auf der Basis dieses Verfahrens ermittelten J-R-Kurven mit J-R-Kurven zu vergleichen, die nach dem Mehrprobenverfahren gewonnen wurden.
- Die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Grenzen dieses Verfahrens zur Rißfortschrittsermittlung sind einzuschätzen und mit ausgewählten Einprobenmeßverfahren zu vergleichen.
- Das Ultraschallverfahren, das Gleichstrompotentialverfahren und das Teilentlastungsverfahren werden unter dem Aspekt der Bestimmung von Rißinitiierungskennwerten verglichen.

5 Methodische Entwicklung des Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens

5.1 Meßprinzip

5.1.1 Meßtechnische Realisierung

Die Messung des stabilen Rißfortschritts im quasistatischen Dreipunktbiegeversuch an Kleinproben aus duktilem Material stellt an die Konzipierung eines Ultraschallmeßverfahrens besondere Anforderungen. Nicht jede unter Punkt 3.3 beschriebene Methode eignet sich gleichermaßen gut für den Einsatz zur Rißfortschrittsbestimmung unter den bei Dreipunktbiegung gegebenen Prüfbedingungen. Für die meßtechnische Realisierung sind methodische Vorgaben des standardisierten quasistatischen Dreipunktbiegeversuches zu berücksichtigen. Dazu zählen unter den vorliegenden Bedingungen die Probenform (Dreipunktbiegeprobe), Probengröße ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$), die Lage des Ermüdungsanrisses und das Raumangebot für die Probeninstrumentierung während des Biegeversuches.

Das hier vorgestellte Verfahren wurde auf der Grundlage der TOFD-Technik entwickelt [67]. Dem gewählten Meßprinzip liegt der Effekt der Schallwellenbeugung an einem spaltförmigen Hindernis zugrunde. Das Meßprinzip wurde im Dreipunktbiegeversuch so realisiert, daß je ein Sender- und Empfängerwinkelprüfkopf von beiden Seiten des Risses auf die Rißspitze gerichtet sind, siehe Abb. 5-1.

Es wurde mit kommerziell verfügbaren Miniatur-Winkelprüfköpfen mit einer Nennfrequenz von 5 MHz (Fa. Panametrics) gearbeitet. Die Prüfköpfe ließen sich aufgrund ihres minimalen Platzbedarfs ($5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$) gut in die Dreipunktbiegeanordnung integrieren. Der Ultraschallimpuls wird in Form einer T-Welle unter einem Haupteinschallwinkel von ca. 45° auf die Rißspitze gelenkt. Die dort gebeugte Transversalwelle wird mittels eines symmetrisch zum Riß angeordneten Prüfkopfes gleicher Bauart empfangen. Die Laufzeit des von einem Sendewandler auf die Rißspitze gerichteten und in Richtung Empfangswandler gebeugten Schallimpulses wird zur Lokalisierung der Rißspitze und zur Bestimmung des Rißfortschritts ausgenutzt. Aus Gründen der Vereinfachung der Auswertung des Meßsignals (vgl. Abs. 3.1) wird eine zueinander symmetrische Anordnung von Sende- und Empfangswandlern favorisiert.

Grundlegend soll mit dieser Anordnung erreicht werden, daß der kürzeste mögliche Laufweg eines Ultraschallsignals zwischen dem Sende- und Empfangswandler um die Rißspitze des vollständig geöffneten Risses führt. Das heißt, das erste am Empfangswandler eintreffende Ultraschallsignal trägt bereits Informationen über die Position der Rißspitze. Es kann nicht von anderen Nebenechos überlagert werden und ist damit zur Rißfortschrittsmessung besonders geeignet.

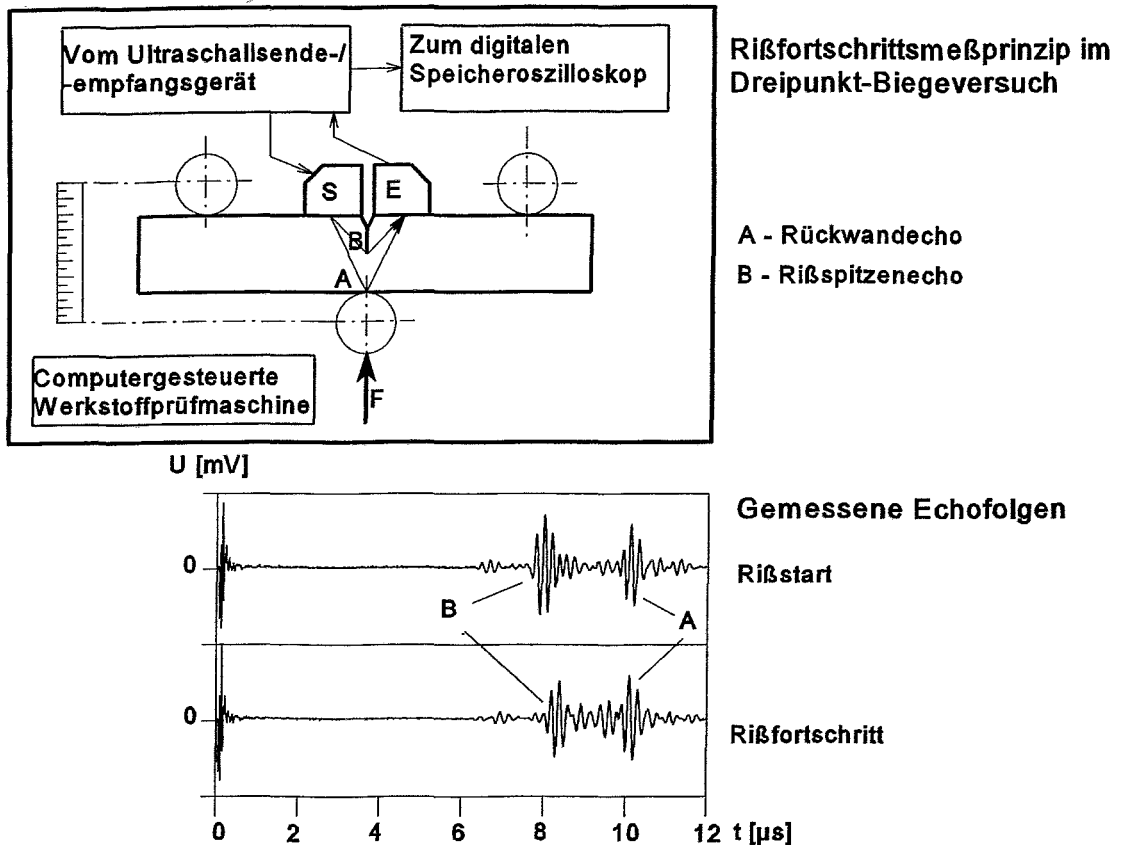


Abb. 5-1. Schema des Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens zur Rißfortschrittmessung im quasistatischen Dreipunktbiegeversuch

5.1.2 Interpretation des Empfangssignals

Die gemessenen Amplituden-Zeit-Signale wurden unter Zuhilfenahme des geometrischen Strahlenmodells empirisch identifiziert. Die unter Berücksichtigung der konkreten Bedingungen der Prüfsituation verwendeten Materialparameter sind in Tab. 5-1. aufgeführt.

Tab. 5-1. Zur experimentellen Identifizierung und theoretischen Simulation verwendete Probenparameter

Abmessungen der Biegeprobe	10 x 10 x 55 mm ³
Testmaterial	ferritisch-perlitischer Stahl
Longitudinalwellengeschwindigkeit	5920 m/s
Transversalwellengeschwindigkeit	3240 m/s
Oberflächenwellengeschwindigkeit	2987 m/s

In Abb. 5-1. sind zwei ausgewählte Amplituden-Zeitsignale dargestellt. Echofolge 1 wurde zu Beginn des Versuches und Echofolge 2 während des Versuches aufgezeichnet. Echo B (Signal B in Abb. 5-1.) wurde als rißspitzengebeugte T-Welle identifiziert. Die Laufzeit dieses Signals verlängert sich mit fortschreitendem Rißwachstum. Für den Beobachter verschiebt sich das Echo nach rechts. Dagegen verbleibt das Echo A bei beiden Messungen mit scheinbar unveränderter Laufzeit und wurde als rückwandreflektiertes T-Wellenecho identifiziert. Das Rißspitzenecho der eingeschallten T-Welle liegt im Verlauf des Dreipunktbiegeversuches weitestgehend separiert, nicht überlagert und in ausreichender Intensität vor, so daß es zur Messung des Rißfortschritts herangezogen werden kann.

Damit bestand jedoch keine endgültige Klarheit über die Entstehung und Veränderung aller empfangenen Echosignale während des gesamten Dreipunktbiegeversuches. Außer den beiden identifizierten Echos wurden eine Reihe von Echoimpulsen aufgezeichnet, deren Entstehungsweg unter Zuhilfenahme des geometrischen Strahlenmodells nur unzureichend interpretierbar war. Es bilden sich verschiedene Sekundärechos aus, da der schräg auf die Rißspitze gelenkte Ultraschallimpuls an der Rißspitze zu einer Zylinderwelle in alle Richtungen (bis auf wenige diskrete) gebeugt und teilweise modegewandelt wird. Die Komplexität der Signalbildung wird in Abb. 5-2. verdeutlicht.

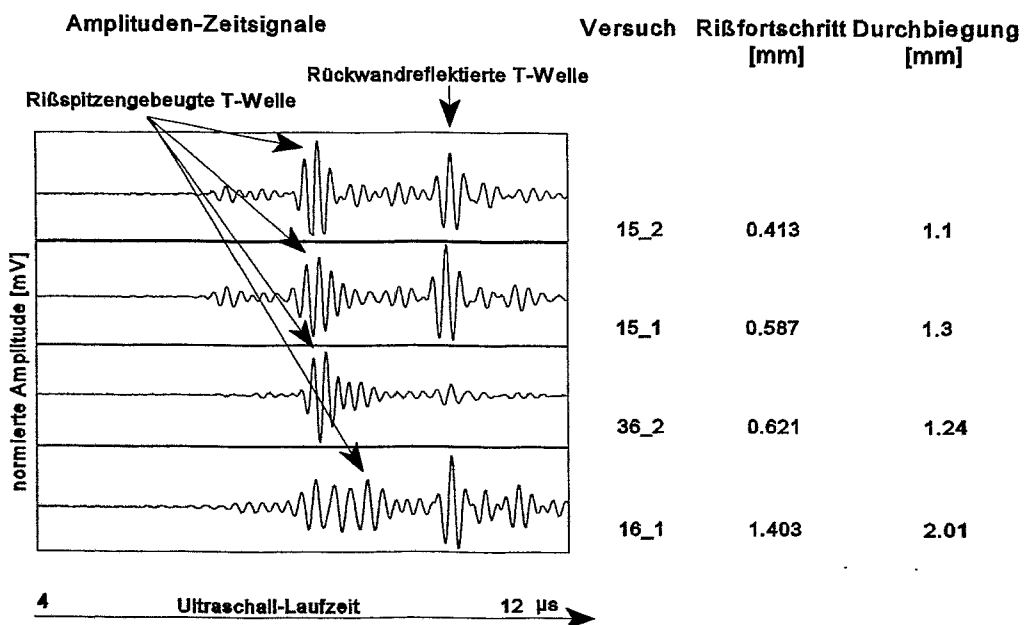


Abb. 5-2. Typische Amplituden-Zeitsignale im Endstadium eines Biegeversuches

Die in Abb. 5-2. vorgestellten Meßergebnisse entsprechen jeweils dem Endstadium eines Dreipunktbiegeversuches. Der zu diesem Zeitpunkt vorliegende Rißfortschritt und die erreichte Durchbiegung sind aufgeführt. Man erkennt:

1. Die Echohöhe unterliegt im Verlauf des Versuches Schwankungen (vgl. 15_2 zu 36_2).
2. Es kommt zu teilweisen Überlagerungen von Echos (rißspitzengebeugte T-Welle in Versuch 16_1).
3. Die gemessenen Echofolgen in den Versuchen 15_1 und 36_2 unterscheiden sich beträchtlich, obwohl die in den Biegeversuchen erzielten Endrißlängen gut übereinstimmen.

Für ein umfassendes Verständnis der Signalbildung und Signalveränderung während des Dreipunktbiegeversuches reicht die Interpretation auf der Grundlage des geometrischen Strahlenmodells nicht aus. Aus der unvollständigen Kenntnis der Signalbildungsabläufe resultiert vor allem die Gefahr der Fehlinterpretation einzelner Echos aufgrund einer Änderung ihrer zeitlichen Reihenfolge.

5.2 Numerische Simulation der Schallwellenausbreitung

Zur Klärung der aufgetretenen Fragestellungen wurden Simulationsrechnungen mit dem EFIT-Code durchgeführt (vgl. Absatz 3.2), der zur Analyse der Ausbreitung elastischer Wellen entwickelt worden ist. Durch die Simulationen lassen sich einzelne, in der Praxis nicht trennbare Einflußfaktoren separieren und in ihrer Wirkung auf den Meßvorgang verfolgen. Gezielte Veränderungen der simulierten Versuchsanordnung (Wandlerpositionen, Apertur, Einschallwinkel, Wellenmode, Frequenz) tragen zum besseren Verständnis der Vorgänge und zur Erhöhung des Aussagegehaltes und der Meßgenauigkeit bei. Die Simulationsarbeiten wurden unter Berücksichtigung der gegebenen experimentellen Situation konzipiert und ermöglichten,

- die Ausbreitung des Wellenfeldes in der Probe und dessen Beeinflussung durch den Riß sichtbar zu machen,
- die Entstehung der einzelnen Echos nachzuvollziehen und durch Vergleich mit den Messungen alle empfangenen Echos zu identifizieren,
- den Einfluß von Probendurchbiegung und Rißausbreitung auf die Echofolge zu erkennen,
- Grenzbereiche zu definieren, außerhalb derer eine Rißlängenmessung nach dem vorgeschlagenen Meßprinzip beeinträchtigt wird oder nicht mehr möglich ist.

5.2.1 Schallwellenausbreitung ohne Modenwandlung

Um das prinzipielle Wellenausbreitungsverhalten in der Modellprobe zu verstehen, wurde die Aufgabe zuerst mit der Akustischen Finiten Integrationstechnik (AFIT) untersucht. Mit dem AFIT-Code läßt sich die Schallwellenausbreitung unter Berücksichtigung von Reflexions- und Beugungsvorgängen von nur einer Wellenart betrachten, da bei dieser Methode mögliche Modenumwandlungen außer acht gelassen werden.

Schnappschüsse

zum Zeitpunkt

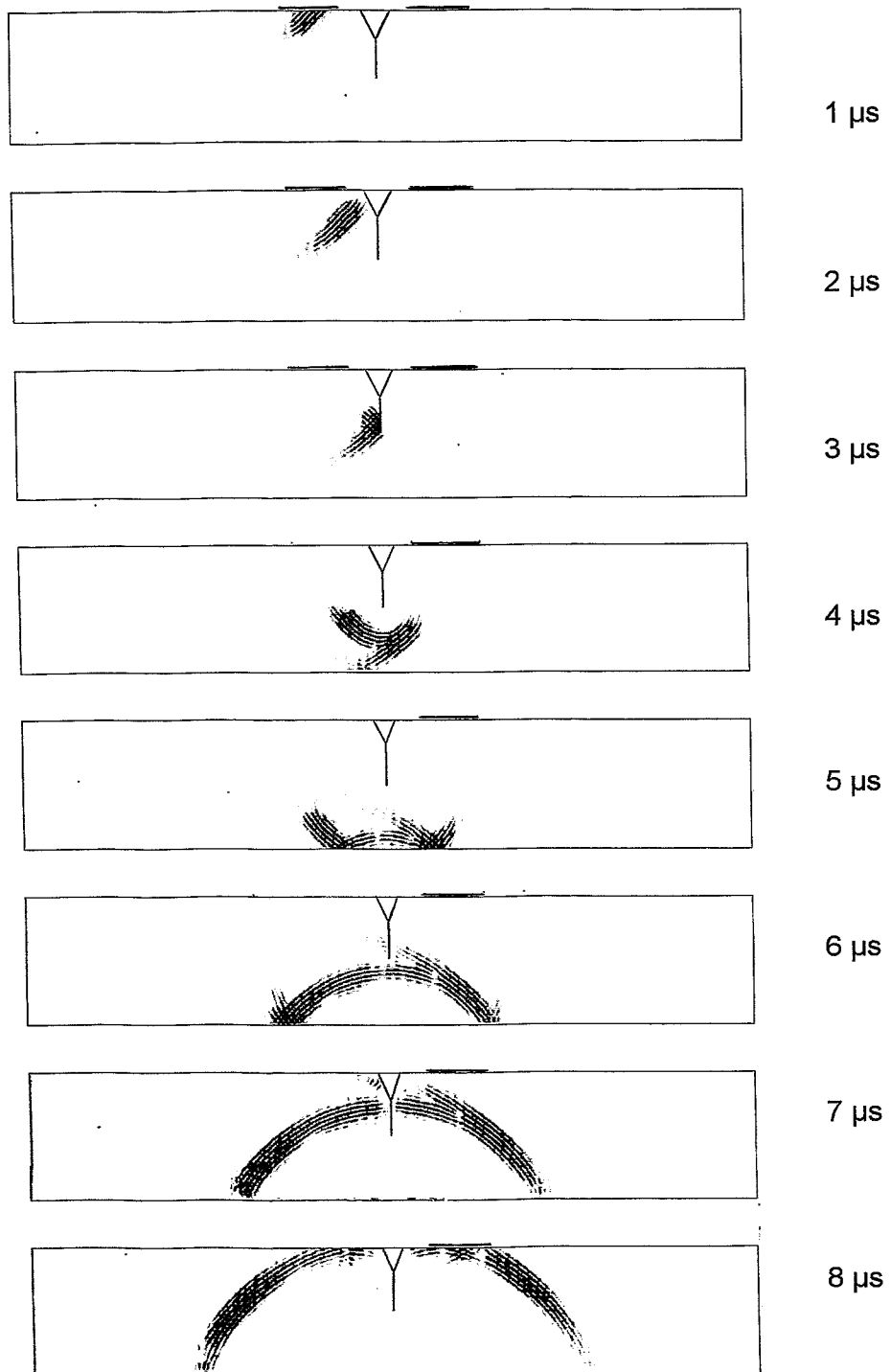


Abb. 5-3. Darstellung der Schallwellenausbreitung und Berücksichtigung von Reflexion und Beugung an einer Biegeprobe anhand nur eines Wellenmodes, der einer T-Welle entspricht

In Tabelle 5-1. sind die bei der Simulation berücksichtigten Materialparameter aufgeführt. In Abb. 5-3. sind die mit dem AFIT-Verfahren errechneten Wellenausbreitungsbilder als "Schnappschüsse" dargestellt. In diesen und allen folgenden Rechnungen wurde die Wellenausbreitung in einem Zeitfenster studiert, das der benötigten Laufzeit einer Transversalwelle zum Empfängerprüfkopf nach einer Reflexion an der Probenrückwand entspricht. Dieses Zeitfenster wurde ebenso bei der Durchführung der experimentellen Rißfortschrittsmessungen gewählt.

Die Ausbreitung der Schallfelder im Testkörper wurde zu verschiedenen Zeitpunkten in einer grafischen Darstellung veranschaulicht. Die acht "Aufnahmen" in Abb. 5-3. wurden in zeitlicher Reihenfolge in Abständen von $1\mu\text{s}$ festgehalten. Die Auflagefläche von Sende- und Empfangsprüfkopf sind im Bild durch schwarze Balken gekennzeichnet. In Abb. 5-3. zum Zeitpunkt $t = 1\mu\text{s}$ nach der Schallwellenanregung läßt sich die einfallende Welle mit ihrem Intensitätsmaximum unter 45° erkennen. Der Einfallwinkel wird in der Simulation durch eine zeitverzögerte Anregung der Auflagefläche des Sendeprüfkopfes eingestellt. Diese Welle erreicht die Rißfläche, ein Teil trifft unmittelbar auf die Rißspitze (Abb. 5-3., $t = 3\mu\text{s}$) und wird dort in alle Richtungen gebeugt. Zum Zeitpunkt $t = 4\mu\text{s}$ wird bereits ein Teil der die Probenrückwand erreichenden Ultraschallwelle reflektiert. Um die Rißspitze hat sich deutlich sichtbar eine Kreiswelle mit lokalen Intensitätsmaxima gebildet. Sie wird linksseitig des Risses von der an der Rißfläche reflektierten Welle überlagert. In den weiteren Schnappschüssen zur Zeit $t = 5\mu\text{s}$ bis $t = 8\mu\text{s}$ läßt sich erkennen, von welchen Wellenfronten das im Empfängerprüfkopf gebildete Signal beeinflusst wird. Die Vorgänge in der linken Probenhälfte können nun unbeachtet bleiben, da sie die Signalbildung im Empfänger nicht beeinflussen. Anhand Abb. 5.3, $t = 5\mu\text{s}$ wird deutlich, daß die kreisförmige Welle, ausgehend von der Rißspitze, die Auflagefläche des Empfängerprüfkopfes bei ca. $t = 5\mu\text{s}$ erreicht. Ihr folgt die aus dem Eingangsimpuls entstandene rückwandreflektierte Welle, die die Prüfkopfapertur in Abb. 5-3. zwischen $t = 7\mu\text{s}$ und $t = 8\mu\text{s}$ erreicht. Eine rückwandreflektierte Welle, die aus der Kreiswelle der Rißspitze entstand, folgt unmittelbar.

5.2.2 Schallwellenausbreitung mit Modenwandlung

Im praktischen Ultraschallexperiment treten neben Beugung und Reflexion auch Modenumwandlung auf, die mit dem AFIT-Code nicht erfaßt werden können. Zur Analyse der Wellenausbreitung unter Berücksichtigung der Modenwandlung wurde das EFIT-Verfahren angewandt. Der Vergleich mit AFIT erleichtert die Interpretation der mit dem EFIT-Code generierten komplizierten Echofolgen.

Der mit dem EFIT-Code simulierte vollständige Schallausbreitungsvorgang ist in Abb. 5-4. veranschaulicht. Die Aufnahmen wurden über den Zeitbereich von 1 bis $8\mu\text{s}$ in Abständen von $1\mu\text{s}$ errechnet. In Abb. 5-4. zum Zeitpunkt $1\mu\text{s}$ ist die bereits beschriebene T-Welle gut zu erkennen. Zusätzlich entsteht durch die Bildung kreisförmiger L-Wellenfronten an den Aperturkanten des Sendeprüfkopfes eine L-Welle. Sie erreicht infolge der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit die Rißspitze bereits zum Zeitpunkt von $2\mu\text{s}$ und damit vor der intensitätsstarken T-Welle. Aus den unterschiedlichen Wellenlängen von L-Welle und T-Welle resultiert der unterschiedliche Abstand der Wellenberge und Täler innerhalb der Wellenfronten. Die L-Welle erscheint im Bild als die breitere Wellenfront.

Schnappschüsse

zum Zeitpunkt

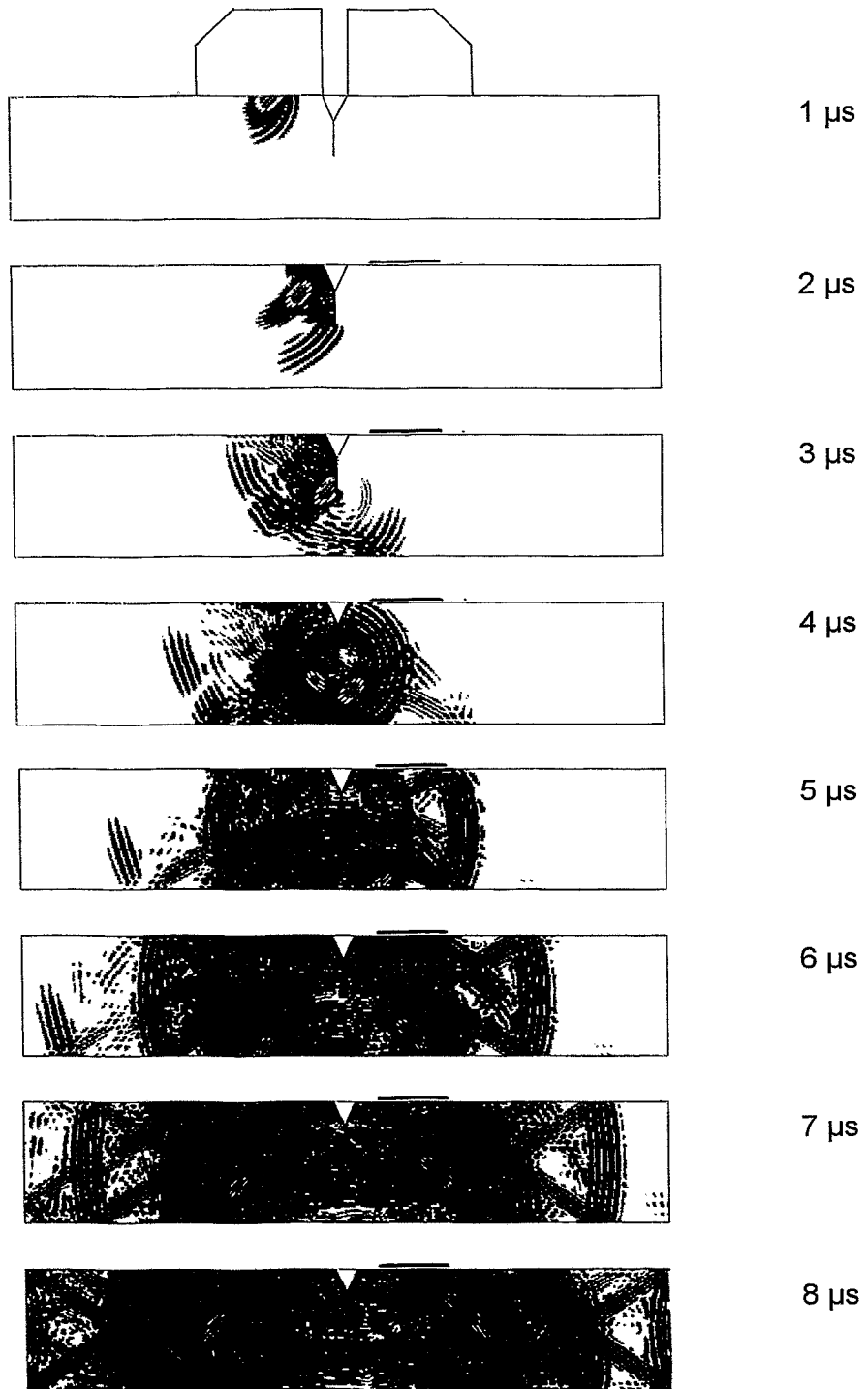


Abb. 5-4. EFIT-Simulation der Schwellenausbreitung in einer Biegeprobe, Prüffrequenz 5 MHz

Die einfallende L-Welle wird an der Rißspitze kreisförmig gebeugt. Sie wird teilweise modekonvertiert zu einer ebenfalls kreisförmigen T-Welle, die aufgrund ihrer geringen Amplitude im Bild schlecht sichtbar ist.

Der Prozeß der Modekonversion wird besser deutlich in Abb. 5-4., $t = 3 \mu\text{s}$, wo sich die im Prüfkopf angeregte T-Welle mit entsprechend hoher Schallintensität an der Rißspitze bereits in eine L-Welle und eine T-Welle aufgespalten hat. Die kreisförmige L-Welle erreicht aufgrund ihrer höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit die Kante der Auflagefläche des Empfängerprüfkopfes (rechtsseitig des Risses angebracht) zum Zeitpunkt etwa bei $t = 4 \mu\text{s}$, die kreisförmige T-Welle trifft erst bei etwa $t = 5 \mu\text{s}$ ein. In Abb. 5-4., $t = 4 \mu\text{s}$ sind erstmalig von der Rückwand ausgehende L- und T-Wellen zu erkennen (deutlicher zum Zeitpunkt $t = 5 \mu\text{s}$ erkennbar). Sie sind Ergebnis eines Reflexionsvorganges an der Probenrückwand. Die kreisförmige L-Welle, die aus der einfallenden T-Welle entstand, werden hier rückwandreflektiert. In Abb. 5-4. zum Zeitpunkt $t = 5 \mu\text{s}$ sind L- und T-Wellen zu erkennen, die aus der Rückwandreflexion der kreisförmigen T-Welle entstanden. Der Teil der T-Welle, der nicht an der Rißspitze gebeugt worden ist, wird an der Rückwand der Probe vollständig reflektiert (gut erkennbar in Abb. 5-4., $t = 5 \mu\text{s}$). Diese Wellenfront überlagert sich in diesem Beispiel teils mit der rückwandreflektierten T-Welle, die aus der T-Kreiswelle entstand. Zum Zeitpunkt $t = 8 \mu\text{s}$ haben diese Wellenfronten den Empfängerprüfkopf erreicht.

So wird die vom Prüfkopf empfangene Echofolge in dem Zeitraum bis $10 \mu\text{s}$ nach Aussenden des Wellenimpulses prinzipiell durch neun Einzelechos bestimmt, die sich in ihrer Intensität stark unterscheiden und daher sehr unterschiedliche Auswirkungen auf das Empfangssignal zeigen (T/L, L/T, T/T, T/L/L, T/T/L, T/L/T, L/T/T, T und L): Die von der Rißspitze und Rückwand ausgehenden T-Wellen rufen die stärksten Echos hervor. Das ist verständlich, da erstens die Schallwellen durch einen Transversalprüfkopf erzeugt worden sind, zweitens die einfallende Primärwelle auf die Rißspitze gelenkt wurde und drittens die an der Rückwand reflektierte Welle den geringsten Energieverlust erfährt. Von Bedeutung sind außerdem die am Riß entstandene Longitudinalwelle und die aus der Longitudinalkreiswelle reflektierten Rückwandechos, was bei der Analyse der Schallwellenausbreitung unter Zuhilfenahme des geometrischen Strahlenmodells nicht erkannt werden konnte.

5.2.3 Echobildung im Empfangsfall

Im vorangegangenen Schritt wurde die Ausbreitung der Schallwellen im gesamten Testkörper untersucht. Das von einem Empfängerprüfkopf registrierte Schallsignal bildet sich schließlich aus den Wellenfronten, die seine Auflagefläche auf der Probe (Apertur) erreichen. Die Empfindlichkeit eines Prüfkopfes entlang seiner Apertur ist eine prüfkopfspezifische Größe und wird in der Simulation durch eine experimentell bestätigte Wichtungsfunktion beschrieben, die berücksichtigt, daß Randbereiche der Auflagefläche weniger zur Signalbildung beitragen. Als mathematische Beschreibung der Impulsform des vom Prüfkopf ausgesandten Anregungsimpulses wurde ein sogenannter RC_4 -Impuls (row cosinus) gewählt. Diese Funktion und die

Wichtungsfunktion sind durch Vergleich mit experimentellen Untersuchungen bestimmt worden. Eine grafische Veranschaulichung dieses Zusammenhangs und der gewählten Funktionen zeigt Abb. 5-5..

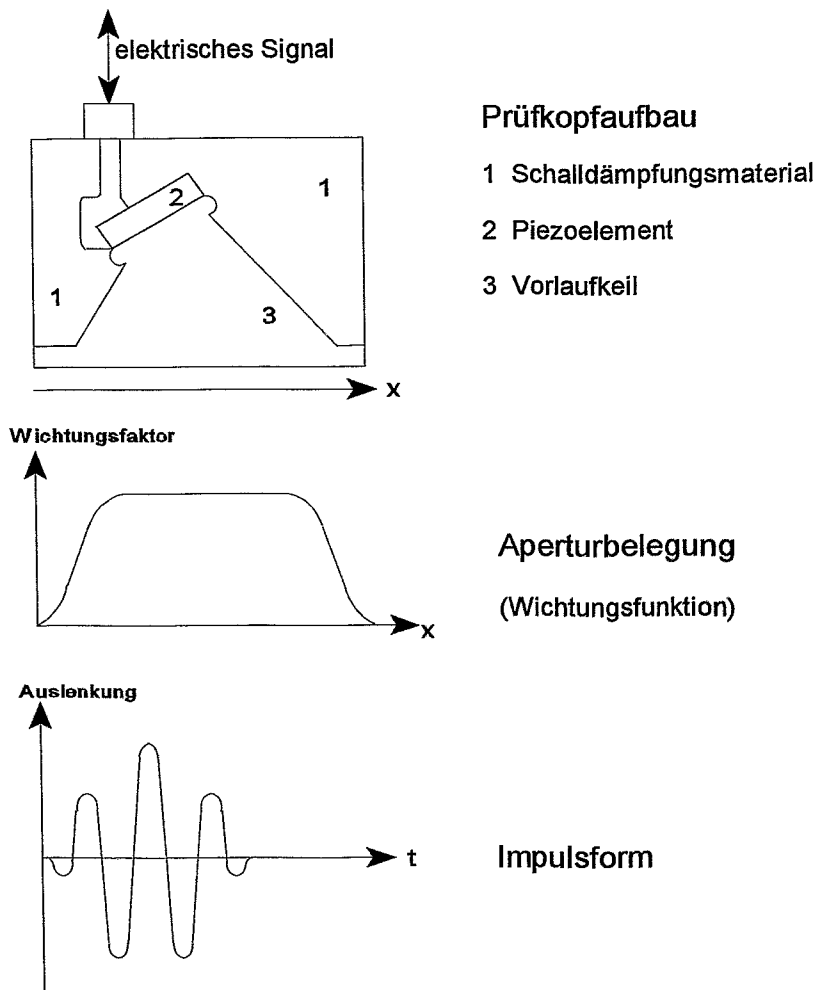


Abb. 5-5. Schematische Darstellung der Prüfkopfparameter

Die Echobildung im Empfangsfall wird simuliert, indem die Daten des anliegenden Schalldruckes in den Knotenpunkten des EFIT-Gitters im Bereich der Empfängerapertur zu jedem Zeitpunkt aufgezeichnet und in einem sogenannten HF-Bild aufgetragen werden (Abb. 5-6.). Auf der Abszisse dieser grafischen Darstellung ist der untersuchte Zeitbereich aufgetragen. Die vertikale Ausdehnung charakterisiert die Apertur. Soll anstelle eines senkrecht an der Probe befestigten Normalprüfkopfes ein Winkelprüfkopf modelliert werden, so müssen die an den einzelnen Knotenpunkten der Aperturbreite registrierten Werte dem Kippwinkel des Piezoelementes im Prüfkopf entsprechend zeitverschoben werden .

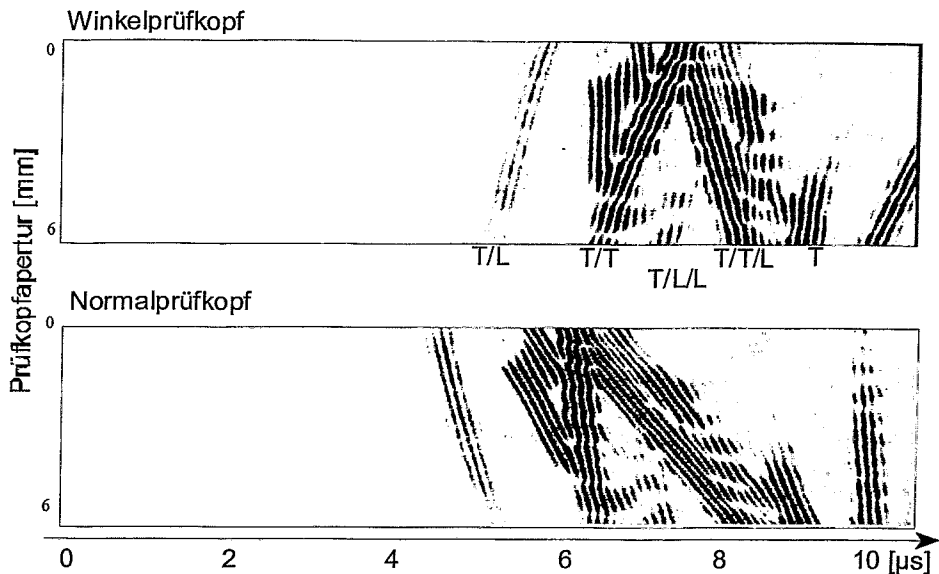


Abb. 5-6. Zeitabhängige Darstellung des Eintreffens unterschiedlicher Wellenfronten in den Empfängerprüfkopf (HF-Bild)

Die Entstehung der wesentlichen Echos soll an dieser Stelle noch einmal zusammengefaßt werden:

- T/L Echo der aus der Rißspitzenbeugung der einfallenden T-Welle entstandenen L-Welle,
- T/T Echo der rißspitzengebeugten T-Welle,
- T/L/L Echo einer rückwandreflektierten L-Welle, entstanden durch die einfallende T-Welle, die an der Rißspitze gebeugt und dort zu einer L-Welle modekonvertiert wurde,
- T/T/L Echo einer rückwandreflektierten L-Welle, entstanden durch die einfallende T-Welle, die an der Rißspitze gebeugt und dort zu einer T-Welle modekonvertiert wurde,
- T Echo der rückwandreflektierten T-Welle.

Um eine Echofolge zu modellieren, wie sie im Experiment gemessen werden kann, werden die Daten des HF-Schemas unter Berücksichtigung dieser Zeitverschiebung über die Aperturkoordinate integriert. Im Ergebnis erhält man einen simulierten Amplituden-Zeit-Verlauf (Abb. 5-7.). In Abb. 5-7. ist die durch die Simulationen berechnete empfangsseitige Echofolge für die untersuchte Probe mit einer Rißlänge von 5 mm und einem Prüfkopfabstand von 6 mm zur Rißebezugsebene bezogen auf die

Apertur als Ergebnis des diskutierten Wellenausbreitungsprozesses dargestellt. Die zeitliche Abfolge der Echos läßt sich aus dem geometrischen Strahlenmodell entsprechend der Länge des jeweiligen Laufweges ableiten.

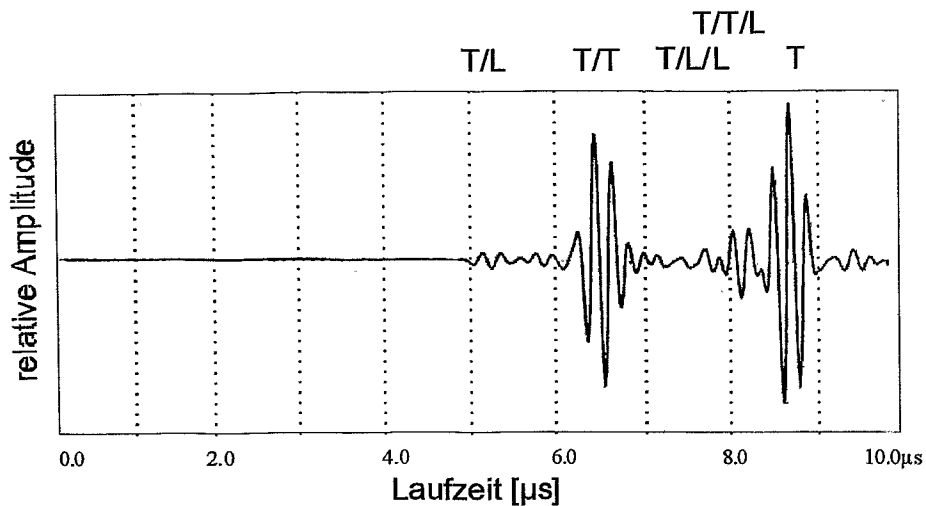


Abb. 5-7. simulierte Echofolge (Amplituden-Zeitsignal) für eine Probe mit Rißlänge 5 mm und einem Prüfkopfabstand von 6 mm zur Rißebe

Die größte Echoamplitude hat das rückwandreflektierte Echo T, die rißspitzengebeugte T-Welle (T/T) hat die zweithöchste Amplitude. Prinzipiell nehmen noch drei weitere Wellenfronten auf die Signalbildung im interessierenden Zeitbereich Einfluß. Da sie durch Beugung vom eingeschallten Hauptsignal abgespalten worden sind und zudem nicht unter dem Winkel der größten Empfindlichkeit des Prüfkopfes eintreffen, haben sie eine deutlich geringere Amplitude. Beim Auftreffen der Wellenfronten auf Rißspitze und Kerbfläche entstehen sekundäre Rayleighwellen. Aufgrund ihres flachen Einfalles in den Empfangsprüfkopf haben sie bei Verwendung von 45°-Prüfköpfen extrem geringe Amplituden und sind in Abb. 5-6. nicht sichtbar.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, daß eine Interpretation der empfangenen Echofolgen auf rein experimentellem Wege kaum möglich wäre.

5.2.4 Veränderung der Echofolge bei Rißfortschritt

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit des Rißfortschrittsmeßprinzipes auf der Grundlage der rißspitzengebeugten Transversalwelle wurden Rechnungen für Modellkörper gleicher Kontur mit unterschiedlichen Rißlängen bei Vernachlässigung

der Probendurchbiegung durchgeführt. In Abb. 5-8. sind die Simulationsergebnisse für Echofolgen bei Rißlängen von 5 mm und 6 mm gegenübergestellt. Deutlich erkennbar ist die Verschiebung des Echos T/T. Der Vergleich des Betrages der Laufzeiterhöhung bei 1 mm Rißfortschritt mit der experimentell an Referenzproben mit Rißlängen von 5 mm und 6 mm gemessenen Laufzeitdifferenz ergibt eine sehr gute Übereinstimmung experimenteller ($\Delta t = 0,43 \pm 0,1 \mu\text{s}$) und simulierter Ergebnisse ($\Delta t = 0,43 \mu\text{s}$).

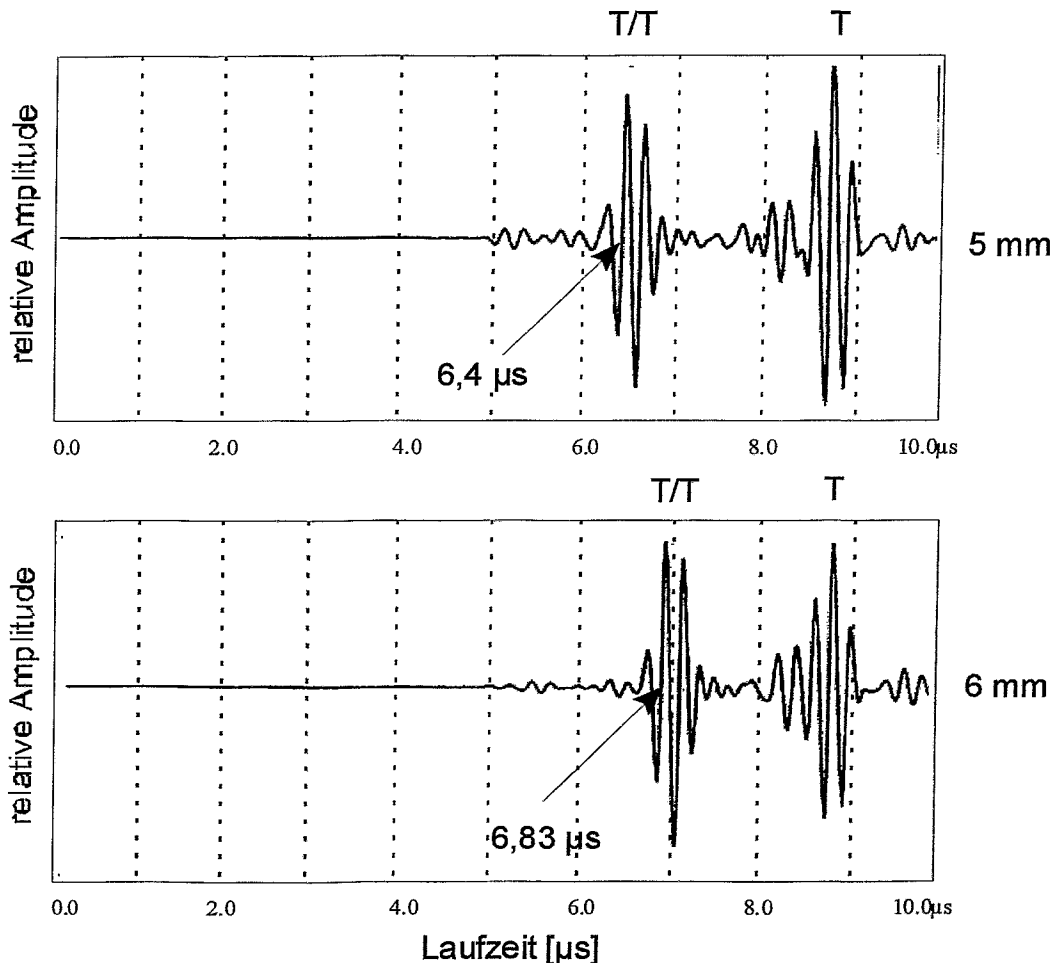


Abb. 5-8. Gegenüberstellung simulierter Echofolgen bei Rißverlängerung, Beispiele mit einer Rißlänge von 5 und 6 mm

Die Simulationsergebnisse bestätigen prinzipiell die gute Eignung des Meßprinzips zur Rißfortschrittsmessung. Zu Einschränkungen in der Rißfortschrittsmessung kann es kommen, wenn das zur Rißspitzenmessung herangezogene Echo mit zunehmenden Rißfortschritt durch andere Echos überlagert wird. Es ist zu erwarten, daß das T-Wellenecho (T/T) mit fortschreitendem Riß zuerst durch das aus Rißspitzenbeugung mit Modenkonversion und Rückwandreflexion entstandene T/L/L-Echo (Abb. 5-7.) überlagert wird. Eine definitive Grenze ist dann gegeben, wenn der Riß aus dem Schallfeld des Winkelprüfkopfes austritt.

5.2.5 Veränderung der Echofolge bei Probendurchbiegung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde Rißfortschritt ohne Biegung simuliert, im Experiment wird der Rißfortschritt jedoch durch Dreipunktbiegung der Probe hervorgerufen. Das Verhältnis von Probendurchbiegung zu Rißfortschritt wird in hohem Maß durch die Duktilität des zu untersuchenden Werkstoffes bestimmt. Diese Probendurchbiegung kann großen Einfluß auf die Echofolge haben. Da das Drehzentrum einer Dreipunktbiegeprobe nicht mit der Rißspitze übereinstimmt, sondern dieser um einen bestimmten Betrag vorgelagert ist, unterliegen die Winkelverhältnisse zwischen Rißspitze und Schallwandlern einer ständigen Veränderung.

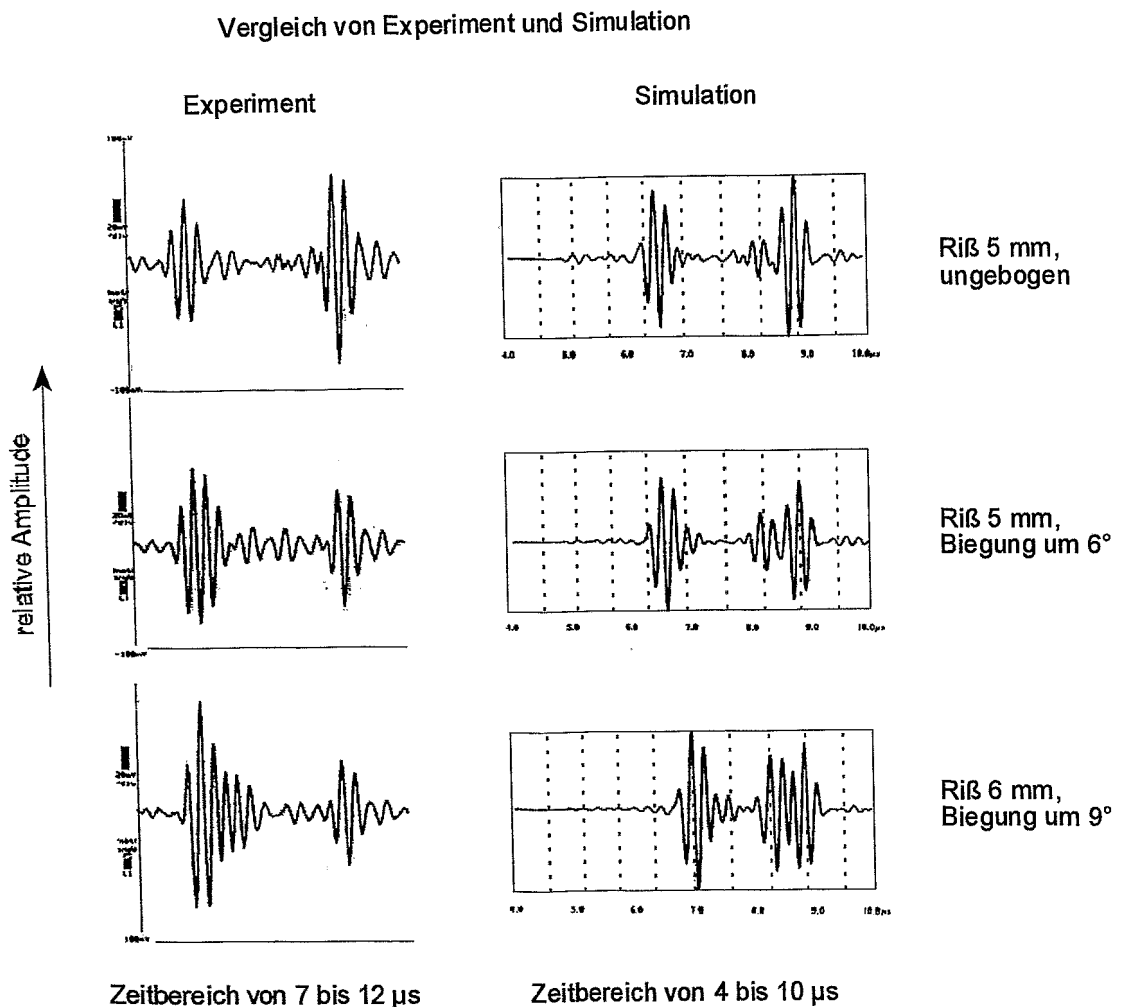


Abb. 5-9. Gegenüberstellung der Simulations- und Messergebnisse bei Überlagerung von Rißausbreitung- und Biegeprozeß (unterschiedliche Zeitnullpunkte)

Es ist schematisch untersucht worden, wie eine relative Positionsänderung der Schallwandler zur Rißspitze die Entwicklung des Echobildes prägt. Der Einfluß des Biegeprozesses wird in drei Stadien simuliert, die den beobachteten typischen Versuchsstadien für das im Experiment verwendete Probenmaterial entsprechen:

- Probe mit einem Riß von 5 mm Länge zu Versuchsbeginn,
- Probe mit gleicher Rißlänge, Probendurchbiegung 6° ,
- Rißfortschritt um 1 mm, Probendurchbiegung 9° .

Der in Abschnitt 5.2.4 untersuchte Einfluß der Rißlänge auf das T-Wellenecho kann bestätigt werden. Der untersuchte Rißfortschritt von 5 mm auf 6 mm äußert sich in einer deutlichen Laufzeitverschiebung dieses Rißspitzenechos (Abb. 5-9.). Der Vergleich dieser Simulationsergebnisse mit experimentell ermittelten Ergebnissen in Abb. 5-9. läßt einen nicht geringen Einfluß der Probendurchbiegung auf die Laufzeit und Amplitudendynamik der Echos erkennen. Für Ultraschall-Laufzeitmessungen des Rißfortschritts hat die Probenrotation eine entscheidende Bedeutung. Durch die Rotationspunktverlagerung ändert sich während der Probendurchbiegung die relative Lage der Prüfköpfe im Verhältnis zur Rißspitze und zieht dadurch eine Laufzeitveränderung der Wellenfronten ohne eigentlichen Rißfortschritt nach sich. Der beschriebene Effekt ist in Abb. 5-9. durch einen Vergleich der Echofolgen einer ungebogenen Probe und einer um 6° gebogenen Probe gut nachzuvollziehen. Dieser Vergleich zeigt, daß die Bestimmung der Rißlänge aus der Ultraschalllaufzeit des Rißspitzenechos ohne Berücksichtigung der Durchbiegung fehlerhafte Werte liefert. Im Abschnitt 5.3.3. wird auf analytischem Weg gezeigt, wie dieser Fehler eliminiert und aus der gemessenen Laufzeit auf die Rißlänge geschlossen wird.

5.2.6 Einfluß von Rißinitiierungsprozessen

Stabilem Rißwachstum ist der Prozeß der Rißinitiierung vorgelagert, der durch plastische Verformung, Porenbildung im Umfeld der Rißspitze und Abstumpfung des vorhandenen Anrisses charakterisiert ist. Rasterelektronenmikroskopische Messungen zeigen, daß der Radius dieser Rißspitzenabstumpfung für den untersuchten Stahl im Größenbereich von 50 bis 100 μm liegt. Um den Einfluß dieser Vorgänge auf das Wellenausbreitungsverhalten zu untersuchen, wird in der Simulation die Geometrie des Risses variiert:

- Haarriß, $l = 5 \text{ mm}$, in der Modellierung wurden die Gitterbindungen zwischen den Rißufern gelöst,
- ein Haarriß, $l = 5 \text{ mm}$, mit einer Pore ($d = 100 \mu\text{m}$), deren Mittelpunkt der Rißspitze um $100 \mu\text{m}$ vorgelagert ist,
- ein $100 \mu\text{m}$ breiter und 5 mm langer Spalt mit einem Rundungsradius von $r = 50 \mu\text{m}$.

Untersuchungen bei einer Prüffrequenz von 5 MHz ergaben, daß derartige Änderungen im Gebiet um die Rißspitze in den simulierten Echofolgen nicht erkennbar sind. Eine Erhöhung der Meßfrequenz auf 10 MHz liefert Unterschiede

im simulierten Empfangssignal zwischen einem Haarriß und einem Haarriß mit vorgelagerter Pore (Abb. 5-10.). Danach steigt im Vergleich zur Amplitude des Beugungssignales im homogenen Rißspitzengebiet die Amplitude und Impulsbreite des T/T-Wellenechos bei Vorhandensein einer der Rißspitze vorgelagerten Pore und dieses Echo erscheint phasenverkehrt. Dieses Ergebnis läßt noch keine eindeutigen Schlußfolgerungen auf die experimentellen Detektionsmöglichkeiten zu. Im Experiment bilden sich Poren unregelmäßiger Größe, Form und Verteilung vor der Rißspitze aus, so daß unterschiedliche Überlagerungserscheinungen von reflektierten und gebeugten Wellenfronten aus dem porenbehafteten Rißspitzengebiet entstehen werden. Ein Einfluß der Spaltbreite auf das modellierte Prüfergebnis wurde auch bei einer Prüffrequenz von 10 MHz nicht festgestellt. Ein Nachweis ist erst in einem Frequenzbereich zu erwarten, bei dem die Wellenlänge der Größenordnung der Spaltbreite entspricht.

Vergleich von Experiment und Simulation

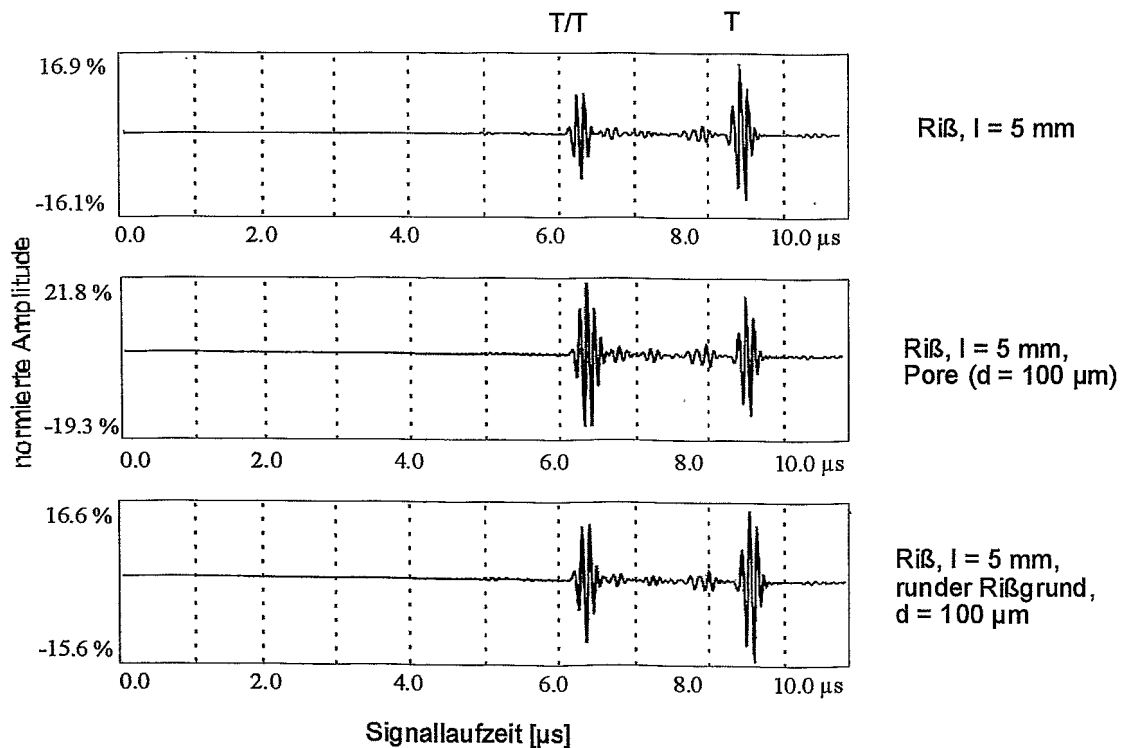
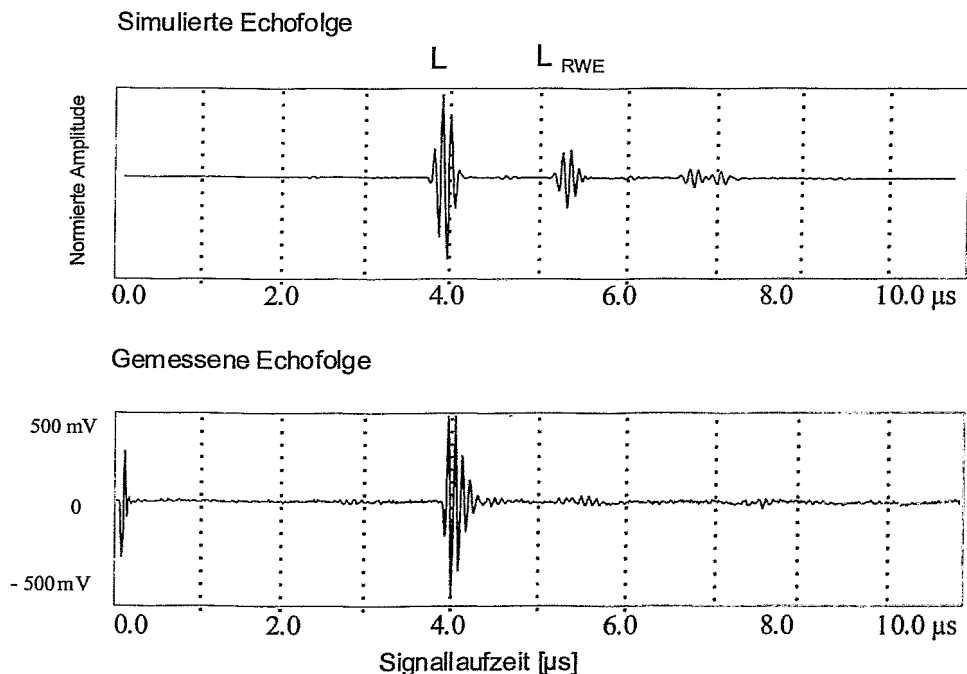


Abb. 5-10. Simulation von Rißformänderungen, Prüffrequenz 10MHz, (Amplitudenmaßstab jeweils der Bildhöhe angepaßt)

5.2.7. Modifizierung der angeregten Wellenart

Um Ansatzpunkte für mögliche Modifizierungen zu erhalten, werden im folgenden die Eignung anderer Schallwellenmoden zur Rißinitiierungs- und Rißfortschrittsmessung und mögliche Veränderungen der Prüfanordnung diskutiert. Das T-Wellenecho wird mit fortschreitendem Rißwachstum durch weitere Wellenfronten überlagert, siehe Abschnitt 5.2.3. Die Anwendung von L-Wellen auf die Laufzeitmessung läßt eine Erhöhung der Meßgenauigkeit erwarten, da ein L-Wellenecho der Rißspitze unabhängig von der Rißlänge in der zeitlichen Folge vor allen gebeugten und modekonvertierten Wellenfronten am Empfängerprüfkopf eintreffen muß und nicht durch sie beeinflusst werden kann. Geeignete, kommerziell erwerbbar L-Wellen-Winkelprüfköpfe waren nicht verfügbar. In den Rechnungen wurden die T-Wellenwinkelprüfköpfe durch zwei L-Wellen-Normalprüfköpfe ersetzt. Die Simulationsrechnung zeigt, daß bei Schallbündelausbreitung parallel zur Rißebene die rißspitzengebeugte L-Welle zu schwach ist, um detektiert werden zu können. Bei einem geneigten Einschallwinkel (wurde durch eine Veränderung der Probenform im Bereich der Prüfkopfaufschlagflächen erreicht) wird die Rißspitze mit



L einfallende L-Welle wird an der Rißspitze zur L-Welle gebeugt

L_{RWE} einfallende, an der Rückwand reflektierte L-Welle

Abb. 5-11. Gegenüberstellung simulierter und gemessener Echofolgen für eine geneigt eingeschallte L-Welle, Prüffrequenz 10 MHz

ausreichender Schallintensität getroffen, so daß die rißspitzengebeugte L-Welle vom Empfängerprüfkopf nachgewiesen werden kann. Als geeignet wurde ein Einschallwinkel der L-Welle von z.B. 20° zur Rißebeine ermittelt. Erste experimentelle Ergebnisse in dieser theoretisch erarbeiteten Prüfanordnung bestätigen ihre Eignung (Abb. 5-11.), verdeutlichen aber auch die Schwierigkeiten bei der Nachweisbarkeit der rißspitzengebeugten L-Welle bei Rißöffnung und im Anfangsbereich der Rißausbreitung.

Unter Beibehaltung der ursprünglichen Prüfanordnung läßt sich eine Oberflächenwelle anregen, die sich vom Sender aus entlang der Probenoberfläche und der Rißfläche ausbreitet, an der Rißspitze um 180° gebeugt wird und vom Empfänger detektiert wird [91]. Sie sollte damit ausreichende Informationen über Rißspitzenveränderungen und Rißwachstum liefern können. Entsprechende Simulationsrechnungen führten zu dem Ergebnis, daß die Anregung einer Oberflächenwelle stets mit der Abspaltung anderer Wellenmoden einhergeht. Reflexionsprozesse, Modekonversionen und Anregung von Sekundäroberflächenwellen bewirken, daß die rißspitzenumlaufende Oberflächenwelle in starkem Maß von einer Folge anderer Echos überlagert wird (schnellere L-Wellenechos, T-Wellenechos größerer Intensität) und nur schwer aus dieser Echofolge zu separieren ist. Solche Überlagerungen können eine Erklärung für die von Date [91] (siehe auch 3.3.3) gefundenen, unerwartet großen Abweichungen zwischen fraktografisch gemessenem und mittels Ultraschall ermitteltem Rißfortschritt sein. Diese Rißdetektionsmöglichkeit scheint daher weniger geeignet, Rißwachstumsprozesse zu verfolgen, als die Anwendung rißspitzengebeugter Volumenwellen [93].

5.2.8 Experimentelle Verifizierung der Simulationen

Im Ergebnis dieser Simulationsarbeiten stellen sich die Vorgänge der Schallwellenausbreitung und Modewandlung der Ultraschallwellen in der Dreipunktbiegeprobe sehr komplex dar. Die Simulationen wurden auf der Grundlage eines zweidimensionalen Modells und unter der Annahme einer einfachen Näherung zur Prüfkopfsimulation erzielt. Es wurde nach Möglichkeiten gesucht, die Ergebnisse der numerischen Simulation experimentellen Ergebnissen gegenüberzustellen, um so die Übereinstimmung zwischen Simulations- und Meßergebnissen zumindest für ausgewählte Stadien der Schallwellenausbreitung demonstrieren zu können.

Es wurde ein Meßverfahren genutzt, das die reale Wellenausbreitung in der Dreipunktbiegeprobe für den Betrachter sichtbar macht. Mit einer stroboskopischen Visualisierungsmethode [94] kann die Wellenausbreitung auf der Probenoberfläche von lichtundurchlässigen Festkörpern gemessen, registriert und bildlich dargestellt werden. Das Ergebnis entspricht der Situation der zweidimensionalen numerischen Simulation. Die Visualisierungsmethode wurde hiermit erstmalig auf die Problematik der Rißausbreitung angewandt.

Bei der stroboskopischen Visualisierungsmethode werden die von einem Prüfkopf ausgesandten transienten Ultraschallsignale an der Probenoberfläche mittels eines Punktempfängerprüfkopfs aufgezeichnet und gespeichert. Dabei tastet der Punktempfänger die Probenoberfläche ab und führt pro Position je einmal zeitgleich mit dem erneuten Aussenden eines Ultraschallimpulses eine Messung durch. Aus den Meßergebnissen wird grafisch ein Schnappschuß der momentanen Wellenausbreitung erzeugt. Die gleiche Meßweise wird nachfolgend für andere interessierende Zeitintervalle zwischen Aussenden und Messen des Ultraschallimpulses durchgeführt. Der Abstand zwischen zwei Meßpunkten auf der Probenoberfläche darf dabei höchstens die Hälfte einer Wellenlänge betragen, um die Ausbreitung von Wellenbergen und Wellentälern erfassen zu können. Auf diese Art läßt sich eine Serie von Momentaufnahmen der Schallausbreitung an der Probenoberfläche entwickeln. Als Punktempfängerprüfkopf dient eine elektrodynamische Sonde. Die Methode steht derzeit jedoch nicht für beliebig kleine Testkörper zur Verfügung, da mit einer Sonde der Nennfrequenz 1MHz gemessen wird. Um den experimentellen Gegebenheiten (ISO-V-Probe, Prüffrequenz 5MHz) zu entsprechen, wurde die Prüfsituation für den vorliegenden Fall mit einem 45°-Winkelprüfkopf mit einer Nennfrequenz von 1MHz und dem entsprechend größerem Modell mit der fünffachen Abmessung der ISO-V-Probe nachgestellt. Es können sowohl L- als auch T-Wellen aufgrund ihrer an der Probenoberfläche entstehenden Randwellen detektiert werden. Die Amplitudenverhältnisse zwischen beiden Wellenarten entsprechen jedoch nicht der Realität.

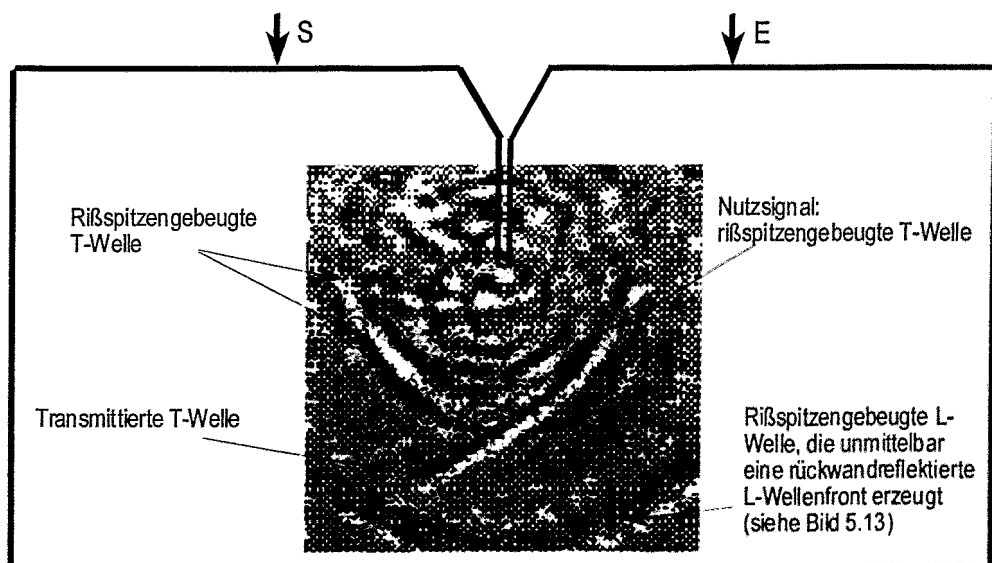


Abb. 5-12. Stroboskopische Detektion der Beugungssignale an der Rissspitze

Beispielhaft werden aus den Meßergebnissen zwei entscheidende Etappen der Schallwellenausbreitung herausgegriffen. In Abb. 5-12. ist der Moment erfaßt, in dem sich die rißspitzengebeugte T-Welle ausgebildet hat und ausbreitet. T- und L- Wellen können aufgrund des unterschiedlich breiten Streifen unterschieden werden, die sich durch die Bildung von Wellentälern und Wellenbergen abzeichnen (L-Wellen haben annähernd die zweifache Schallgeschwindigkeit der dazugehörigen T-Welle). Die Wellenfronten sind in der Darstellung erklärt: Zu sehen ist die rißspitzengebeugte T-Welle, die sich zeitgleich mit der transmittierten T-Wellenfront ausbreitet. Gleichzeitig ist der Prozeß der Rückwandreflexion der vorher rißspitzengebeugten L-Welle gut zu erkennen. Es konnten mehrere Intensitätsmaxima der rißspitzengebeugten T-Wellenfront nachgewiesen werden, die sich in unterschiedliche Richtungen ausbreiten. Besonders deutlich wird der Intensitätsunterschied zwischen der in Richtung Probenrückwand und der in Richtung Empfangsprüfkopf gebeugten T-Wellenfront geringerer Intensität.

In Abb. 5-13. wird die Entstehung von Folgesignalen erfaßt. Rißspitzengebeugte und transmittierte T-Welle erreichen fast die Probenrückwand. Dagegen breiten sich die rückwandreflektierten Wellenfronten bereits in Richtung Rißspitze bzw. Empfangsprüfkopf aus. Eine solche Wellenfront wurde zuerst von der rißspitzengebeugten L-Welle in Form einer L-Welle induziert und eine zweite, nachfolgende in Form einer T-Welle induziert.

Im Ergebnis der stroboskopischen Messungen wurden einzelne Etappen der Wellenausbreitung, der Modewandlung von Wellenfronten und der Rißspitzenbeugung experimentell erfaßt und nachgewiesen. Die anhand von

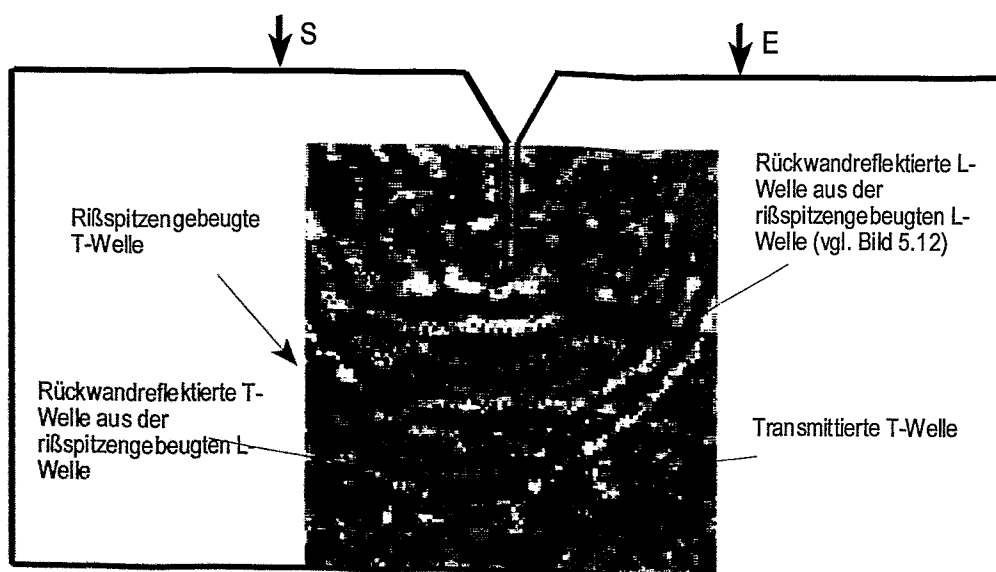


Abb. 5-13. Stroboskopische Detektion rückwandreflektierter Wellenfronten

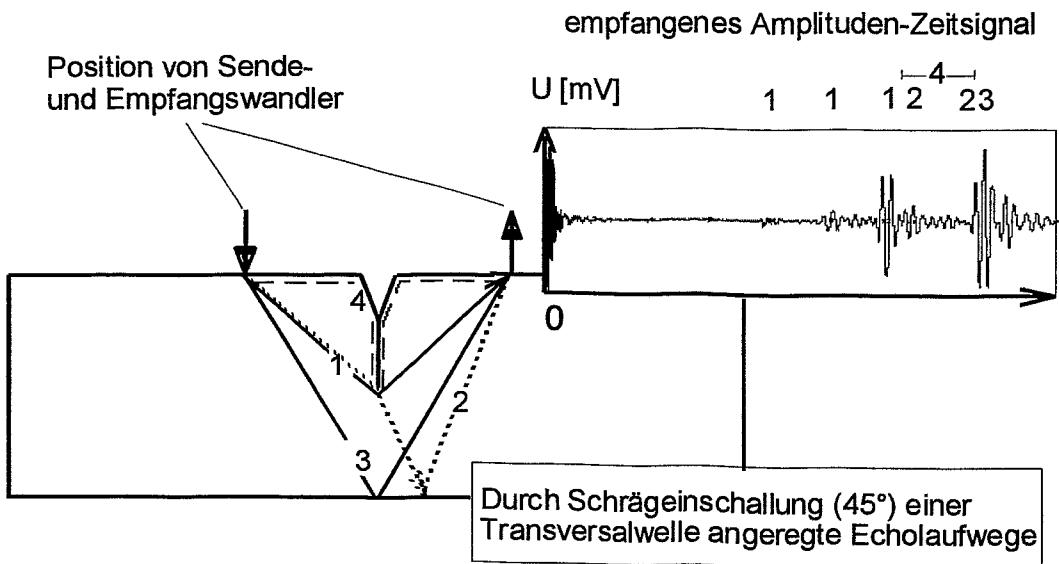
beteiligten Wellenfronten konnte auch im Experiment wiedergefunden werden. Darüber hinaus vermitteln die Messungen einen Anhaltspunkt über die geringe, aber ausreichende Signalintensität des Nutzsignals.

5.2.9 Fazit der Simulationen

Mit den numerischen Simulationen gelang der zweifelsfreie Nachweis der Bildung des Nutzsignals. Es wurden alle empfangenen Amplituden-Zeit-Signale in ihrem Entstehungsweg nachvollzogen und die Abhängigkeit der Signalbildung von Rißfortschritt und Probendeformation verstanden.

In Abb. 5-14. ist ein für diese Prüfsituation typisches Amplituden-Zeit-Signal dargestellt, anhand dessen diejenigen Echoläufe schematisch zusammengefaßt sind, die unter den gegebenen Bedingungen zur Empfangssignalebildung beitragen.

- Von Bedeutung sind prinzipiell drei Laufwege, entlang derer sich die Signale durch Modekonversion, Reflexion und Beugung bilden.
- Aus der Folge der in diesen Amplituden-Zeit-Signalen aufgezeichneten Echos erweist sich das rißspitzengebeugte T-Wellenecho (entlang des Laufweges 1) zur Rißfortschrittmessung im Dreipunktbiegeversuch am geeignetsten.
- Die Laufzeit des rißspitzengebeugten T-Wellenechos ändert sich hauptsächlich durch Rißwachstum, sie wird jedoch in geringem Maß auch durch die Probendurchbiegung und die damit verbundenen geometrischen Veränderungen der Biegeprobe im Rißspitzengebiet beeinflusst.
- Die Untersuchungen tragen trotz der Bezugnahme auf das Testmaterial Stahl universellen Charakter, denn die Ergebnisse sind unter Beachtung der materialabhängigen Schallgeschwindigkeiten auf andere isotrope Materialien übertragbar.



- Laufweg 1: einfallende und gebeugte L-Welle
 einfallende L- und gebeugte T-Welle (und umgekehrt)
 einfallende und gebeugte T-Welle
- Laufweg 2: Modekonversion und Reflexion an der Rückwand der Probe:
 rückwandreflektierte L-Welle (T-L-L)
 rückwandreflektierte T-Welle (T-L-T)
- Laufweg 3: rückwandreflektierte T-Welle
- Laufweg 4: Oberflächenwelle entlang der Proben- und Rißoberflächen

Abb. 5-14. Echoläufe in einer Biegeprobe

5.3 Praktische Umsetzung in die Rißfortschrittsmessung

5.3.1 Kalibrierung des Meßaufbaus

Die Laufzeit des rißspitzengebeugten T-Wellensignals wird durch eine Nulldurchgangsmessung an der abfallenden Flanke des Maximalpeaks des T-Wellensignals ermittelt (siehe Abb. 5-15.). Zur Messung der Laufzeit wird ein digitales Speicheroszilloskop benutzt (Abtastrate 100 MHz), dabei wird jede Schwingung des Ultraschallsignals durch 20 Meßpunkte abgetastet. Danach wurde die Nullstelle durch lineare Interpolation der beiden benachbarten Abtastpunkte der Nulldurchgangslinie bestimmt. Im Prinzip kann so aus der Signallaufzeit des rißspitzengebeugten T-Wellensignals auf seinen Laufweg geschlossen werden. Dazu werden Informationen über das Testmaterial, die Testgeometrie und die Kalibrierdaten der im Versuch zur Anwendung kommenden Ultraschallprüfköpfe benötigt (siehe Tab. 5-1.).

Für jedes Prüfkopfpaar müssen die Parameter Prüfkopfvorlaufzeit und Schallaustrittspunkt bestimmt werden. Der Schallaustrittspunkt wurde nach der Norm DIN EN 12223 [95] am Kontrollkörper K1 ermittelt. Der Schallaustrittspunkt ist als der Punkt definiert, in dem die Achse des Schallbündels aus dem Winkelprüfkopf austritt. Die Messung ergab einen Schallaustrittspunkt von $x = 5$ mm, gemessen von der dem Riß zugewandten Prüfkopfseite aus. Als Prüfkopfvorlaufzeit wird die Zeit t_0 bestimmt, die der Ultraschallimpuls innerhalb der Prüfköpfe zurücklegt. Diese Zeit läßt sich ebenfalls unter Zuhilfenahme des Kontrollkörpers K1 bestimmen, wurde aber im vorliegenden Fall im Experiment an Modellproben in ISO-V-Geometrie mit verschiedenen tiefen elektroerrosiv eingebrachten Kerben (Kerbtiefe: 4 - 6 mm, Schnittbreite: 100 μ m) gemessen. An allen Proben wurden Laufzeitmessungen vorgenommen, die dann nach der Gleichung 5.1 zur Auswertung kamen.

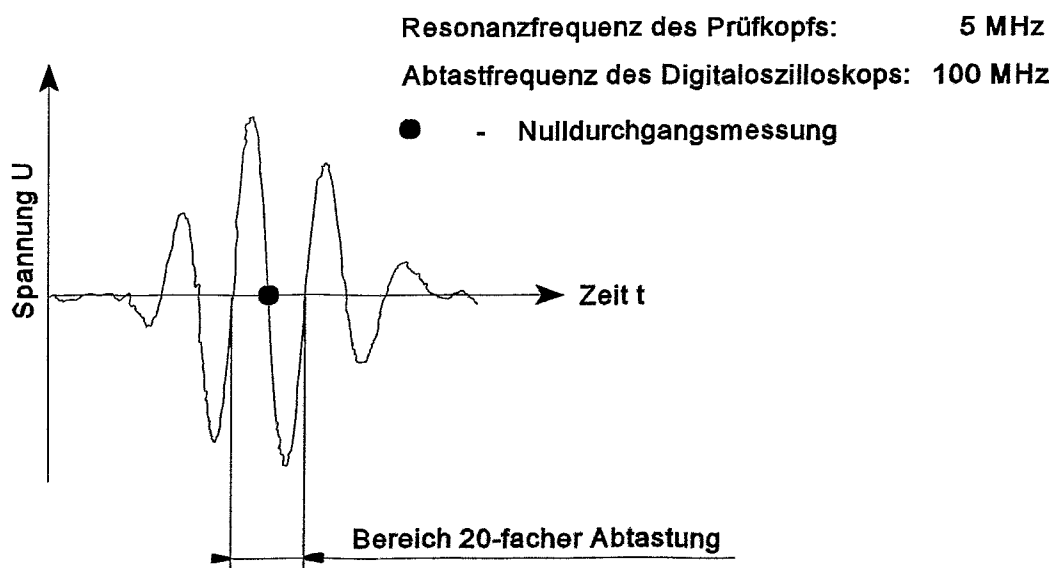


Abb. 5-15. Laufzeitmessung durch Interpolation der Nullstelle

$$a = \sqrt{\left[\frac{c_T (t_m - t_0)}{2} \right]^2 - x^2} \quad (5.1)$$

- a Rißlänge
 c_T Transversalwellengeschwindigkeit im Testmaterial
 t_m gemessene Laufzeit
 t_0 effektive Prüfkopfvorlaufzeit
x Abstand zwischen Rißebe und Schallaustrittspunkt der Prüfkopfauflagefläche

Anhand der gemessenen Laufzeit t_m und der bekannten Kerbtiefe a wurde eine effektive Prüfkopfvorlaufzeit $t_0 = 3.49 \mu\text{s}$ gemittelt. In allen weiteren Messungen wurden die Prüfköpfe so an der Kerbkante ausgerichtet, daß $x = 6 \text{ mm}$ betrug.

5.3.2 Ermittlung des Rißfortschritts

Nachfolgend werden die einzelnen Schritte der Meßwertbearbeitung, beginnend bei der gemessenen Signallaufzeit bis hin zur Ermittlung der aktuellen Rißlänge und des Rißfortschritts, dargestellt. In Abb. 5-16. sind die den Amplituden-Zeit-Signalen entnommenen Laufzeiten des rißspitzengebeugten T-Signals über der dazugehörigen Durchbiegung der Probe aufgetragen. Wie in diesem Beispiel gut zu erkennen ist, zeigen die gemessenen Ultraschallsignale im Anfangsbereich eines Dreipunktbiegeversuches einen steileren Anstieg als im folgenden Bereich (Bereich von 0 - 0.1 mm Durchbiegung). Dieses Verhalten darf nicht als Rißwachstum interpretiert werden, sondern kann darin begründet sein, daß die Rißufer zu Versuchsbeginn Kontakt haben. Schallwellen können auch an diesen Kontaktstellen der Rißufer hinter der eigentlichen Rißspitze übertragen werden.

Die Anfangsphase der Durchbiegung bewirkt die zunehmende Öffnung des Risses beginnend im Kerbgrund. Dadurch verlagert sich die scheinbare Spitze des vollständig geöffneten Teils des Ermüdungsanrisses nach vorn, bis die tatsächliche Spitze des Ermüdungsrisse erreicht ist (Abb. 5-17.).

Für die Ermittlung von Rißwiderstandskurven ist man am Effekt der Rißöffnung nicht interessiert. Zur Rißlängenberechnung aus den gemessenen Signallaufzeiten macht er eine Korrektur der Meßdaten in dieser Anfangsphase der Probendurchbiegung erforderlich. Vollständig geöffnet liegt der Riß spätestens bei einer Durchbiegung von 0.1 mm vor. In einem weiteren Abschnitt nimmt die gemessene Rißlänge nahezu linear zu. Dieser Bereich entspricht dem Prozeß der Rißspitzenabstumpfung. (Abb. 5-18.). Mit Hilfe dieser Meßwerte wird die Anfangsrißlänge a_{0US} durch lineare Extrapolation der Meßwerte im Durchbiegungsbereich von 0.1 - 0.5 mm gegen die Durchbiegung errechnet. (Mit der Darstellung der rotationskorrigierten Meßwertreihe wird der Erklärung des Sachverhaltes im folgenden Abschnitt vorgegriffen.)

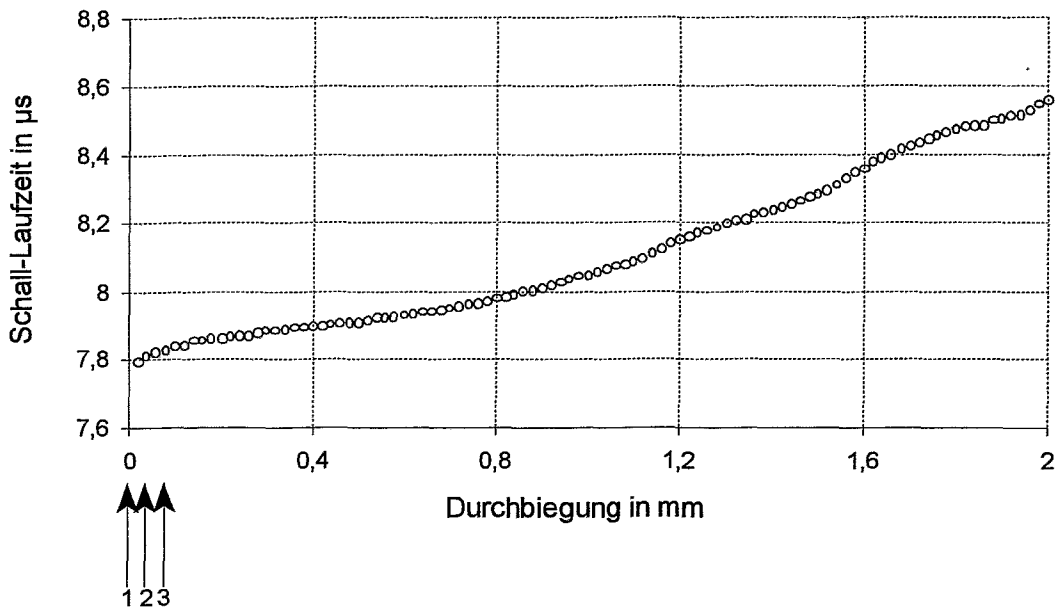


Abb. 5-16. Laufzeit des gebeugten Rißspitzensignals in Abhängigkeit von der aktuellen Probendurchbiegung

Zur Bestimmung des Rißfortschritts wurde diese ermittelte Anfangsrißlänge von der jeweils aktuellen Rißlänge subtrahiert (Abb. 5-19.). So ist die Ermittlung der Anrißlänge mit diesem Verfahren allein aus den Ultraschallmeßdaten möglich. Sie beruht nicht auf der Kenntnis einer optisch an der Bruchfläche der nachträglich aufgebrochenen Probe ermittelten Anfangsrißlänge, wie es z.B. Auswertevorschriften der Elektropotentialverfahren fordern [14]. Die optisch ermittelte Anrißlänge steht somit als zusätzliche Vergleichsgröße zur Verfügung.

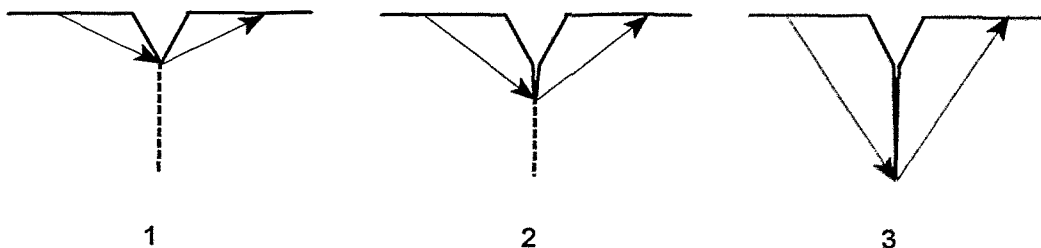


Abb. 5-17. Schallausbreitung an Rißuferkontaktstellen (Abbildungen entsprechend den Markierungen in Abb. 5-16.)

Die Versuchsdurchführung erfolgte voll automatisiert und erbrachte als Ergebnis das Rißfortschritts-Durchbiegungsdiagramm, das den Zusammenhang zwischen der aktuellen Durchbiegung der Biegeprobe im Dreipunktbiegeversuch und des dabei erzielten Rißfortschritts wiedergibt.

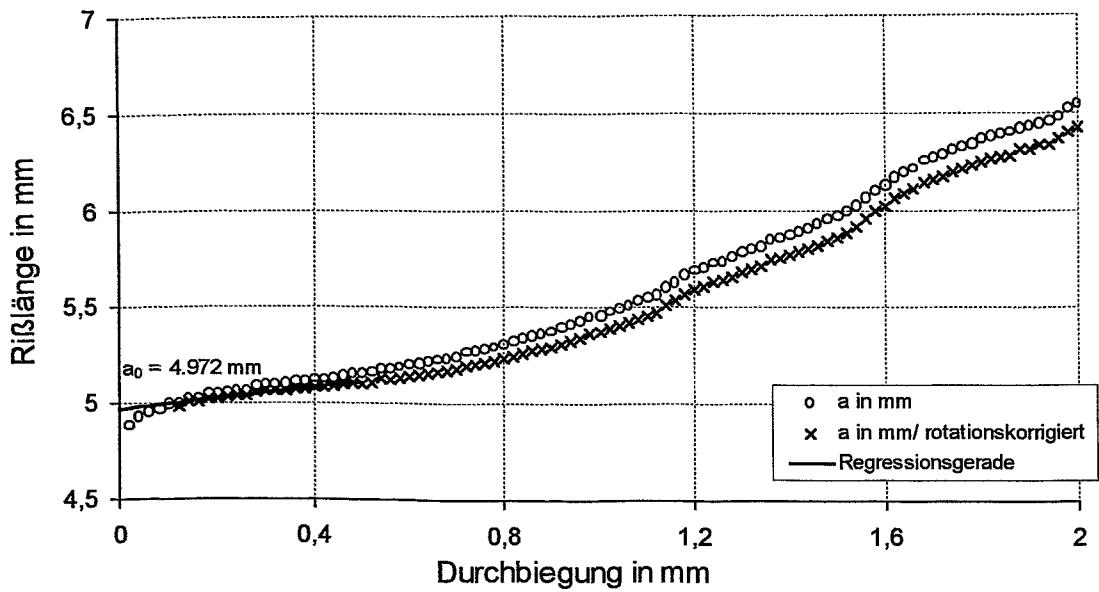


Abb. 5-18. Darstellung der aktuellen Rißlänge in Abhängigkeit von der Durchbiegung, Bestimmung der Anfangsrißlänge a_{0US}

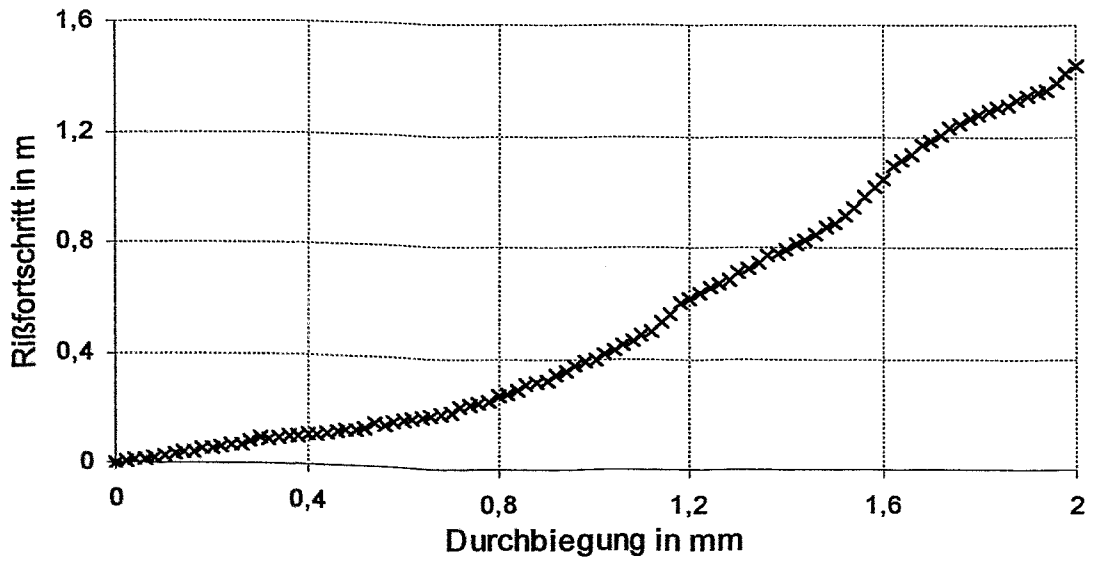


Abb. 5-19. Ermittlung des aktuellen Rißfortschritts

5.3.3 Berücksichtigung der Probendurchbiegung

Unter der Annahme, daß sich die beiden gedachten Hälften einer Biegeprobe bei Durchbiegung um die Rißspitze als Rotationszentrum drehen, würde die Gleichung 5.1 in allen Phasen eines Dreipunktbiegeversuches zutreffend sein. Wie bereits in Abschnitt 5.3.5 ausgeführt wurde, hat außer dem Rißfortschritt auch die Probendurchbiegung einen Einfluß auf die Laufzeit des Rißspitzensignals (siehe auch Abb. 5-9.). Der Durchbiegungsprozeß kann als Drehung zweier Probenhälften einer Biegeprobe veranschaulicht werden, in dem sich die beiden Hälften um ein Rotationszentrum drehen, daß der Rißspitze um einen Betrag $r(W - a)$ vorgelagert ist. In Abb. 5.20 ist die geometrische Situation der Probendurchbiegung dargestellt.

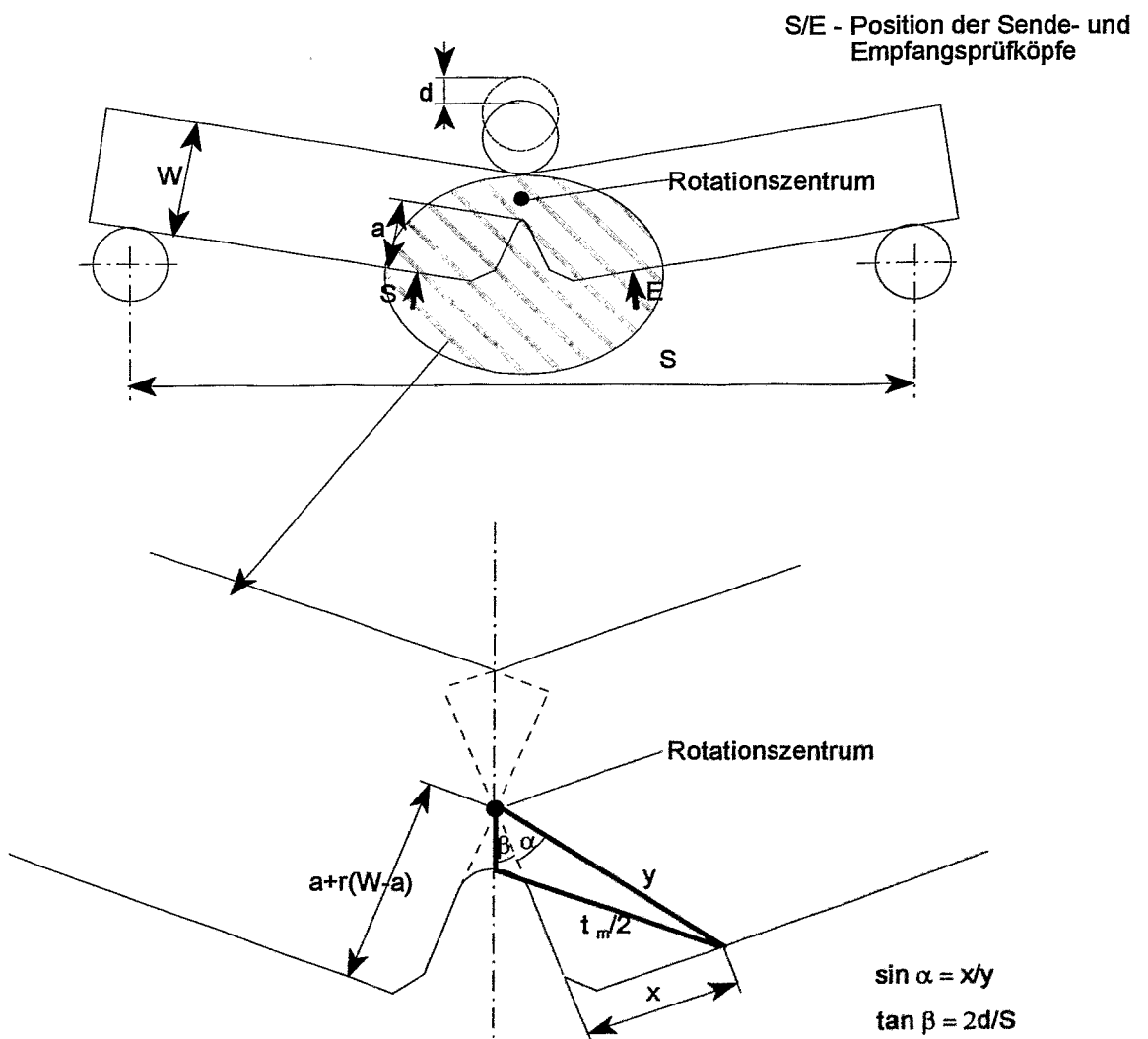


Abb. 5-20. Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Signallaufweg und Probendehnung

Die Probenhälften drehen sich um den von der aktuellen Rißlänge abhängigen, als Rotationszentrum gekennzeichneten Punkt. Das hat zur Folge, daß das Ultraschallsignal auf seinem Weg von Sendeprüfkopf um die Rißspitze zum Empfangsprüfkopf einen sich zunehmend verformenden Bereich der Probe durchläuft. Die Laufwegveränderung infolgedessen muß von der Laufwegveränderung infolge der Rißausbreitung eliminiert werden.

Der Zusammenhang zwischen der gemessenen Laufzeit t_m und der Rißlänge wird in Gleichung 5.2 beschrieben, die sich durch Auswertung der Dreiecksbeziehung ergibt.

$$t_m = \frac{2}{c_T} * \sqrt{y^2 + [r(W-a)]^2 - 2yr(W-a) \cos \left[\text{atan} \left(\frac{2d}{S} \right) + \text{asin} \left(\frac{x}{y} \right) \right]} + t_0 \quad (5.2)$$

$$y = \sqrt{x^2 + [a+r(W-a)]^2} \quad (5.3)$$

Der Sachverhalt der Rotationszentrumsverschiebung wird entsprechenden Prüfvorschriften zur Bestimmung der kritischen Rissöffnungsverschiebung [8] entlehnt. Der Rotationsfaktor wird unter den vorliegenden Bedingungen für Biegeproben $r = 0.4$ gesetzt, er kann sich jedoch materialabhängig ändern. W bezeichnet die Probenhöhe (10 mm) und a die aktuelle Rißlänge, d bezeichnet die Probendurchbiegung, S den Abstand zwischen beiden Auflagerrollen. Die Gleichung erfordert eine numerische Lösung, da sie sich nicht nach a auflösen läßt. Die unter Berücksichtigung dieses Sachverhaltes errechneten Werte sind in Abb. 5-18. den nicht rotationskorrigierten Werten gegenübergestellt.

In Abb. 5-21. ist der Zusammenhang zwischen Probendurchbiegung (X-Achse), Rißlänge (Y-Achse) und der resultierenden Signallaufzeit (Z-Achse) veranschaulicht. Durchbiegung und Rißlänge werden in dem jeweils für diese Größen relevanten Bereich betrachtet: d : 0 - 3 mm, Δa : 4.5 - 7.5 mm. Sowohl Rißfortschritt als auch Probendurchbiegung tragen zu einer Erhöhung der Signallaufzeit bei. Im wesentlichen wird die zunehmende Laufzeit des rißspitzengebeugten T-Signals von dem fortschreitenden Rißwachstum erreicht, eine geringe Laufzeitzunahme wird jedoch auch durch zunehmende Probendurchbiegung hervorgerufen. Beispielhaft würde für den hypothetischen Fall von $d = 3$ mm, $\Delta a = 0$, ein Rißfortschritt von ca. 200 μm vorgetäuscht.

Die Nichtbeachtung der plastischen Verformung der Biegeprobe würde zu einer Überschätzung des eingetretenen Rißfortschritts führen bzw. im Stadium der Rißspitzenabstumpfung bereits Rißfortschritt anzeigen.

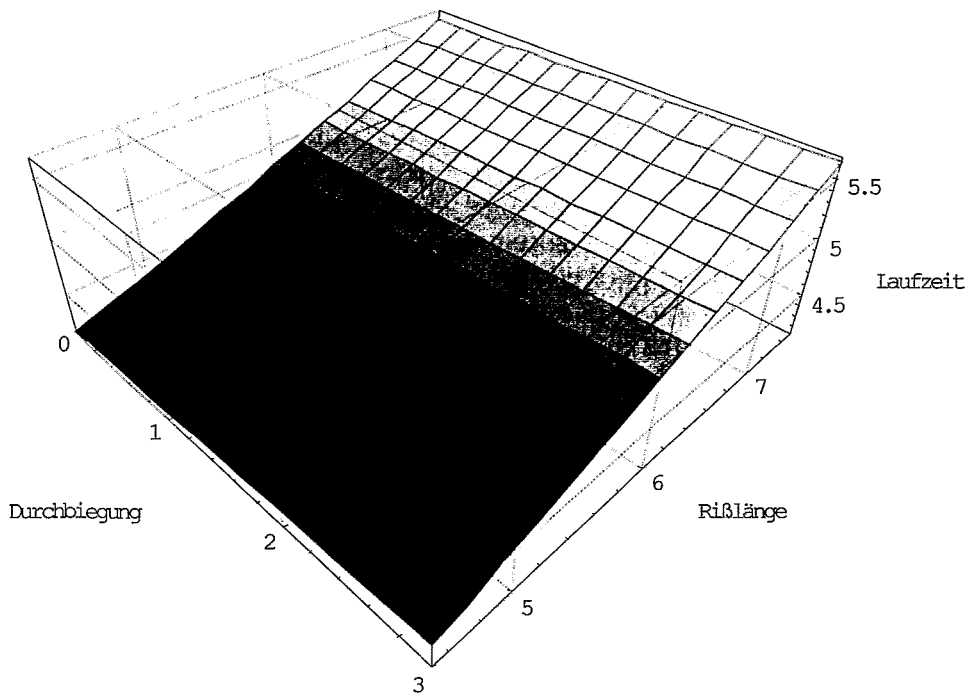


Abb. 5-21. Einfluß von Rißlänge und Probendurchbiegung auf die Signallaufzeit

5.3.4 Bildgebendes Auswerteverfahren

Die Information über den Rißfortschritt wird, wie eingangs vorgestellt, dem Amplituden-Zeitsignal (siehe Abb. 5-1.) anhand der Signallaufzeit des Rißspitzenechos entnommen. Unter Umständen kann es im Verlauf eines Experimentes zu Diskontinuitäten, wie zeitweisen Signalüberlagerungen oder Amplitudenverlusten kommen, die die Versuchsauswertung nach dem vorgestellten Algorithmus beeinträchtigen. Zur Bewertung der Veränderungen der empfangenen Echofolge im Verlauf eines Biegeversuches wurde eine bildhafte Darstellungsform entwickelt, die den vollständigen Versuchsablauf mit seiner hohen Meßpunktdichte kompakt und übersichtlich widerspiegelt. Sie basiert auf der Grauwertskalierung der gemessenen Amplituden-Zeitsignale (Abb. 5-22.). Die Echofolgen wurden jeweils über den Zeitbereich aufgetragen, in dem während des Biegeversuches rißspitzengebeugte Echos erscheinen können. Die Amplituden jeder Echofolge werden in Grauwerte umgewandelt. Jede Echofolge geht damit in eine grauwertmodulierte Zeile über, in der dem größten negativen Ausschlag schwarz und dem größten positiven Ausschlag weiß zugeordnet ist. Alle Grauwertzeilen, die während eines Biegeversuches in regelmäßigen Inkrementen der Durchbiegung aufgezeichnet wurden, ermöglichen so übereinandergereiht die Veranschaulichung aller Veränderungen der Echofolgen. Die

Abszisse des resultierenden Bildes entspricht der Laufzeit der Ultraschallsignale, die Ordinate entspricht der Durchbiegung der Probe während des Biegeversuches.

In Abb. 5-22. ist ein derartiges Grauwertbild dargestellt. Zum besseren Verständnis sind die den Zeilen 1 und 101 entsprechenden Amplituden-Zeitsignale in die Darstellung eingefügt worden. Der Versuchsverlauf wird von unten nach oben gelesen.

Das Grauwertbild veranschaulicht einen Dreipunktbiegeversuch an einer Probe aus 10CrMo9-10. In nachfolgend beschriebener Weise läßt die Prozeßvisualisierung Schlüsse auf den Verlauf der Rißausbreitung in der Dreipunktbiegeprobe zu. Die bereits diskutierten Echos erzeugen deutlich erkennbare Streifenmuster. Das Streifenmuster in der Bildmitte entsteht durch das Rißspitzenecho, die Streifen in der rechten Bildhälfte durch das rückwandreflektierte T-Wellenecho.

Das dem Rißspitzenecho entsprechende Streifenmuster neigt sich aufgrund des fortschreitenden Risses nach rechts. Im Bereich der unteren Bildkante verläuft das Streifenmuster vergleichsweise flach, wobei seine Intensität zunimmt. Daran anschließend verläuft das Streifenmuster bis etwa 1/4 der Bildhöhe extrem steil. Daran schließt sich wieder ein zunehmend flacherer Streifenverlauf an.

Probendurchbiegung,
0.01 mm pro Messung,
101 Messungen

Probenmaterial: 10CrMo9-10
Probe: 16_3
stabiles Rißwachstum: 1,519 mm

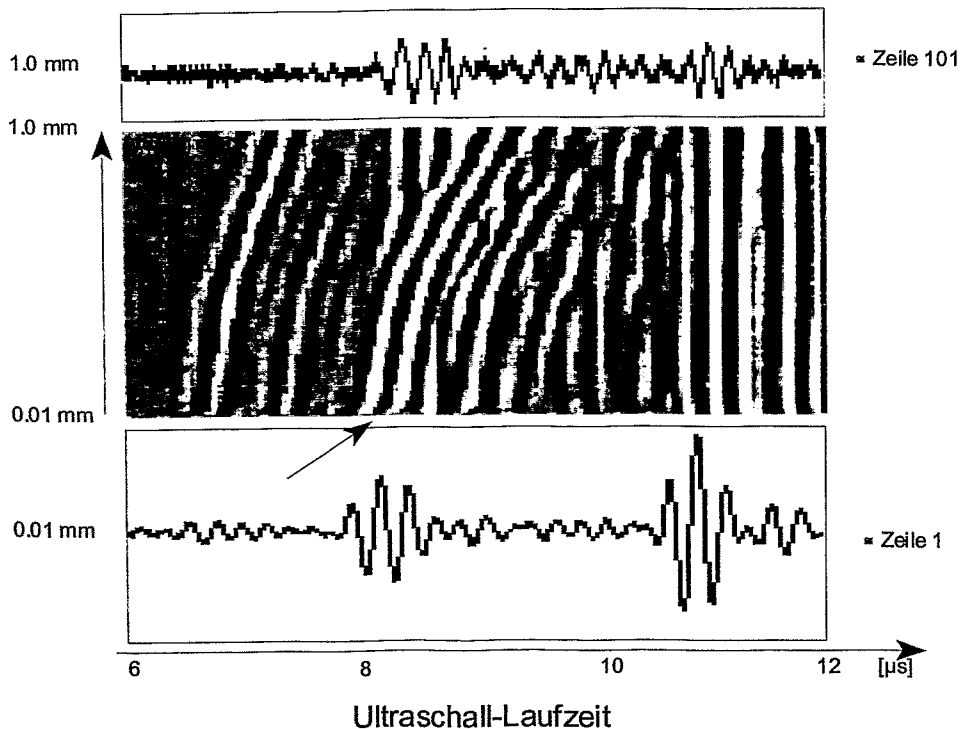


Abb. 5-22. Ultraschall-Prozeßbild, der Pfeil weist auf den zur Messung herangezogenen Nulldurchgang hin

Diese drei Bildbereiche (Durchbiegungsbereiche) entsprechen in dieser Reihenfolge der Öffnung des noch teilweise geschlossenen Ermüdungsanrisses, der Reißabstumpfung und der stabilen Reißausbreitung. Das T-Wellenecho wird von einer Reihe anderer Echos begleitet, die aber seine Identifizierbarkeit und Auswertbarkeit nicht beeinträchtigen. Währenddessen verläuft das dem Rückwandecho entsprechende Streifenmuster weitestgehend vertikal, so wie auch die Probendicke während des Versuches nahezu konstant bleibt.

Ziel dieser Form der Bildgebung ist es, die Aussagekraft der Meßergebnisse deutlich zu erhöhen:

- Die Bildgebung vermittelt einen Gesamteindruck über den Versuchsverlauf.
- Die einzelnen Reißbildungsstadien Reißöffnung, Reißspitzenabstumpfung, Reißfortschritt können identifiziert werden.
- Es wird ermöglicht, eventuelle im Verlauf des Versuches auftretende Diskontinuitäten zu erkennen, so daß Fehlinterpretationen vermieden werden.
- Durch Ausnutzung der Bildinformation kann der Reißfortschritt auch dann weiterverfolgt werden, wenn das Reißspitzenecho teilweise durch ein anderes überlagert ist.
- Die Analyse dieser Darstellung erlaubt eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Reißfortschrittsmessung bzw. erlaubt die Festlegung von Grenzen, innerhalb derer eine eindeutige Vermessung des Nutzsignals möglich ist. Bei Bedarf kann gezielt auf die Originaldaten zurückgegriffen werden.

5.4 Grenzen und Genauigkeit des Verfahrens

Mit dem Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren wird ein Reißfortschrittsmeßverfahren vorgeschlagen, das bei der Prüfung von kleinen Biegeproben mit ausgeprägt duktilem Materialverhalten zur Erfassung des duktilen Reißfortschritts zur Anwendung kommen soll.

Die Meßgenauigkeit des ULB-Verfahrens wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt, die in unterschiedlichen Maße auf das Meßergebnis Einfluß nehmen. Im wesentlichen sind dabei

- die erreichbare Meßgenauigkeit der verwendeten Meßgeräte,
- der Verlauf der Reißfront (Krümmung, Zerklüftung),
- die Genauigkeit der Kalibrierung des Meßaufbaus,
- die Reproduzierbarkeit der Prüfkopfkopplung,
- die Genauigkeit der experimentell ermittelten Vergleichsangaben (optische Vermessung des erreichten Reißfortschritts, Größe der Reißspitzenabstumpfung).

zu benennen. Die einzelnen Einflußfaktoren werden im folgenden in tabellarischer Form betrachtet.

Die Nachweisgrenze für die Erfassung von Reißfortschritt mit dem ULB-Verfahren tritt ein, wenn die Reißspitze aus dem Schallbündel des Ultraschallsenders herausgewachsen ist. Das ist unter den vorliegenden Bedingungen ungefähr bei

$a = 7$ mm der Fall. Bei zeitweiliger Überlagerung des Rißspitzenechos mit einem Folgesignal anderen Laufwegs kann das Rißspitzenecho mit Hilfe des Prozeßablaufbildes verfolgt und der Rißfortschritt interpoliert werden. Ein genauer Wert läßt sich für das Auftreten dieses Effekts nicht angeben, da infolge von unterschiedlich duktilem Materialverhalten das Zusammenwirken von Probendurchbiegung und Rißausbreitung nicht konstant bleibt. Als Grenzwert zur Rißfortschrittsermittlung mit dem ULB-Verfahren soll der Wert angegeben werden, der dem Maximalwert der ermittelten Meßergebnisse für Rißfortschritt entspricht: $\Delta a = 2.8$ mm bei $a_0 = 4.8$ mm.

Tab. 5-3. Meßgenauigkeit und Modellannahmen bei der Anwendung des ULBV

Auflösung	
1 Synchronisationsfehler	Reziprok der Abtastrate (100 MSample): $4 \text{ ns} \approx \text{ca. } 5 \mu\text{m}$
2 Laufzeitmessung anhand einer Nullstelle	lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Abtastpunkten: $< 1 \text{ ns} \approx < 1 \mu\text{m}$
3 Anrißlängenvergleich	Auflösung des Werkzeugmikroskops: $10 \mu\text{m}$
Modellannahmen	
4 Laufzeitanteile in den Prüfköpfen und in der Koppelschicht	werden in einer experimentell ermittelten Vorlaufzeit zusammengefaßt (systematischer Fehler), möglicher Rißlängenmeßfehler: ca. $100 \mu\text{m}$, Rißfortschrittsmeßfehler ($\Delta a = a_{\text{end}} - a_0$) sind aufgrund der starren Prüfkopfkopplung vernachlässigbar gering
5 plastische Deformation	wird in Form eines geometrischen Zusammenhangs in der Rotationskorrektur berücksichtigt, eine Abweichung des Rotationskorrekturfaktors um 10% entspricht einem Rißfortschrittsfehler von ca. $20 \mu\text{m}$
6 Schallgeschwindigkeit	Änderungen der Schallgeschwindigkeit durch mechanische Spannungen und Verformungsgrad werden nicht berücksichtigt: mögliche Geschwindigkeitsänderungen $< 0.1\% \approx < 10 \mu\text{m}$,

7 Krümmung und Zerklüftung der Rißfront	das Verfahren ersetzt die gekrümmte und zerklüftete Rißfront durch eine effektive gerade Rißfront, das Verfahren unterscheidet sich von den genormten Einprobenverfahren durch die Berücksichtigung eines kleineren Bereiches der Rißfront (das Schallfeld mittelt über einen Bereich der Rißfront von ca. 5 mm) , der maximaler Meßfehler liegt in der Größenordnung der Rißfrontkrümmung (max. ca. 200 μm), typischer Wert: 50 μm (durch die Messung des Rißfortschritts im Probeninneren wird der vorzugsweise der Rißfrontbereich vermessen, bei dem ebener Dehnungszustand herrscht)
---	---

Der geschätzte maximale Rißfortschrittsmeßfehler des Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens liegt bei $< 100 \mu\text{m}$, der wahrscheinliche Fehler liegt jedoch deutlich unter diesem Wert. Die Genauigkeit des Meßverfahrens wird erheblich von der Form der Rißfront bestimmt und hängt von der Genauigkeit des auf $r = 0.4$ bestimmten Rotationsfaktors ab. Der Einfluß der Fehlerursachen 1-4 und 6 können vernachlässigt werden. In nachfolgendem Kapitel 7 wird die tatsächlich erreichte Genauigkeit bei der Bestimmung des Rißfortschritts anhand der Gegenüberstellung von optisch und mittels Ultraschallverfahren bestimmter Rißfortschrittsmeßergebnisse dargestellt.

6 Experimentelles

6.1 Werkstoffe und Proben

6.1.1 Auswahl der Werkstoffe

Um einen breiten Anwendungsbereich der bruchmechanischen Kennwertermittlung mit dem Ultraschallverfahren darzustellen, wurden Vertreter unterschiedlicher Werkstoffgruppen ausgewählt. Einerseits sollen aus bruchmechanischer Sicht unterschiedliche Werkstoffeigenschaften vorliegen und andererseits wird ein Spektrum von Materialien mit unterschiedlichen Schalleigenschaften erprobt. Der Anwendungsschwerpunkt des Einprobenverfahrens lag bei Stählen mit elastisch-plastischem Bruchverhalten (vgl. Aufgabenstellung).

Der warmfeste Stahl 10CrMo9-10 wurde durch zwei verschiedene Wärmebehandlungszustände in seinem Zähigkeits-Festigkeitsverhalten variiert. Der Druckbehälterstahl 20MnMoNi5-5 und der höherfeste Baustahl S 460 N wurden im Lieferzustand untersucht. Ergänzt wurde die Werkstoffauswahl durch eine Materialprobe der Aluminiumknetlegierung AA2024, die eine ähnliche Zusammensetzung wie die Legierung AlCu4Mg1 aufweist und durch den Gußeisenwerkstoff EN-GJS-400-24C. Dieses Material war Gegenstand ausführlicher Untersuchungen an der Bergakademie Freiberg und trägt dort die interne Bezeichnung 8AZ [10, 46, 96].

Die chemische Zusammensetzung aller zur Verfügung stehenden Untersuchungswerkstoffe wird in Tab. 6-1. angegeben.

Tab. 6-1. Chemische Zusammensetzung der untersuchten Materialien

	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni	Cu	Mg	Fe
S 460 N	0.17	0.28	1.52	0.009	0.009	0.01	0.04	0.62	0.03	-	Rest
10CrMo 9-10	0.10	0.32	0.55	0.01	0.019	0.96	2.32	0.10	0.15	-	Rest
20MnMoNi 5-5	0.22	0.29	1.26	0.007	0.008	0.51	0.08	0.78	0.08	-	Rest
EN-GJS-400-24C	2.88	2.38	0.22	0.018	0.006	0.001	0.055	0.015	0.066	0.056	Rest
	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Si	Fe	Al		
AA 2024	4.38	0.48	1.18	0.004	0.064	0.02	0.07	0.152	Rest		

6.1.2 Eigenschaften und mechanische Werkstoffkennwerte

Der mit Härtegefüge (950°/Öl) vorliegende Stahl 10CrMo9-10 wurde bei 600°C bzw. 720°C 2 Stunden anlaßgeglüht und an Luft gekühlt. Die dabei erhaltenen Materialeigenschaften führen wie beabsichtigt auch zu deutlich unterschiedlichem Rißabstumpfungsverhalten und Variationen in der zu erwartenden Größe der SZW. Der zähere Werkstoff von beiden führt in dieser Arbeit die interne Probenbezeichnung 3_ (950°/Öl/720°C/Luft-2h), der sprödere, aber dennoch duktil versagende Werkstoff führt die Probenbezeichnung 1_ (950°/Öl/600°C/Luft-2h). Der Gußeisenwerkstoff EN-GJS-400-24C wurde an dem Gießereiinstitut der TU

Bergakademie Freiberg im Sandformgußverfahren zu Y2-Proben vergossen und zur Einstellung eines einheitlichen ferritischen Grundgefüges einer Wärmebehandlung unterzogen (920°/ 120 min/ Ofenabkühlung) [96]. In Tab. 6-2. sind mechanisch-technologische Kennwerte der untersuchten Werkstoffe zusammengefaßt.

Tab. 6-2. mechanisch-technologische Kennwerte der untersuchten Materialien

Werkstoff	$R_{p0.2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_g [%]	A_5 [%]	Z [%]	E [GPa]	C_L [m/s]	C_T [m/s]
10CrMo9-10 (L-T), Zustand 1	739	846	7	18	73	205	5920 ¹⁾	3240 ¹⁾
10CrMo9-10 (L-T), Zustand 3	452	569	10	26	80	210	5920 ¹⁾	3240 ¹⁾
S 460 N (L-T)	475	643	10	24	65	205 ¹⁾	5920 ¹⁾	3240 ¹⁾
20MnMoNi5-5 (L-S)	501	640	-	23.2	59	209	5920 ¹⁾	3240 ¹⁾
EN-GJS-400-24C	274 ²⁾	395 ²⁾	-	24 ²⁾	24 ²⁾	159 ²⁾	5690	3095
AA 2024 (L-T)	270 ¹⁾	380 ¹⁾	-	-	-	-	6320	3130

6.1.3 Proben

Aus den aufgeführten Werkstoffen wurden ausschließlich Proben in ISO-V-Geometrie nach DIN 50115 mit 20% Seitkerbung gefertigt. Die Probenmaße betragen 55 mm x 10 mm x 10 mm. Nach dem elektroerosiven Schneiden der Probenkontur (einschließlich Seitkerbung) wurden die Proben auf a_0/W -Verhältnis von ca. 0.5 ermüdungsangeschwungen. Im folgenden werden die Gefüge (Tab. 6-3.), die Orientierung der Biegeproben und die entsprechenden Gefügebilder dargestellt.

Tab.6-3. Gefüge der untersuchten Werkstoffe

Werkstoff	Gefüge	Abb.
10CrMo 9 10 (L-T), Zustand 1	Bainitisches Gefüge	6-1.
10CrMo9-10 (L-T), Zustand 3	Bainitisches Gefüge mit Anteilen voreutektoiden Ferrits (helle Bereiche)	6-2.
S 460 N (L-T)	ferritisch-perlitisches Gefüge, starke Perlitzeitigkeit senkrecht zur Rißausbreitungsrichtung	6-3.
20MnMoNi5-5 (L-S)	Bainitisches Gefüge	6-4.
EN-GJS-400-24C ²⁾	ferritische Matrix (F) mit eingelagerten kugelförmigen Grafitteilchen, $d_G = 28 \mu\text{m}$, $d_F = 40 \mu\text{m}$	6-6.
AA 2024 (L-T)	typische Walzstruktur	6-5.

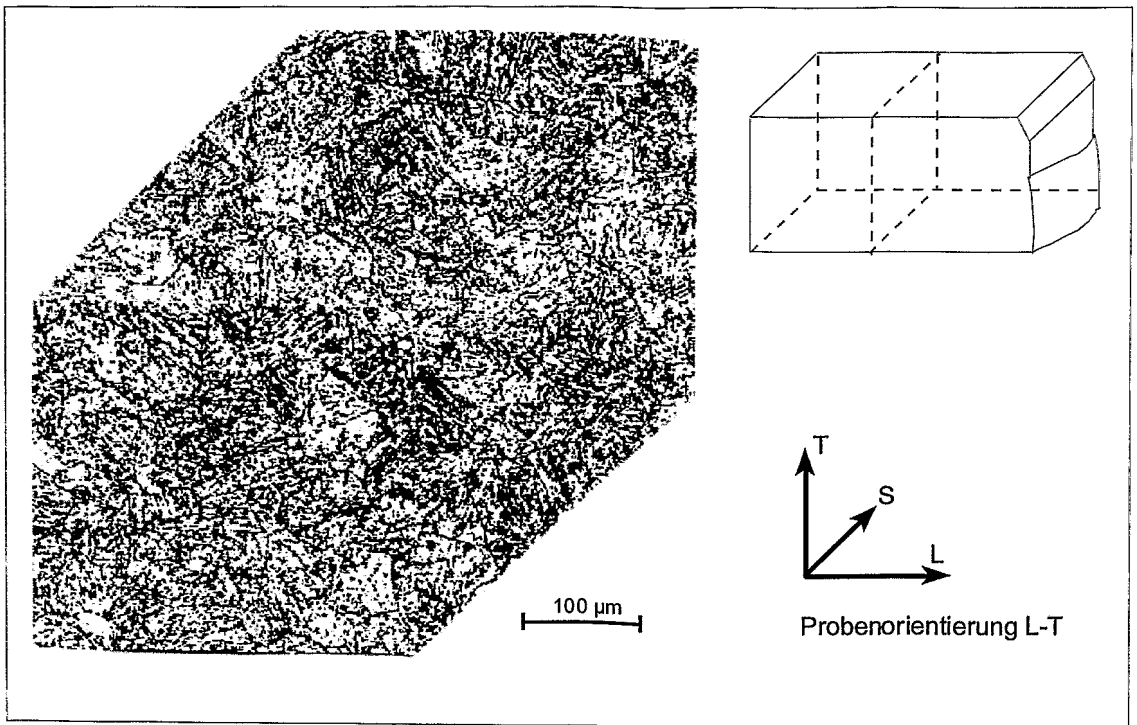


Abb. 6-1. Material 10CrMo9-10, 950°C/Öl, 600°C/Luft - 2h

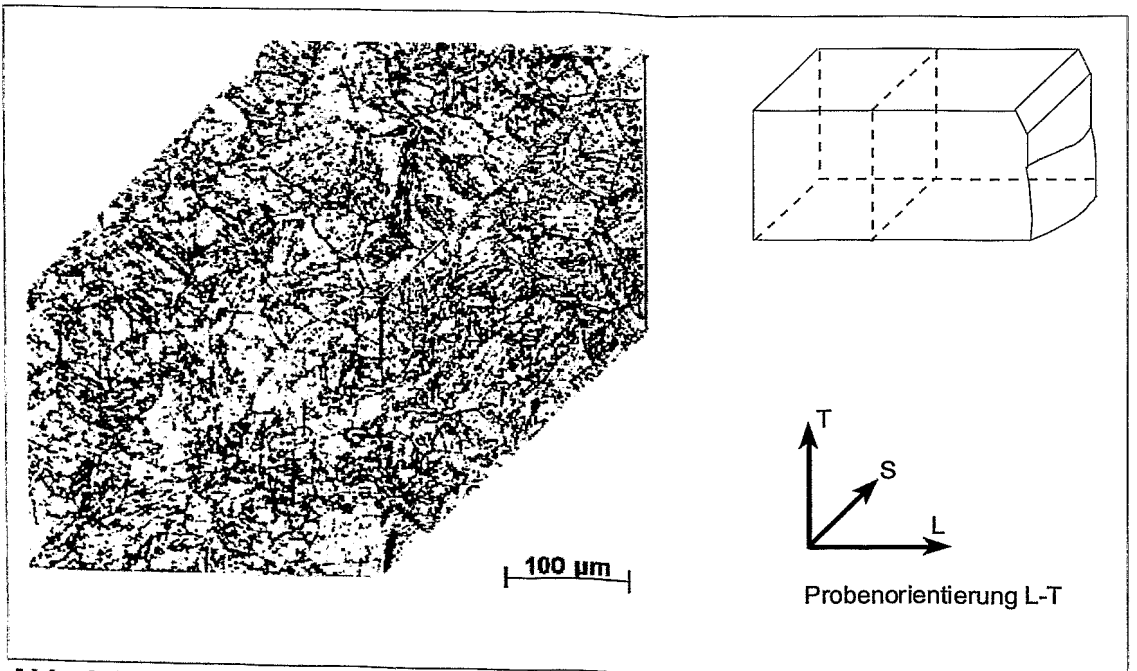


Abb. 6-2. Material 10CrMo9-10, 950°C/Öl, 720°C/Luft - 2h

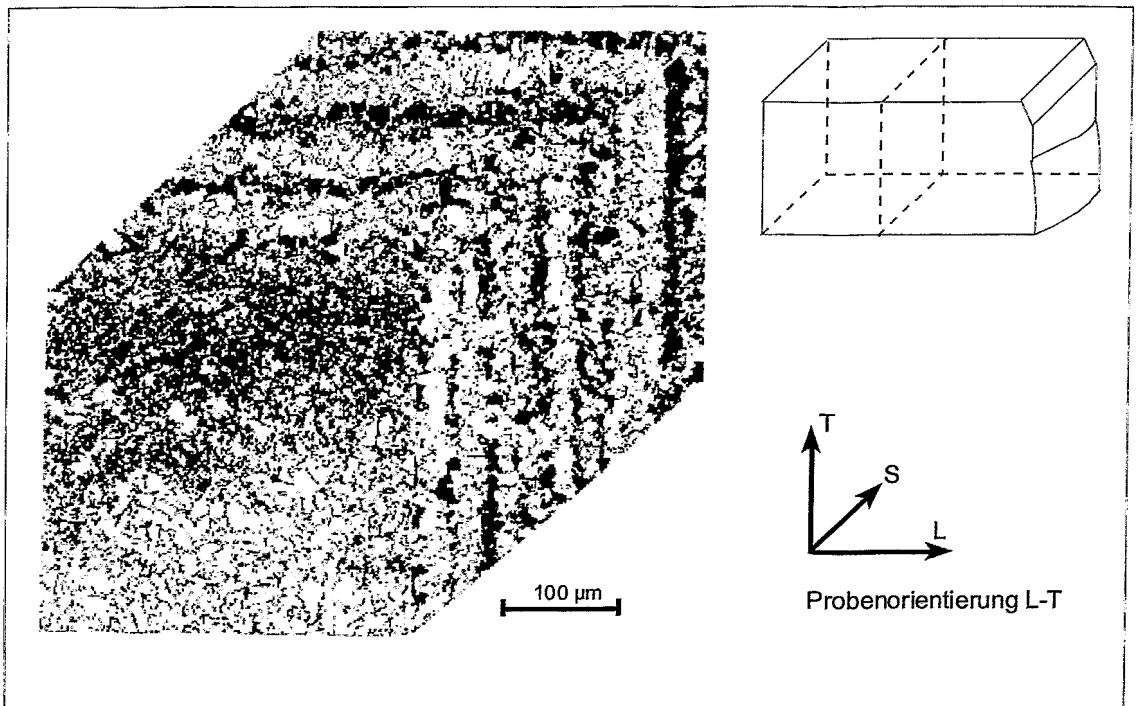


Abb. 6-3. Material S460N

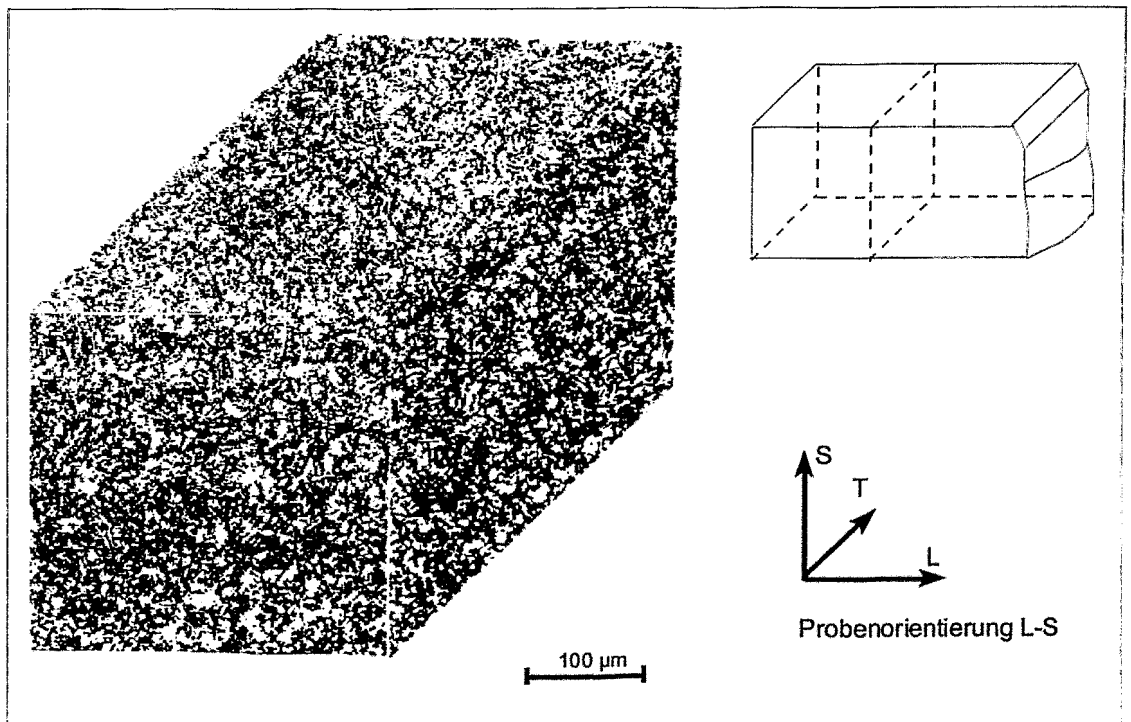


Abb. 6-4. Material 20MnMoNi5-5

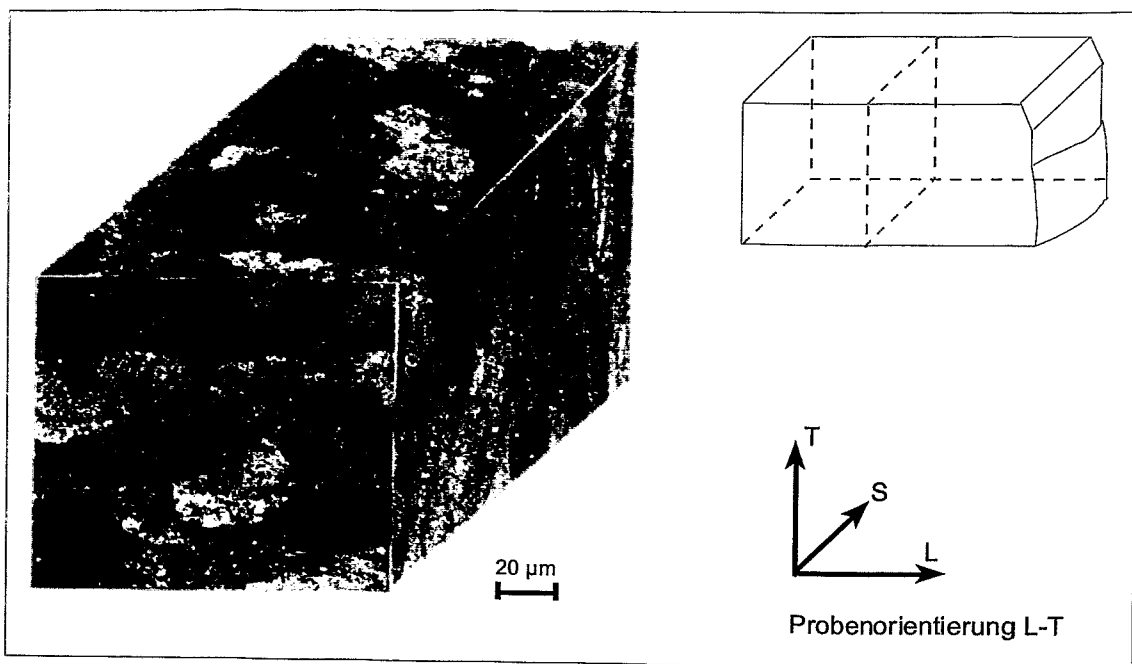


Abb. 6-5. Material AA 2024

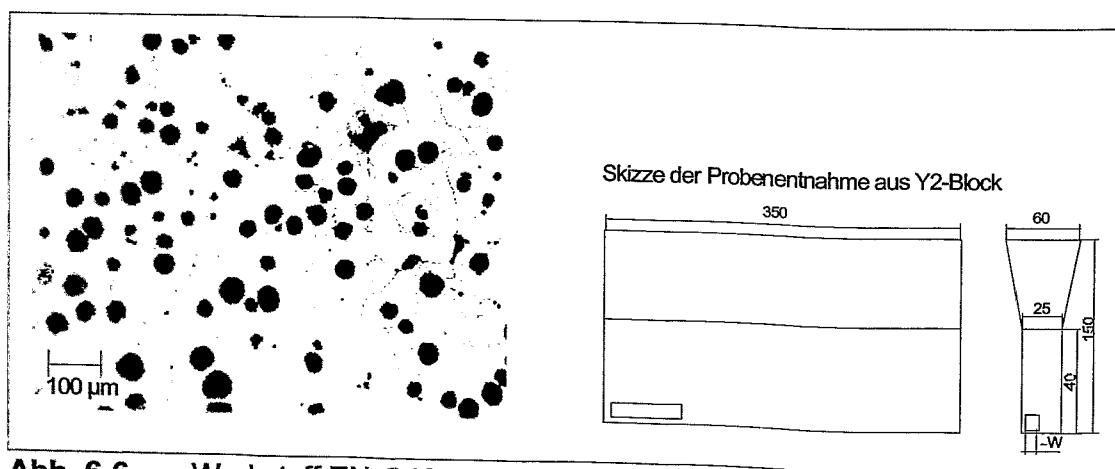


Abb. 6-6. Werkstoff EN-GJS-400-24C

6.2 Versuchsdurchführung

6.2.1 Dreipunktbiegeversuch

Die Dreipunktbiegeversuche erfolgten an der spindelangetriebenen Werkstoffprüfmaschine TIRA-Test 2300. Die Versuche wurden weggesteuert durchgeführt. Dabei wurden die Last und die Lastangriffspunktverschiebung entlang der Kraftwirkungsebene aufgezeichnet. Die ISO-V-Proben wurden ausschließlich bei Raumtemperatur geprüft. Die Stützweite der Probenauflagepunkte betrug 40 mm, die Prüfgeschwindigkeit der quasistatischen Biegeversuche betrug 0.03 mm/min. Diese geringe Prüfgeschwindigkeit wurde gewählt, um die Werkstoffprüfmaschine TIRA-Test in das GBIP-gesteuerte Ultraschallprüfsystem einbinden zu können. Die Lastpunktverschiebung längs der Kraftwirkungsebene wurde mit einem induktiven Dehnungswegaufnehmer D3/2000 gemessen. Die Versuche wurden bei einer Probendurchbiegung von 3 mm oder bereits zu früheren Zeitpunkten zu unterschiedlichen Stadien der Rißausbreitung abgebrochen.

Die Ermüdungsanrißerzeugung der ISO-V-Proben erfolgte mit dem Resonanzermüdungssystem CRACKTRONIC 70 (70 Nm) der Firma Rumul.

6.2.2 Ultraschallmeßplatz

Der Ultraschallmeßplatz wurde so aufgebaut, daß er den Rahmenbedingungen der Prüfvorschrift nach ESIS P2-92 [6] entsprach. In Abb. 6-7. ist der Meßaufbau schematisch dargestellt. Die Probeninstrumentierung mittels Ultraschallwandler berücksichtigt den Raumbedarf der Proben und Biegevorrichtung während der Dreipunktbiegung. Unter diesen Gesichtspunkten wurde eine Prüfanordnung entwickelt, in der die Schallwandler auf der rißbehafteten Probenoberfläche mit speziell gefertigten Federdrahtklemmen positioniert und fixiert werden. Als Ultraschallwandlerpaar kamen 45°-"Miniatur"-Winkelschallwandler (PANAMETRICS, Bauart A 5015, Nennfrequenz 5MHz) zum Einsatz.

Während des Biegeversuches löste die Werkstoffprüfmaschine in regelmäßigen Inkrementen der Probendurchbiegung Triggerimpulse zur Ultraschallmessung aus. In der Grundeinstellung wurde während eines Dreipunktbiegeversuches im Abstand von 10 µm Probendurchbiegung eine Ultraschallmessung initiiert. Die Ultraschallsignale wurden von einem Ultraschall-Sender/Empfänger PR 5800 (Panametrics) ausgelöst, empfangen, verstärkt und an ein Speicheroszilloskop (Tektronix TDS 520) weitergeleitet, abgetastet und digitalisiert. Die Echofolgen wurden mit einer Meßfrequenz von 100 MHz abgetastet. Beide Geräte waren zueinander synchronisiert. Im Steuer- und Auswerte-PC wurden die Ultraschallmeßdaten und die Kraft-Durchbiegungsdaten der Werkstoffprüfmaschine erfaßt und ausgewertet. Die Geräte waren über GBIP-Schnittstellen miteinander gekoppelt. Die Meßdaten wurden mit eigenentwickelter Auswerte-Software weiterverarbeitet und mit kommerzieller Software präsentiert.

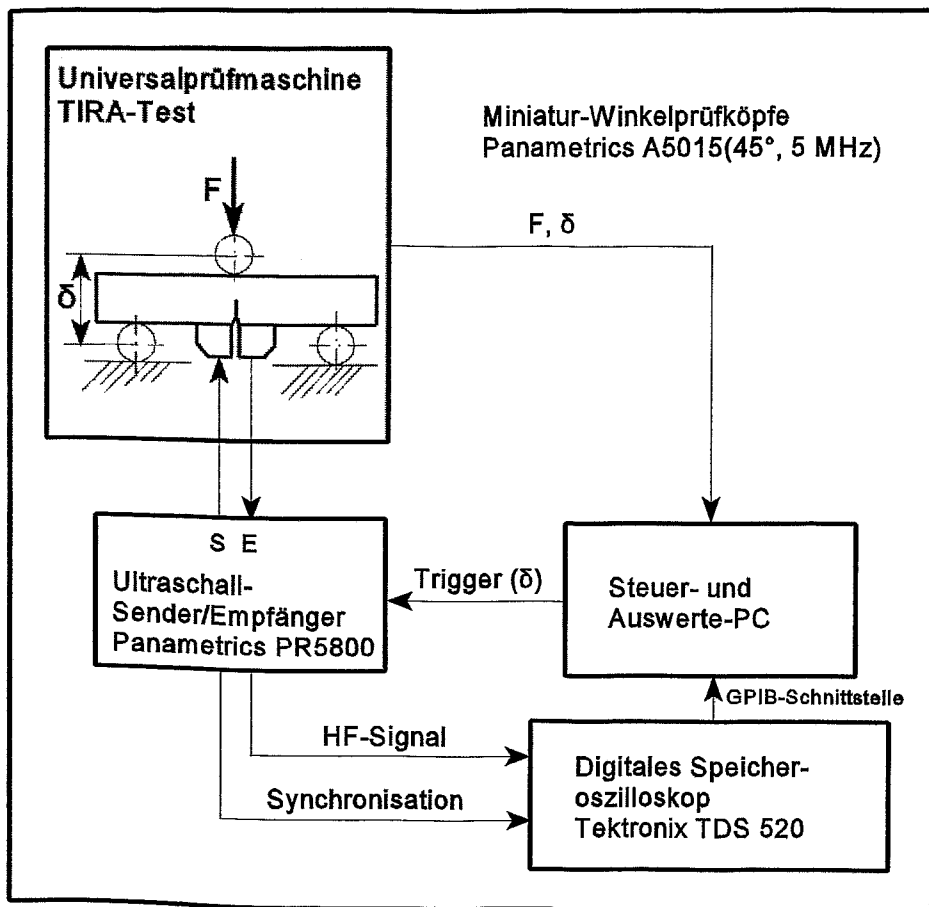


Abb. 6-7. Ultraschallmeßanordnung zur Rißfortschrittsmessung

6.2.3 Schallfeldcharakteristik in der ISO-V-Probe

Ein Ultraschallwandler erzeugt ein für ihn charakteristisches Schallfeld, dessen Ausbildung auch die Prüfergebnisse maßgeblich beeinflusst. Zur definierten Erzeugung von Ultraschallwellen werden in dieser Arbeit Longitudinalprüfköpfe verwandt, in denen die angeregte L-Welle bei schrägem Einfall auf die Grenzfläche Prüfkopf/Werkstoff (Plexiglas/Stahl) hauptsächlich zu einer unter 45° geneigten T-Welle gebeugt wird. Außer der gewünschten Ultraschallwelle entstehen um jede Aperturkante des Prüfkopfes je eine halbkreisförmige L- und eine halbkreisförmige T-Welle. An der angeregten Oberfläche breiten sich im "Schlepptau" der halbkreisförmigen T-Wellenfronten Rayleighwellenfronten aus [73].

Jede Schallquelle erzeugt ein Schallwechseldruckfeld, dessen Form und Ausbreitung durch die Gestalt des Schallwandlers bestimmt wird. Im Prinzip kann jedem Punkt des Raumes eine dort herrschende Druckamplitude zugeordnet werden. Von

prüftechnischem Interesse ist das wirksame Schallfeld. Es wird durch die Isobarenlinie gekennzeichnet, bis zu welcher ein Schalldruck von mindestens 6 dB vorherrscht (das entspricht einer Senkung des maximalen Schalldrucks um die Hälfte). Zwei charakteristische Bereiche des Schallfeldes, das Nahfeld und das Fernfeld werden unterschieden. In unmittelbarer Nähe des Schallschwingers entsteht das Nahfeld, ein Gebiet mit starken Schalldruckschwankungen. An der Stelle des Nahfeldendes ist das Schallbündel am stärksten eingeschnürt, im anschließenden Fernfeld öffnet sich das Schallfeld um einen konstanten Winkel.

Eine erfolgreiche Anwendung des Verfahrens setzt voraus, dass der Riß während der Rißausbreitungsphase immer vom wirksamen Schallfeld erreicht wird. Dazu wurden Simulationsrechnungen des wirksamen Schallfeldes durchgeführt [97]. Dabei wurde untersucht, ob der Riß im gesamten Stadium seiner Ausbreitung, beginnend als Ermüdungsanriß von ca. 5 mm Länge, vom Schallbündel erreicht wird. Zur Anwendung kam die Schallfeldsimulationssoftware K&S NDT-Software. In dieser Simulation wird angenommen, daß das Schallbündel einem Austrittspunkt an der Prüfkopfauflagefläche entspringt. Da das Schallfeld in der Realität von einem Schallschwinger endlicher Ausdehnung erzeugt wird und dadurch hinsichtlich der Breite des Schallfeldes sogar günstigere Voraussetzungen vorliegen, kann diese Näherung getroffen werden. Das Schallfeld der in dieser Meßanordnung verwandten Prüfköpfe wurde in einem hinsichtlich der Probenhöhe relevanten Bereich von 10 x 10 mm um den Austrittspunkt simuliert. In Abb. 6-8. ist das simulierte Schallfeld für einen Prüfkopf mit den technischen Daten: Rechteckschwinger 4.7 x 4.7 mm, T-Welle, Einschallwinkel 45° dargestellt. Die voraussichtliche Rißausbreitungsebene verläuft senkrecht zur Bildebene und ist in dieser Abbildung als gestrichelte Linie

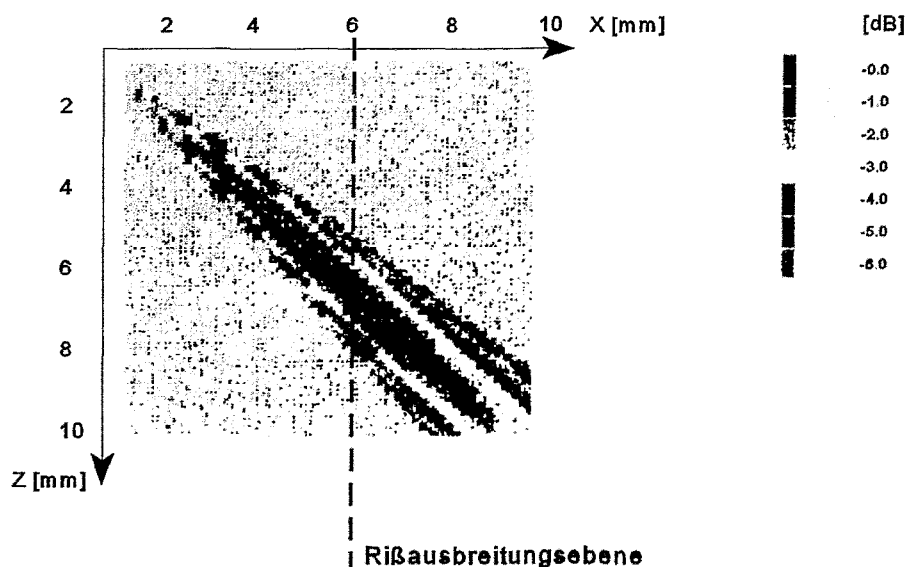


Abb. 6-8. Schallfeldberechnung auf der Symmetrieebene eines Miniaturwinkelprüfkopfs 45°, 5 MHz, 4.7 x 4.7 mm nach [97]

ingezeichnet. Das Schallfeld erreicht die Rißspitze in einem Bereich ab ca. 4.5 mm Ermüdungsanriß bis zu einer Rißausbreitung von ca. 8 mm (Z-Achse) mit einer Intensität von mindestens -6 dB und im Bereich von 5 -7 mm Rißlänge in der Rißebeine mit einer Intensität von -3dB.

Die Erzeugung einer rißspitzengebeugten T-Welle ist mit den gewählten Prüfköpfen möglich. Der Riß wächst in dieser Ultraschallmeßanordnung aus dem Nahfeldbereich in den Übergangsbereich (Nahfeldlänge von ca. 6 mm). Das Ultraschallsignal unterliegt durch die Lageänderungen der Rißspitze im Schallfeld Amplitudenschwankungen. Eine Amplitudenauswertung zur Rißfortschrittsmessung kann in dieser Prüfanordnung nicht in Betracht gezogen werden.

6.2.4 Teilentlastungsverfahren

Am Werkstoff 10CrMo9-10 wurden Biegeversuche nach dem Teilentlastungsverfahren durchgeführt. Zur Versuchsdurchführung wurde das servohydraulische Prüfsystem MTS 810/ TestStar genutzt. Die Bestimmung der Probennachgiebigkeit und des Rißfortschritts erfolgte auf der Grundlage der Rißöffnungsmessung (COD) mittels Ansetzwegaufnehmer (Clip gage) an speziell gefertigten Proben in ISO-V-Geometrie mit Schwalbenschwanzkerb.

Für die Complianceversuche wurden folgende Versuchsbedingung gewählt:

- Versuchsgeschwindigkeit: 0.35 mm/min,
- Abstand der Teilentlastungen 0.075 mm,
- Betrag der Teilentlastungen: 15%,
- Relaxationszeit vor Beginn der Teilentlastungen: 30 sek.,
- Stützweite 40 mm.

Die Versuche wurden maschinenintern nach ASTM E 813-89 ausgewertet (Gleichung 6.1). In Gleichung 6.1 wird der Einfluß der Probendeformation auf die Probennachgiebigkeit jedoch nicht berücksichtigt. Mit Gleichung 6.2 wurde der Bestimmungsgleichung eine experimentell ermittelte Korrekturvorschrift zur Einbeziehung der geometrischen Änderung der Dreipunktbiegeprobe während des Versuchsverlaufes nach [98] hinzugefügt. Die Gleichung wurde empirisch aus Datenmaterial des gleichen Werkstoffes gewonnen.

$$a_i = W * (0.999748 - 3,9504 * U_c + 2,9821 * U_c^2 - 3,21408 U_c^3 + 51,51564 U_c^4 - 113,031 + U_c^5) \quad \text{Gl. 6.1}$$

$$U_c = \frac{1}{1 + \sqrt{H_t * B_e * E * C * 4 \frac{W}{S}}}$$

Gl. 6.2

- U_c Faktor der Reihenentwicklung (Gleichung 6.1)
 H_i geometrischer Korrekturfaktor
 B_e effektive Probenbreite

Durch die Verwendung des Rißaufweitungsnehmers zur COD-Messung konnte während der Teilentlastungsversuche nicht die für das ULB-Verfahren erforderliche Probeninstrumentierung vorgenommen werden. Infolgedessen stehen keine Ergebnisse zur Verfügung, die durch Rißfortschrittsmessung mit dem Teilentlastungsverfahren und dem ULB-Verfahren an der gleichen Probe gewonnen worden sind.

6.2.5 Fraktografische Auswertung

Die Anfangs- und Endrißlänge wurden nach dem Biegeversuch auf der Bruchfläche ausgemessen. Zur besseren Markierung des Endstadiums wurden die geprüften Biegeproben aus Stahl bei ca. 300°C (3 - 5 min.) anlaufgeglüht, um eine farbauffällige Oxidschicht zu erzeugen. Danach wurden die Proben in flüssigem Stickstoff gekühlt und instabil gebrochen.

Die Kennzeichnung der stabilen Rißausbreitung in den GGG 40-Proben erfolgte nach der gleichen Methode. Bei diesem Material werden jedoch weniger ausgeprägte Anlauffarben erzielt. Das EN-GJS-400-24C mußte längere Zeit bei ca. 300°C geglüht werden (ca. 10 min [96, 99]). Anschließend wurden die Proben ebenfalls in flüssigem Stickstoff gebrochen.

Die Kennzeichnung des stabilen Bruchs auf der Bruchfläche der Proben aus AA2024 erwies sich als schwierig. Das beste Ergebnis wurde bei einer 20-minütigen Glühung bei ca. 300° C erreicht. Die dabei entstandene Anlaufschicht unterschied sich jedoch nur unwesentlich von der Grundfarbe des Materials, wodurch eine sichere werkzeugmikroskopische Ausmessung nicht gewährleistet ist. Zusätzlich wurde eine modifizierte Form des Farbeindringverfahrens angewandt. Die Proben wurden in eine farbige Flüssigkeit getaucht und mehrere Stunden darin belassen, so daß Flüssigkeit in den Anriß eindringen konnte. Im Ergebnis entstand auf der Bruchfläche des stabilen Rißfortschritts ein Bereich dunkler Färbung, der durch einzelne Farbpartikel, die sich auf der rauhen Bruchoberfläche festgesetzt hatten, zusätzlich gekennzeichnet war. Bei alleiniger Anwendung des Farbeindringverfahrens ist die zuverlässige Kennzeichnung des Bereichs stabiler Rißausbreitung nicht gewährleistet. Erst die Kombination beider Methoden erwies sich zur Kennzeichnung der Bruchfläche geeignet.

Die Ausgangsrißlänge a_0 und die Endrißlänge a_1 sind aus fünfzehn äquidistanten Messungen auf der Bruchfläche ermittelt worden. Den Prüfvorschriften folgend sind mindestens neun äquidistante Meßstellen zu bezeichnen, aus denen ein Meßwert für die Ausgangsrißlänge a_0 und die Endrißlänge gemittelt wird. Im vorliegenden Fall wurde bei der Ermittlung dieser Werte der von den Ultraschallwandlern kontrollierte

Bereich der Rißfront (B_{US}) berücksichtigt und die vorgeschriebene Mindestmeßpunktanzahl von neun Punkten auf eine Rißfläche von ca. 5 mm in der Probenmitte konzentriert. Der bewertete Bereich entspricht dem Einschallbereich der zur Anwendung kommenden Ultraschallwandler und wurde hier mit B_{US} bezeichnet. Die Ausgangsrißlänge a_{0US} und die Endrißlänge a_{1US} bezeichnen die auf diese Weise gewonnenen Meßwerte und dienen zur Gegenüberstellung der fraktografischen (a_0 , a_1) und der mittels Ultraschallverfahren ermittelten Rißlängen (a_{0US} , a_{1US}). In Abb. 6-9. ist der Zusammenhang grafisch dargestellt. Gleichung 6.3 beschreibt die Ermittlungsvorschrift für die fraktografische Auswertung der Rißlänge und des Rißfortschritts. Mit Gleichung 6.4 wird ein Wert für den fraktografischen Rißfortschritt ermittelt, der den Einschallbereich des Schallwandlerpaares berücksichtigt und direkt dem Ergebnis der Ultraschallmessungen gegenübergestellt werden kann.

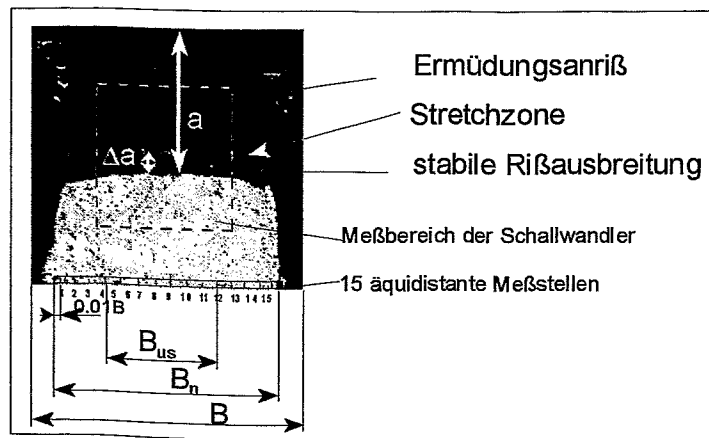


Abb. 6-9. Fraktografische Auswertung der Bruchfläche

$$\Delta a = \frac{1}{14} \left[\frac{1}{2} (\Delta a_1 + \Delta a_{15}) + \sum_{i=2}^{14} \Delta a_i \right] \quad (\text{Gl. 6.3})$$

$$\Delta a_{US} = \frac{1}{9} \sum_{i=4}^{12} \Delta a_i \quad (\text{Gl. 6.4})$$

Zur Vermessung der Rißspitzenabstumpfung (SZW) wurde die Bruchfläche im Bereich der Rißspitzenabstumpfung mittels Rasterelektronenmikroskop bei 200-facher Vergrößerung untersucht und die digitalisierten Bruchflächenaufnahmen

abgespeichert. Die SZW wurde mit der Auswertesoftware LUCIA ermittelt. Dazu wurde die Stretchzone auf der Bruchflächenaufnahme manuell markiert und an 320 äquidistanten Positionen automatisch vermessen, so daß für die Angabe der Stretchzonengröße ein gemittelter Wert aus ca. 1920 Einzelmessungen erhalten wurde.

Die SZW-Ausmessung an Gußeisenmaterial bereitete Schwierigkeiten. Die im EN-GJS-400-24C eingelagerten Grafitkugeln bewirken lokale Verformungsbehinderungen, so daß sich die Stretchzone terrassen- bzw. stufenförmig ausbildet. Sie ist zudem sehr ungleichmäßig über die Probendicke ausgebildet [10, 46]. Prinzipiell wurde ähnlich vorgegangen wie bei Stretchzonenermittlung an Stahl. Die Stretchzone wurde mittels REM-Aufnahmen ermittelt, man erreichte jedoch nur durch Kippung um 45° gegen den einfallenden Elektronenstrahl eine ausreichende Erkennbarkeit. Die SZW errechnete sich dabei nach [10]:

$$SZW = \frac{1}{\sqrt{2}} SZW_{45} \quad (\text{Gl. 6.5})$$

An dem untersuchten Aluminiumwerkstoff AA2024 ließ sich keine Stretchzone nachweisen. Das Versagensverhalten der vorliegenden Werkstoffprobe wird dem linear-elastischen Bereich zugeordnet.

7 Ermittlung des Rißwiderstandsverhaltens

7.1 Ergebnisse des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens

Das wichtigste Kriterium für die Anwendbarkeit eines Einprobenverfahrens ist die Genauigkeit, mit welcher der eingetretene Rißfortschritt erfaßt werden kann. Eine geeignete Form der Bewertung des vorgestellten ULB-Verfahrens ist der Vergleich zwischen der mit dem Ultraschallverfahren ermittelten und der optisch an der aufgebrochenen Probe vermessenen Endrißlänge. Für alle mit dem Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren durchgeführten bruchmechanischen Rißfortschrittsmessungen wurde der Vergleich mit den optisch ausgemessenen Rißlängen geführt. Laut Prüfnorm wird der mit dem Einprobenverfahren ermittelte Rißfortschritt mit dem fraktografisch an der nachträglich aufgebrochenen Probe ermittelten Rißfortschritt verglichen und darf nicht mehr als 15 % oder 0.15 mm (es gilt der größere Grenzwert) vom fraktografisch ermittelten Rißfortschritt abweichen [9, 17]. Im Bereich kleinster Rißfortschrittsbeträge sind dadurch erhebliche Abweichungen zugelassen. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, daß mit den in den Prüfnormen eingesetzten Rißfortschrittsmeßverfahren erhebliche Unsicherheiten bei der Erfassung kleinster Rißfortschrittsbeträge bestehen. In dieser Arbeit wurden, abweichend von den Prüfvorschriften, auch Rißfortschrittsbeträge unter 0.15 mm mit der strengeren Vorschrift, dem 15%-Kriterium, bewertet.

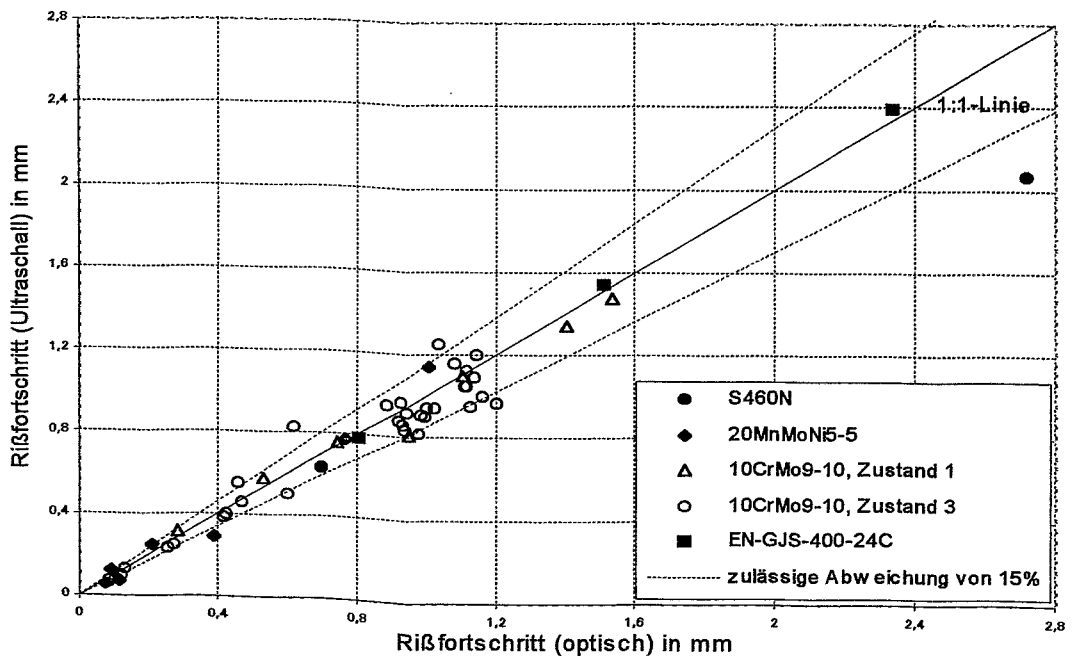


Abb. 7-1. Vergleich von optisch und mittels Ultraschall ermittelten Rißfortschrittsbeträgen

Die Meßergebnisse sind im Diagramm Abb. 7-1. zusammengefaßt. Durch gestrichelte Linien ist der Bereich der zulässigen Abweichung von 15 % bezeichnet.

Es zeigt sich, daß die Meßpunkte im Mittel der 1:1-Gerade folgen und innerhalb des Bereichs der zulässigen Abweichung streuen. Die mit dem Ultraschallverfahren ermittelten Rißfortschrittsbeträge stimmen demnach gut mit den fraktografisch ermittelten Ergebnissen überein. Sie erfüllen im allgemeinen die Anforderung der maximal zulässigen Abweichung von $\pm 15\%$. Nur in wenigen Fällen wird der Streubereich überschritten. Die Übereinstimmung zwischen dem Ergebnis des Ultraschallverfahrens und dem optisch vermessenen Rißfortschritt wird mit zunehmendem Rißfortschrittsbetrag besser, wie es in den entsprechenden Forderungen der Prüfstandards auch zum Ausdruck kommt (kleinste Rißfortschrittsbeträge unter einem Betrag von 0.15 mm werden toleranter behandelt). In diesem Bereich werden mit dem ULBV bereits zuverlässige Ergebnisse ermittelt, die dazu berechtigen, den Bereich in die 15%-Abweichungsgrenze einzubeziehen.

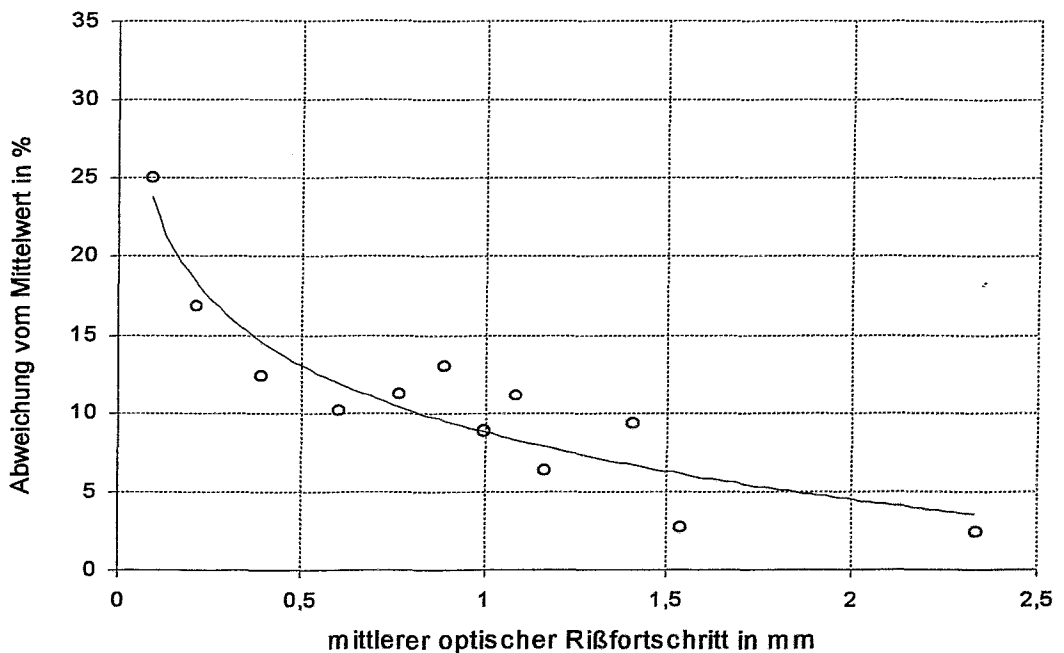


Abb. 7-2. Abweichung von Rißfortschrittsmeßergebnissen mittels ULB-Verfahren vom fraktografisch vermessenen Rißfortschritt

Im folgenden werden die maximalen Abweichungen der Ergebnisse des ULB-Verfahrens gegenüber dem fraktografisch ermittelten Rißfortschritt betrachtet. Die Streuungen der Ultraschallmeßwerte um die mittlere Gerade wurden gegen die

Ergebnisse der fraktografischen Vermessung des Rißfortschritts aufgetragen (Abb.7-2). Dazu wurden die Meßergebnisse in Intervallen von jeweils 100 μm Rißfortschritt zusammengefaßt und den diesen Bereichen entsprechenden Mittelwerten der fraktografischen Vermessung des erzielten Rißfortschritts gegenübergestellt. In Bereichen kleiner Rißfortschrittsbeträge lieferte nicht jeder Versuch hinreichend genaue Ergebnisse im Sinne der Prüfnorm. Bei Rißfortschrittsbeträgen, die nur unwesentlich größer sind als der Betrag der Rißspitzenabstumpfung ($\Delta a \leq 100 \mu\text{m}$), haben sich teilweise Abweichungen bis zu 25% ergeben. In dieser Größenordnung liegen auch die üblichen Unsicherheiten der Ergebnisse der Vermessung der Rißspitzenabstumpfung von bis zu 25% [22]. Ab einem Rißfortschritt von 350 μm wurden mit dem Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren Ergebnisse erzielt, die die Genauigkeitsanforderungen der Prüfnormen erfüllen, d.h. die weniger als 15% von der fraktografisch vermessenen Endrißlänge abweichen.

In Abb. 7-3. sind die Mittelwerte der Rißfortschrittsvermessung anhand beider Methoden (Fraktografie, Ultraschall) gegenübergestellt. Die Übereinstimmung kann als sehr gut bewertet werden. Eine systematische Verfälschung der Rißfortschrittsmeßergebnisse, so etwa eine systematische Über- oder Unterschätzung des tatsächlich eingetretenen Rißfortschritts durch Anwendung des

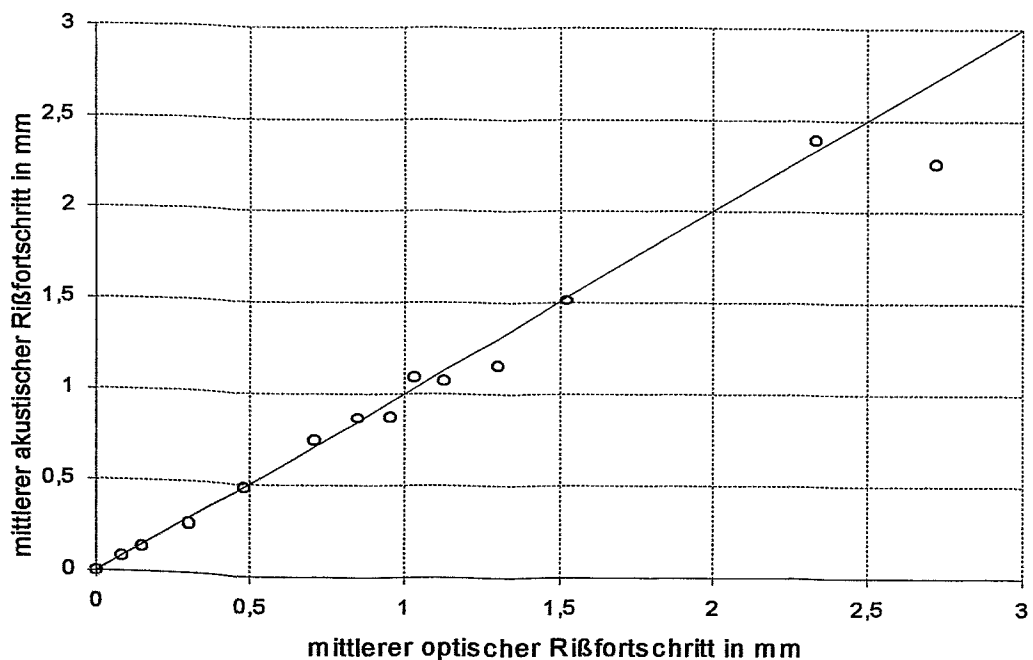


Abb. 7-3. Korrelation der Mittelwerte von fraktografisch und mittels Ultraschall vermessenen Rißfortschrittsbeträge

Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren ist nicht gegeben. Die Unterschätzung des Rißfortschritts bei ca. 2,6 mm durch das ULB-Verfahren ist nur durch einen einzelnen Meßwert belegt und kann keinen systematischen Trend repräsentieren.

7.2 Ermittlung von J-Rißwiderstandskurven

7.2.1 Vorbemerkungen

Die mit dem Ultraschallverfahren nach der in Kapitel 5 erläuterten Vorgehensweise ermittelten und ausgewerteten Rißfortschritt-Durchbiegungskurven und die während des Dreipunktbiegeversuches gemessenen Kraft-Durchbiegungskurven bilden die Grundlage zur Berechnung einer J-Rißwiderstandskurve. Beide Datensätze sind in Abb. 7-4. einmal beispielhaft für den Versuch 16_2 gegenübergestellt.

Typisch für alle Last-Durchbiegungskurven ist ihr zunächst linearer Anstieg (im Beispiel bis zu einer Probendurchbiegung von ca. 0.2 mm), bevor schließlich makroskopisch plastische Werkstoffverformung einsetzt. Das Anstiegsverhalten der Rißfortschritt-Durchbiegungskurve läßt sich zunächst am besten durch eine lineare Funktion beschreiben (im Beispiel bis ca. 0.6 mm), im weiteren Versuchsverlauf weicht es davon ab.

Die J-R-Kurven wurden in dieser Arbeit nach dem Europäischen Prüfvorschlag ESIS P2-92 [6] und der an diesem Prüfvorschlag anknüpfenden GKSS-Prüfempfehlung EFAM GTP 94 [14] ausgewertet.

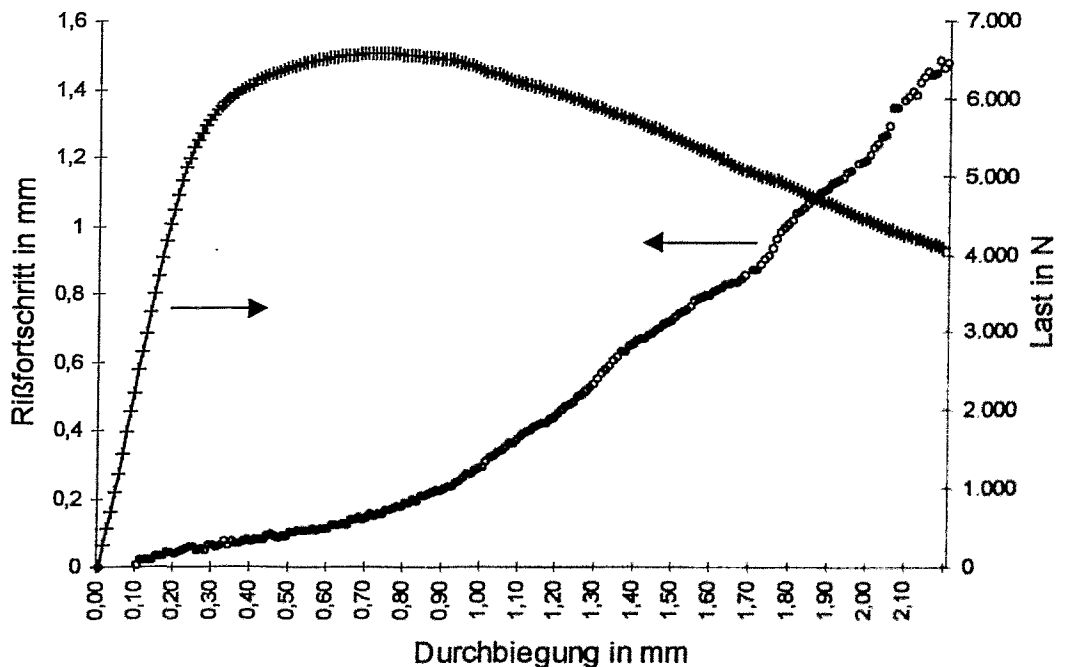


Abb. 7-4. Ausgangsdaten zur J-R-Kurvenermittlung (Versuch 16_2)

Für jeden Versuch wurden die J-R-Kurve und der physikalische, mikrostrukturell basierte Rißinitiierungskennwert J_i ermittelt. Eine tabellarische Zusammenfassung der Versuchsergebnisse findet sich im Anhang in Tab. A-1. Darüber hinaus sind die ermittelten J-R-Kurven und die aus den Ultraschallmeßwerten entwickelten Prozeßablaufbilder für die einzelnen Versuche im Anhang gegenübergestellt.

In dieser Arbeit wird ausschließlich mit bruchmechanischen Kleinproben in ISO-V-Geometrie gearbeitet, wie sie in Surveillanceprogrammen der Reaktorsicherheit zum Einsatz kommen. Die probengrößenabhängigen Gültigkeitskriterien für ein J-kontrolliertes Rißausbreitungsverhalten können von den in den Versuchen zur Anwendung kommenden Proben in ISO-V-Geometrie (hauptsächlich bainitischer Stahl) nicht in jedem Fall erfüllt werden. Wurden Proben geprüft, die die Gültigkeitskriterien nach ESIS P2-92 [6] und folgenden Prüfvorschlägen erfüllen, so werden Werte für $J_{0,2}$ angegeben.

Wenn ausreichend viele Versuche mit unterschiedlichen Endrißlängen für ein Material vorlagen, wurden aus den Einzelversuchen materialabhängig J-R-Kurven im Mehrprobenverfahren aufgestellt.

In den meisten Fällen übersteigt der in den Dreipunktbiegeversuchen erzielte Rißfortschritt den Grenzwert zur J-Integral-Ermittlung $\Delta a = 0,1 (W-a_0)$. Aufgrunddessen wurden alle vorgestellten J-R-Kurven entsprechend der in der EFAM GTP 94 empfohlenen Vorgehensweise korrigiert.

Die mittels Ultraschallverfahren ermittelten J-R-Kurven werden mit einer hohen Meßpunktdichte erfaßt. Darüber hinaus werden die Meßpunkte zur zuverlässigen Ermittlung physikalischer und technischer Rißinitiierungskennwerte im gesamten Bereich des Rißausbreitungsprozesses, also beginnend im Punkt 0 der J-R-Kurve, anhand einer geeigneten Anpassungsfunktion beschrieben. Dem Kurvenverlauf angepaßt werden die Parameter A, B und C. Die mathematische Beschreibung dieser J-R-Kurven erfolgt mit dem in der EFAM-Prüfempfehlung angegebenen Anpassungsfunktion (Gl. 7.1), wobei sich der Parameter B in vielen Fällen nahe 0 bestimmt und so wiederum der Anpassungsfunktion der ASTM-Prüfnorm nahekommmt.

$$J = A(B + \Delta a)^C \quad \text{Gl. 7.1}$$

Die verschiedenen Rißinitiierungskennwerte werden jeweils als Schnittpunkt einer die maximale Rißabstumpfung kennzeichnenden Größe mit dem so beschriebenen Kurvenverlauf bestimmt.

In mehreren, mit Hilfe des ULB-Verfahrens bestimmten J-R-Kurven zeigt der Kurvenanfangsbereich ein schwellwertähnliches Verhalten und weicht so von dem durch die Rißabstumpfungs-Gerade beschriebenen linearen Zusammenhang zwischen J-Integral und Rißvorwölbung ab. Vereinzelt wird in Veröffentlichungen über Rißfortschrittsmessungen mit Hilfe des Gleichstrompotentialverfahrens [22, 31] ebenfalls ein derartiges Schwellwertverhalten im Anfangsbereich der J-R-Kurven gefunden. Ein linearer Anfangsbereich der J-R-Kurve entsprechend des theoretischen Abstumpfungsverhaltens würde sich bei einer parabelförmigen Anpassung des Anfangsbereichs der gemessenen Rißfortschritts-Durchbiegungskurve ergeben. Der tatsächliche Verlauf der vorliegenden, mit dem ULB-Verfahren gemessenen Rißfortschritts-Durchbiegungsdaten läßt sich jedoch besser durch eine lineare Anpassung des Kurvenverlaufs beschreiben. Das entspricht dem nichtlinearen Anfangsteil der ermittelten R-Kurven. Um den in einem solchen Fall hieraus resultierenden "Nullpunktsfehler" zu vermeiden, wurde aus dem Bereich des größten linearen Anstiegs der J-R-Kurve eine empirische Rißabstumpfungsgerade abgeleitet und deren Ursprung mit der Rißfortschrittsachse als Nullpunkt der J-R-Kurve festgelegt.

7.2.2 Bruchmechanische Charakterisierung des Materials 10CrMo9-10

Der warmfeste Baustahl 10CrMo9-10 lag in zwei eigenschaftsmodifizierten Zuständen vor (vgl. Abs. 6.1.2).

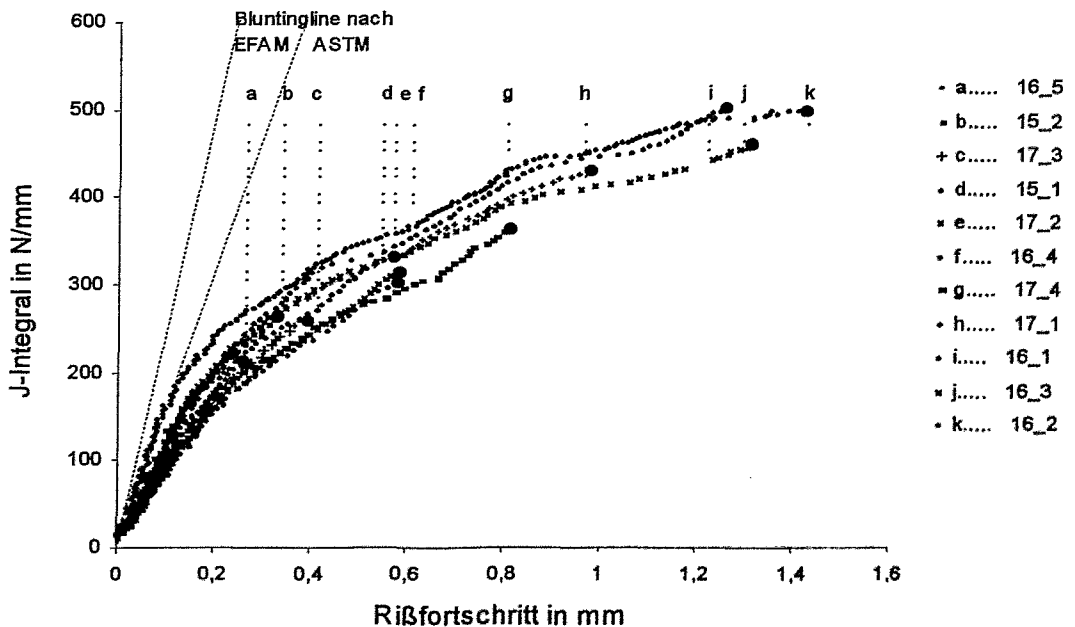


Abb. 7-5. J-R-Kurven für das Material 10CrMo9-10, Zustand 1, nach dem ULB-Verfahren

In Abb. 7-5. sind J-R-Kurven dargestellt, die am Material 10CrMo9-10, Zustand 1 (siehe Tab. 6-2.) aus der Rißfortschrittsmessung mit dem Ultraschallverfahren gewonnen wurden. Die Darstellung enthält elf J-R-Kurven. Jede Kurve ist Ergebnis eines Einprobenversuches. Jeder mit dem Ultraschallverfahren erfaßte Meßwert trägt mit einem Punkt im Diagramm zur entsprechenden J-R-Kurve bei. Die Versuche wurden in unterschiedlichen Stadien der Rißausbreitung gezielt abgebrochen. Die Endpunkte eines jeden Versuches wurden besonders hervorgehoben. Auf deren Grundlage wurde zusätzlich eine J-R-Kurve nach dem Mehrprobenverfahren entwickelt. Die J-R-Kurven der Dreipunktbiegeversuche nach dem ULB-Verfahren sind im Anhang noch einmal einzeln dargestellt.

In Abb. 7-6. sind alle J-R-Kurven aufgetragen, die mittels des ULB-Verfahrens an Proben des Wärmebehandlungszustands 3 des gleichen Ausgangsmaterials gewonnen wurden.

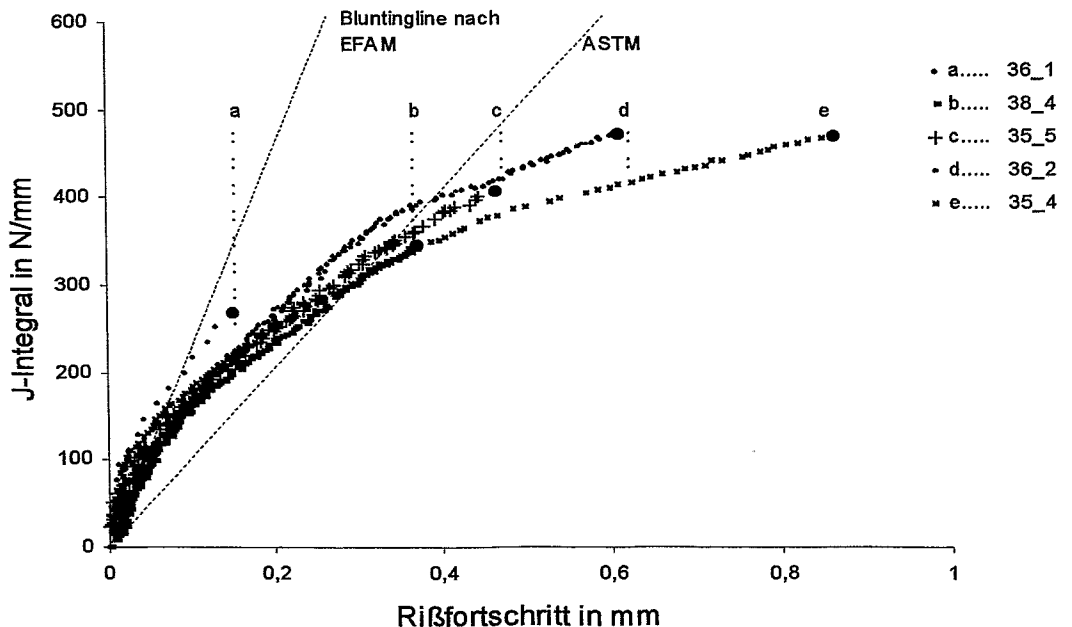


Abb. 7-6. J-R-Kurven für das Material 10CrMo9-10, Zustand 3, nach dem ULB-Verfahren

Abb. 7-7. zeigt die nach dem ULB-Verfahren ermittelten Streubereiche der J-R-Kurven, die für die beiden Wärmebehandlungszustände 1 und 3 des Materials 10CrMo9-10 aus den Einzelkurven (Abb. 7-5. und Abb. 7-6.) gewonnen worden sind. Das Streuband des duktileren Materials, Zustand 3, liegt deutlich oberhalb des Streubandes von Zustand 1. Die Breite des Streubands liegt in beiden Fällen im Bereich von ca. 50 -100 N/mm. Es zeigt sich, daß man bei Anwendung des ULB-Verfahrens in der Lage ist, die Materialzustände hinsichtlich ihres Rißwiderstandes eindeutig zu unterscheiden. Das Streuband setzt sich aus den Meßfehlern und der Streuung der individuellen Probeneigenschaften zusammen, die sich aus den lokalen Materialinhomogenitäten des geprüften Werkstoffes ergeben.

Zusätzlich zu der Ermittlung der individuellen J-R-Kurven wurde für die beiden untersuchten Wärmebehandlungszustände des 10CrMo9-10 je eine mittlere J-R-Kurve nach dem Mehrprobenverfahren bestimmt (Abb. 7-8. und Abb. 7-9.). In diesen Abbildungen sind jeweils zwei J-R-Kurven gegenübergestellt. Als Grundlage für die eine Kurve dienten die mittels ULB-Verfahren ermittelten Rißfortschrittsbeträge (die besonders hervorgehobenen Endpunkte der Kurven in Abb. 7-5. bzw. 7-6.), als Grundlage für die zweite Kurve dienten die optisch vermessenen Rißfortschrittswerte. Die eingezeichneten J-R-Kurven wurden nach der Anpassungsfunktion Gleichung 7.1 aus den experimentell ermittelten Wertepaaren $J-\Delta a_{US}$ und $J-\Delta a_{opt.}$ entwickelt.

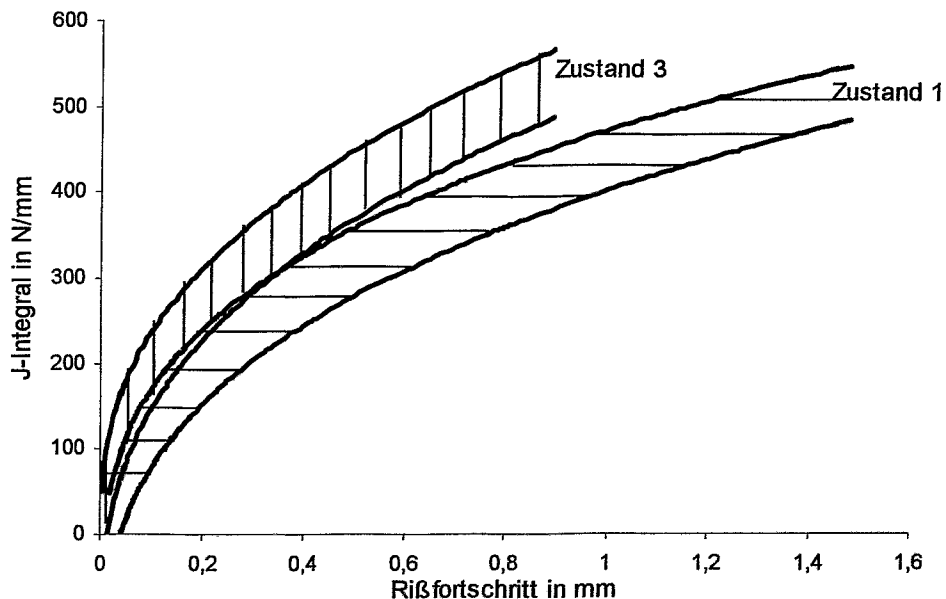


Abb. 7-7. Streubänder der mit dem ULB-Verfahren erhaltenen J-R-Kurven für das Material 10CrMo9-10, Wärmebehandlungszustände 1 und 3

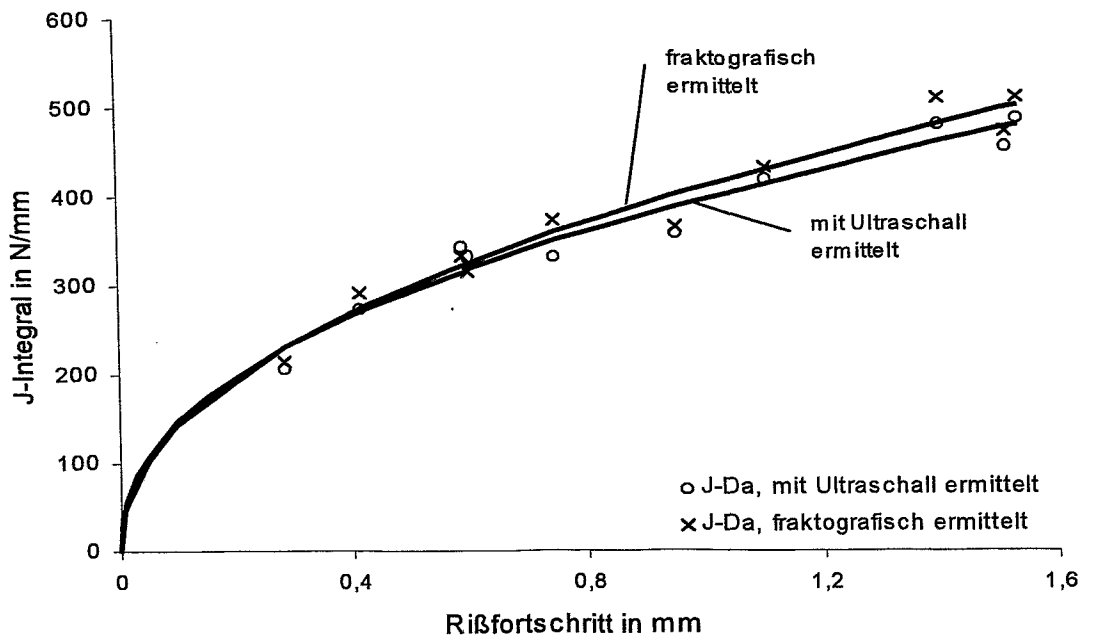


Abb. 7-8. J-R-Kurven für das Material 10CrMo9-10, Zustand 1, nach dem Mehrprobenverfahren

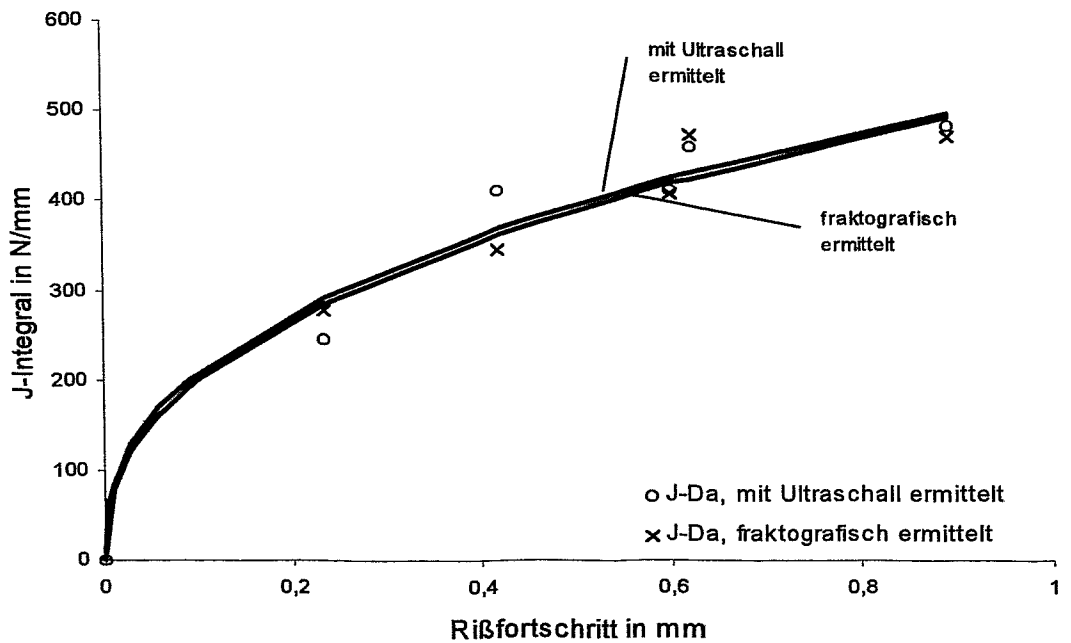


Abb. 7-9. J-R-Kurven für das Material 10CrMo9-10, Zustand 3, nach dem Mehrprobenverfahren

Die gefitteten J-R-Kurven, die nach dem Mehrprobenverfahren auf der Grundlage der fraktografischen und der mittels Ultraschall bestimmten Rißfortschrittsbeträge, stimmen auch für den dichter mit Meßpunkten belegten Zustand 1 gut überein. Das unterstreicht noch einmal die im vorangegangenen Abschnitt nachgewiesene gute Übereinstimmung zwischen optischen und mittels Ultraschall ermittelten Endrißlängen (Abb. 7-1., Abb. 7-3.).

Zur ergänzenden Bewertung der mittels ULB-Verfahren erhaltenen Ergebnisse wurden an Proben des gleichen Materials Vergleichsmessungen mit einem weiteren Einprobenverfahren, dem Teilentlastungsverfahren, durchgeführt. Die J-R-Kurven aus diesen Meßergebnissen sind in Abb. 7-10. und Abb. 7-11. zusammengestellt. Inhalt der Darstellung sind Ergebnisse aus je drei Teilentlastungsversuchen am Material 10CrMo9-10 Zustand 1 (Abb. 7-10.) bzw. Zustand 3 (Abb. 7-11.) und die Streubänder aller nach dem ULB-Verfahren erhaltenen J-R-Kurven für den jeweiligen Materialzustand.

Im Anfangsbereich der J-R-Kurven, in der Bluntingphase, wird mit dem Teilentlastungsverfahren keine konstante Zunahme der Probennachgiebigkeit aufgezeichnet. Die Meßergebnisse streuen stark. Beim duktileren Material, Zustand 3 (Abb. 7-11.), tritt im Anfangsbereich der J-R-Kurven scheinbar negatives Rißwachstum auf. Die mittels Teilentlastungsverfahren gewonnenen J-R-Kurven sind offenbar nicht geeignet, den Vorgang der Rißspitzenabstumpfung zu charakterisieren. Im weiteren Versuchsverlauf wird das Rißausbreitungsverhalten zuverlässig wiedergegeben. Die Streubandbreite der Ergebnisse nach dem Teilentlastungsverfahren ist mit der Streubandbreite nach dem ULB-Verfahren vergleichbar, wobei die geringe Anzahl von Versuchen nach dem Complianceverfahren zu berücksichtigen ist.

Das Streuband der mittels Teilentlastungsverfahren erstellten J-R-Kurven für den 10CrMo9-10, Zustand 3, stimmt mit dem der Ultraschallergebnisse nicht immer überein. Es zeigt jedoch zu größeren Rißfortschrittsbeträgen hin einen steileren Anstieg. Da bereits Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen des ULB-Verfahrens und Ergebnissen nach dem Mehrprobenverfahren nachgewiesen wurde, werden die Abweichungen auf eine systematische Unterschätzung der Rißlängen beim verwendeten Teilentlastungsverfahren zurückgeführt.

Insgesamt liefern die mit dem ULB-Verfahren an den zwei Wärmebehandlungszuständen des 10CrMo9-10 durchgeführten Versuche Ergebnisse, die für diese Materialien bekannt sind und mit anderen Ergebnissen, die mittels Teilentlastungsverfahren und Mehrprobenverfahren ermittelt wurden, vergleichbar sind [98, 100].

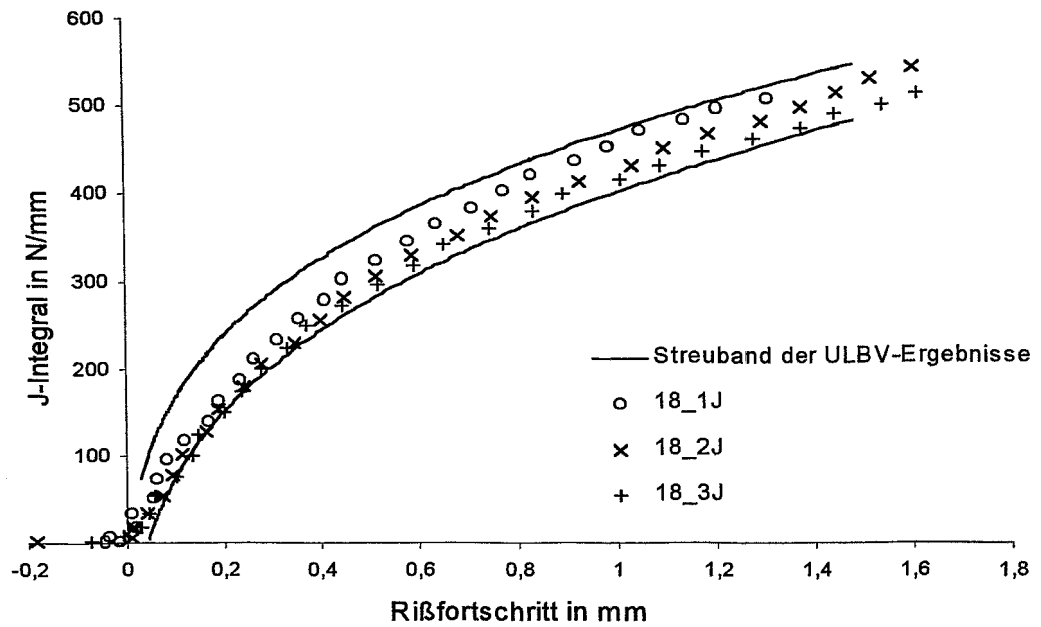


Abb. 7-10. J-R-Kurven des Materials 10CrMo9-10, Zustand 1, nach dem Teilentlastungsverfahren

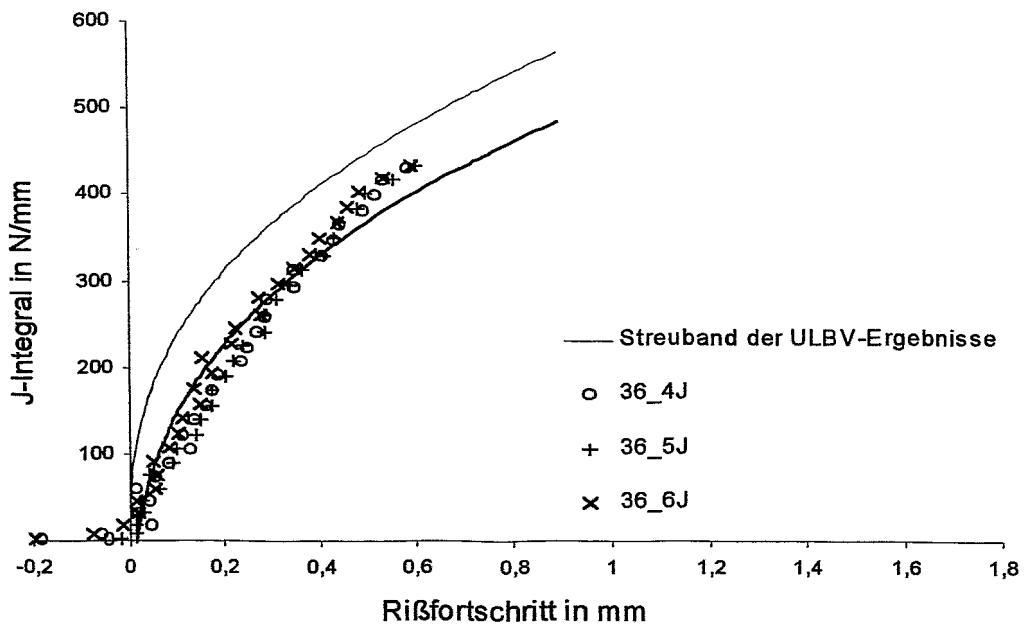


Abb. 7-11. J-R-Kurven des Materials 10CrMo9-10, Zustand 3, nach dem Teilentlastungsverfahren

7.2.3 Erprobung des Verfahrens für das Material S460N

Abb. 7-12. gibt Ergebnisse aus Versuchen am Feinkornbaustahl S460N wieder, die wiederum in unterschiedlichen Stadien der Rißausbreitung abgebrochen wurden. Die in den Versuchen a und b ermittelten Rißfortschrittsbeträge fügen sich gut in die bereits vorgestellten Toleranzgrenzen ein, der Vergleich der mittels Ultraschall und fraktografisch ermittelten Rißfortschritte folgte nahezu der 1:1-Linie (Abb. 7-1.).

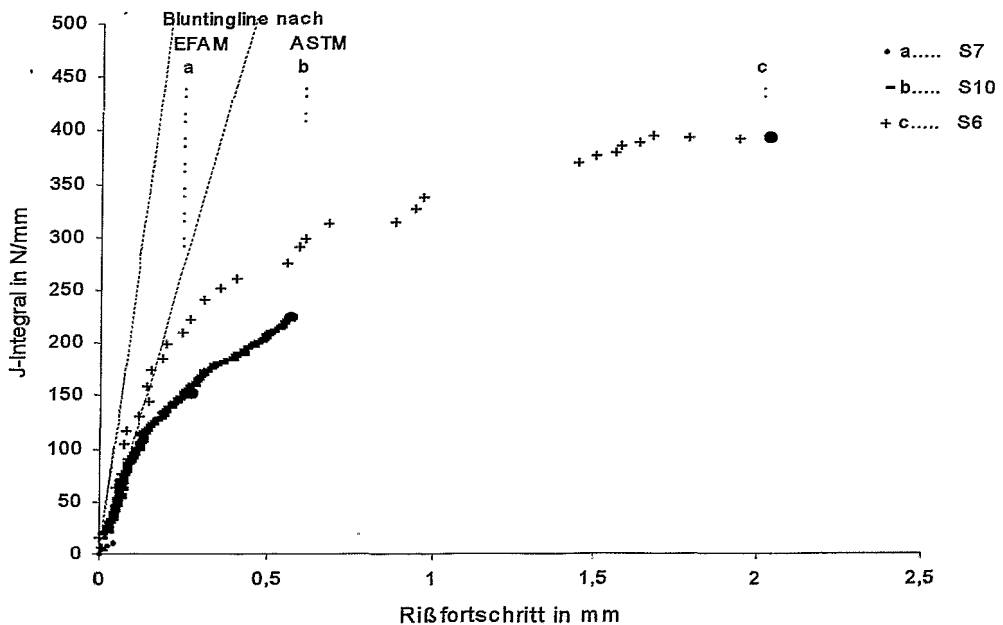


Abb. 7-12. J-R-Kurven für das Material S460N

Im Dreipunktbiegeversuch c wurde die Probe so weit belastet, daß sich ein Rißfortschritt von 2.07 mm ausbilden konnte. Der insgesamt relativ gleichmäßige Kurvenverlauf der J-R-Kurve des Versuches c (Versuch S 6) weist Unterbrechungen auf, in denen keine $J-\Delta a$ -Wertepaare aufgetragen sind. Ursache für diese Unterbrechungen sind die in diesem Beispiel im Verlauf des Versuches auftretenden Signalüberlagerungen des Ultraschallnutzsignals mit anderen Signalen. So ist die Meßwertgewinnung in einzelnen Bereichen unterbrochen. In Abb. 7-13. wird der Versuch c in Form einer Grauwertdarstellung vorgestellt, in der die Signaldiskontinuitäten im Bereich zwischen 8 und 8,5 μ s deutlich sichtbar werden. Der Versuch kann dennoch mit Einschränkungen ausgewertet werden, da der Impulsverlauf anhand der Grauwertdarstellung verfolgt werden kann und die Echoidentifizierung nach der Signalüberlagerung wieder aufgenommen werden kann (vgl. Abschnitt 5.3.4). So kann eine vollständige J-R-Kurve dargestellt werden, die in den Bereichen der Signalüberlagerung keine $J-\Delta a$ -Wertepaare enthält. Zeigt

der Vergleich der Endrißlängen nach dem ULB-Verfahren und der fraktografischen Vermessung dennoch große Abweichungen, ist möglicherweise ein Fehler bei der Zuordnung der Ultraschallhalbwellen aufgetreten, der infolge eines Phasensprungs des Nutzsignals denkbar ist (vgl. Abschnitt 3.1).

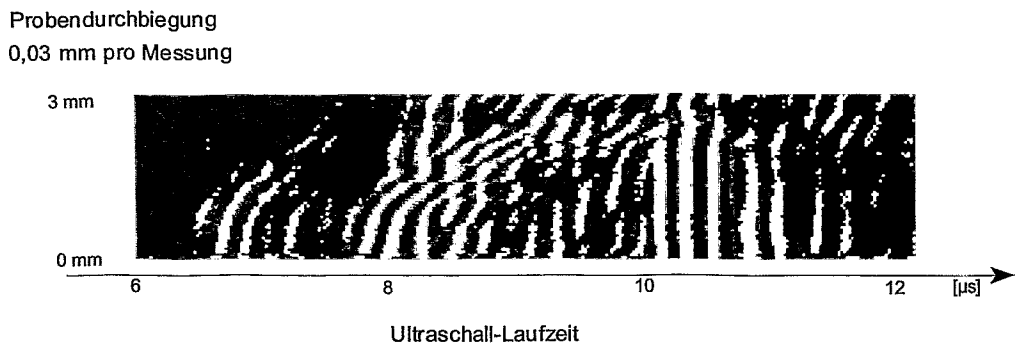


Abb. 7-13. Grauwertdarstellung des Versuchsablaufs S460N

7.2.4 Erprobung des Verfahrens für das Material 20MnMoNi5-5

In Abb. 7-14. sind die Rißwiderstandskurven aller mittels Ultraschallverfahren durchgeführten Versuche am warmfesten Baustahl 20MnMoNi5-5 gezeigt. Das Material erwies sich als stark inhomogen. Bei der fraktografischen Auswertung der geprüften Proben wurden deutliche Materialaufreißen sichtbar. Trotz der hohen Versuchsanzahl gelang es nicht, gleichverteilt unterschiedliche Beträge von Rißfortschritt zu erzielen, so daß eine Auswertung im Sinne des Mehrprobenverfahrens zwar prinzipiell möglich wäre, aber nicht den Verteilungskriterien der Wertepaare der J-R-Kurve in der Prüfnorm entspricht. Die Versuchsergebnisse erfüllen bis auf Versuch g das Abweichungskriterium von 15%. Die Streuung der Meßergebnisse entspricht im wesentlichen der bereits für das Material 10 CrMo 9 10 festgestellten Streuung. Der Vergleich der mittels Ultraschall und fraktografisch ermittelten Endrißlängen wurde in Abb. 7-1. geführt.

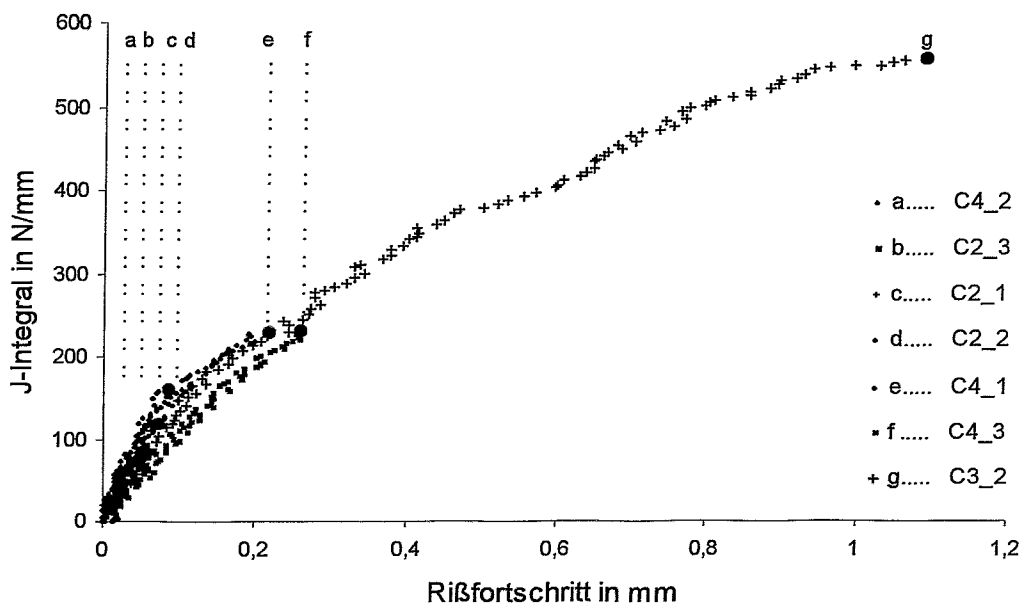


Abb. 7-14. J-R-Kurven für das Material 20MnMoNi5-5

7.2.5 Erprobung des Verfahrens für das Material EN-GJS-400-24C

Im vorliegenden Fall wurde globularer Grauguß mit einer Grafitteilchengröße von 28 μm geprüft. In Abb. 7-15. werden vier Dreipunktbiegeversuche an EN-GJS-400-24C ausgewertet, die ebenfalls in jeweils unterschiedlichen Stadien der Rißausbreitung unterbrochen wurden. Die Ultraschallprüfung von Gußgefüge ist aufgrund der auftretenden Schallschwächung im allgemeinen problematischer als die Prüfung verformter Gefüge. Der duktile Gußeisenwerkstoff zeichnet sich im Vergleich zu den untersuchten Stählen durch ein großes Rißwachstum aus.

Erwartungsgemäß ist die Versuchsauswertung anhand des Ultraschall-Amplituden-Zeitsignals aufgrund von Signalüberlagerungen unterbrochen. Da die J-R-Kurven der ausgewerteten Versuche einen auffallend deckungsgleichen Verlauf nehmen, kommt es jeweils im gleichen Versuchstadium (siehe Diagramm: Δa : ca. 1,2 bis 1,5 mm) zu Diskontinuitäten in der Versuchsauswertung. Daß die Weiterverfolgung des aktuellen Rißfortschritts dennoch möglich ist, soll anhand Abb. 7-16. noch einmal anschaulich demonstriert werden. In dieser Abbildung sind die Grauwertdarstellungen der Ergebnisse der vier Versuche in der Reihenfolge des größeren Rißfortschritts (von unten nach oben) aufgetragen. Das Ultraschallnutzsignal ist im Durchbiegungsbereich von ca. 0,5 mm bis 0,7 mm von einem im Bild senkrecht verlaufenden Ultraschallsignal überlagert. Das dazugehörige Amplituden-Zeitsignal ist zu diesem Zeitpunkt nicht auswertbar. Anhand der Grauwertdarstellung kann der Impulsverlauf der einzelnen Echos jedoch gut nachvollzogen werden, so daß eine Identifizierung der Impulse nach ihrer Trennung

bei einer Durchbiegung von ca. 0.7 mm weiterhin möglich ist und die Laufzeitmessung des Nutzsignals fortgesetzt werden kann.

Die Übereinstimmung des mittels ULB-Verfahren ermittelten Rißfortschritts und dem fraktografisch vermessenen Rißfortschritt ist sehr gut (Abb. 7-1.).

In den J-R-Kurven dieses Gußwerkstoffes fielen keine besonderen Materialinhomogenitäten auf. Die Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen (Verlauf der statischen J-R-Kurve, Stretchzonenergebnisse aus REM-Messungen) ordnen sich in das umfangreiche Untersuchungsmaterial der Bergakademie Freiberg ein (10, 46, 96).

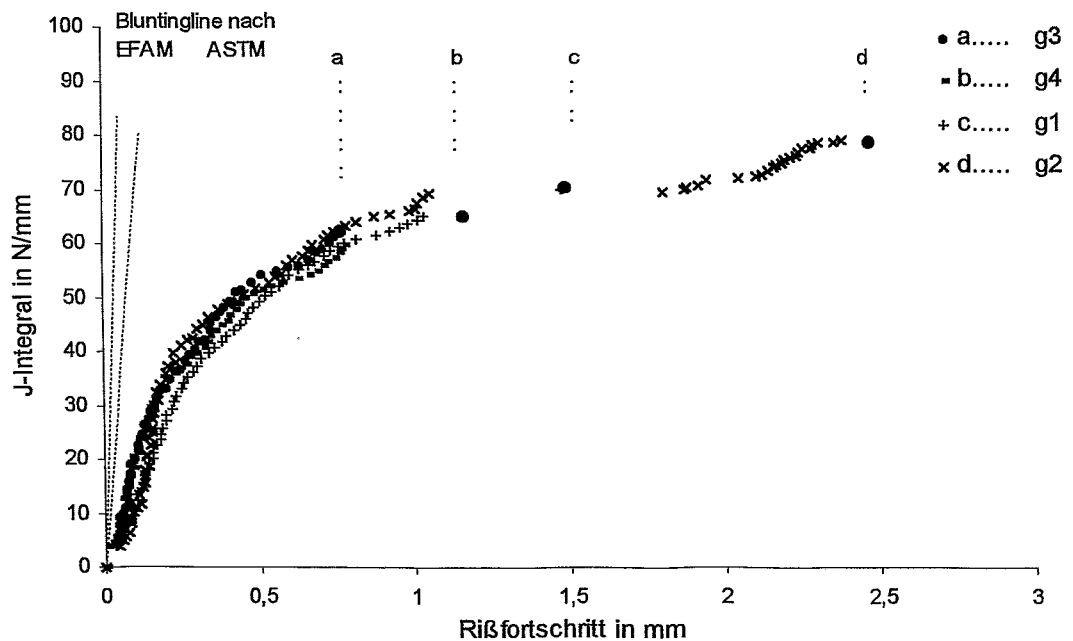


Abb. 7-15. J-R-Kurven für das Material EN-GJS-400-24C

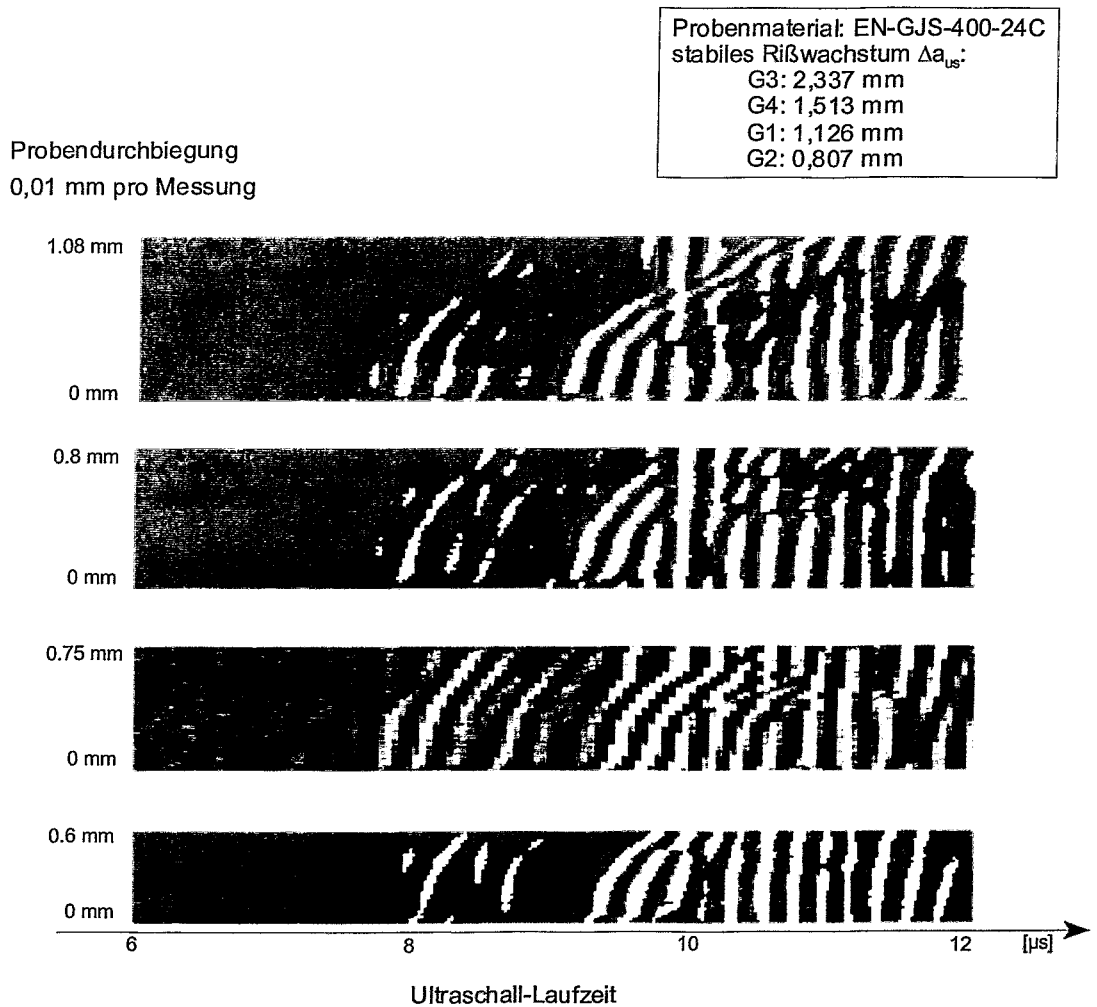


Abb. 7-16. Grauwertdarstellung des Versuchsablaufs für den Gußeisenwerkstoff EN-GJS-400-24C

7.2.6. Erprobung für das Material AA 2024

Mit der Prüfung einer Aluminiumlegierung im Rahmen dieser Arbeit soll die prinzipielle Anwendbarkeit des ULB-Verfahrens bei dieser Werkstoffgruppe untersucht werden. Die Aluminiumknetlegierung AA 2024 zeigt akustisch und mechanisch ein von dem bisher geprüften Material abweichendes Werkstoffverhalten.

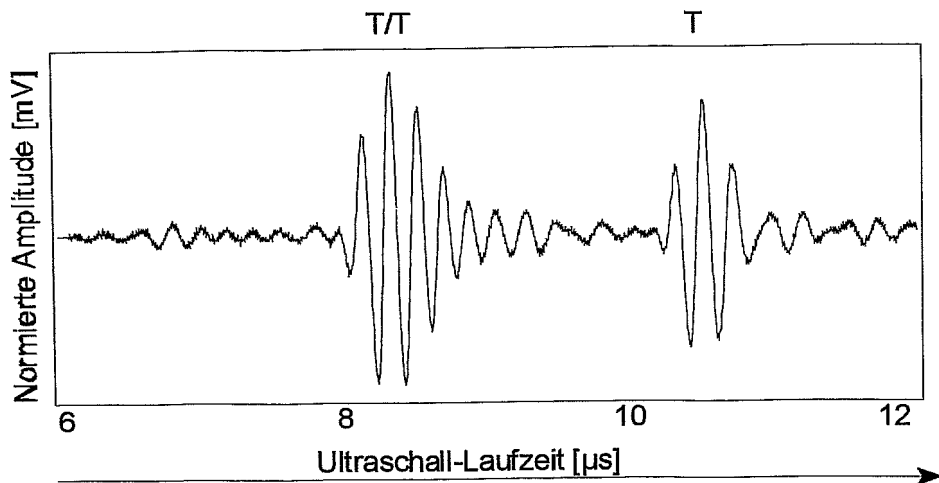


Abb. 7-17. Amplituden-Zeit-Signal für das Material AA2024

Aluminium hat im Vergleich zu Stahl eine größere Schallgeschwindigkeit und einen deutlich niedrigeren E-Modul. Darüber hinaus zeigt diese Al-Legierung im allgemeinen ein spröderes Verhalten, und das durch die J-R-Kurve charakterisierte Rißfortschrittsverhalten unterscheidet sich deutlich von dem der Stähle.

In Abb. 7-17. ist ein Amplituden-Zeit-Signal herausgegriffen worden, das während eines Dreipunktbiegeversuchs an einer Probe AA 2024 aufgezeichnet wurde. Das Meßsignal wurde im Zeitbereich von 6 - 12 μs abgebildet. Es zeigt eine Echofolge, die auf der Grundlage der Diskussion in Abschnitt 5.2.3 interpretiert werden kann. Die größte Amplitude hat das Nutzsinal, die rißspitzengebeugte T-Welle (T/T). Das Echo mit der nächstgrößten Amplitude ist das der rückwandreflektierten T-Welle (T). Auch die in den folgenden Stadien des Dreipunktbiegeversuchs aufgezeichneten Echofolgen bleiben interpretierbar und auswertbar. Das ULB-Verfahren liefert somit Ultraschallmeßergebnisse, auf deren Grundlage J-R-Kurven erstellt werden können (Abb. 7-18.). In Abb. 7-19. ist eine solche J-R-Kurve dargestellt. Die J-R-Kurve zeigt erwartungsgemäß einen klar definierten Einsatzpunkt für beginnende Rißausbreitung (Bruchzähigkeit) und nachfolgend eine Rißausbreitung unter nahezu konstantem J.

Auch durch diese Untersuchungen an einem spröden Werkstoff konnte das Ziel, die Anwendbarkeit des ULB-Verfahrens auf unterschiedliche Werkstoffgruppen, somit nachgewiesen werden.

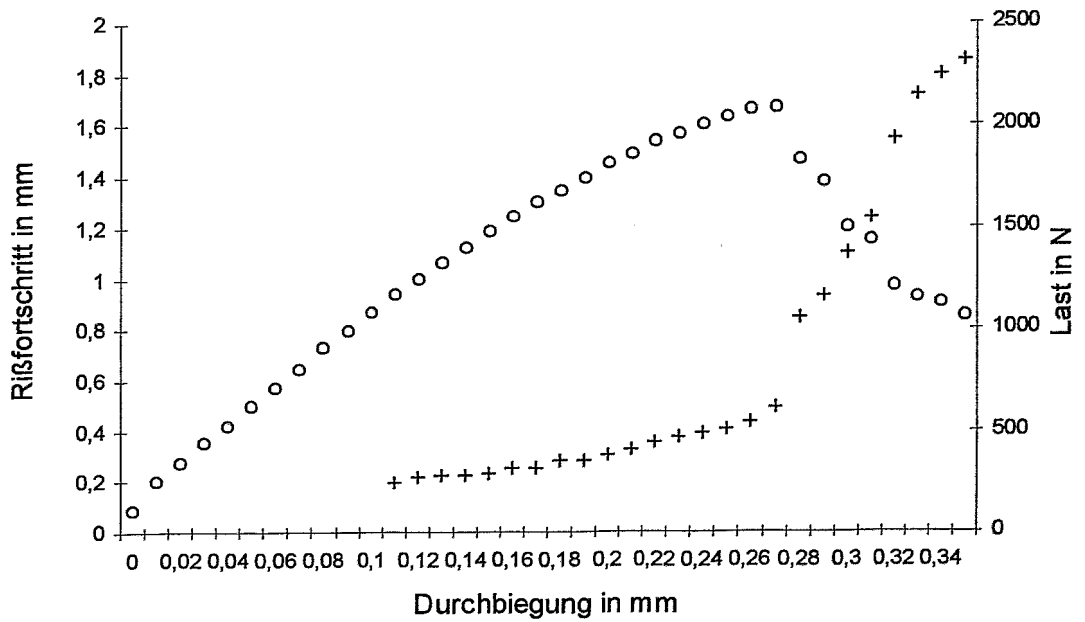


Abb. 7-18. Ausgangsdaten zur J-R-Kurvenermittlung

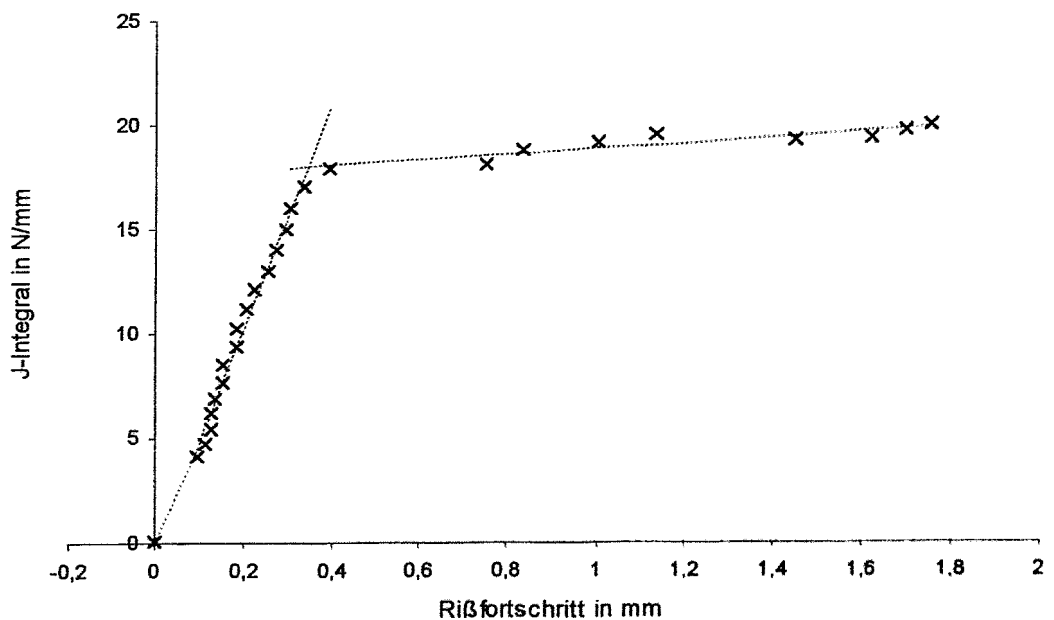


Abb. 7-19. J-R-Kurve für die Aluminiumlegierung AA2024

7.3 Bestimmung eines Rißinitiierungskennwertes aus Meßdaten des ULB-Verfahrens

Zur Bestimmung eines Rißinitiierungskennwertes existieren in der Fließbruchmechanik eine Reihe von Verfahrensweisen, in deren Ergebnis mehr oder weniger konservative physikalische und technische Rißinitiierungskennwerte vorgeschlagen werden. Eine Übersicht wird in [5] aufgeführt.

Im folgenden soll untersucht werden, ob die auf der Grundlage des ULB-Verfahrens zugänglichen Informationen ausreichen, den Rißinitiierungsprozeß ohne eine zusätzliche Probeninstrumentierung zu erfassen und einen Rißinitiierungskennwert aus der qualifizierten Analyse des Kurvenverlaufes zu bestimmen. Die eingangs dargestellten Vorzüge eines Ultraschalleinprobenverfahrens berechtigen zu diesem Versuch.

Der Verlauf eines typischen Rißlängen-Durchbiegungsdiagrammes läßt sich in drei charakteristische Bereiche eingrenzen (siehe Abb. 5-18.). Diese Bereiche sind in vergleichbarer Form bei allen untersuchten Werkstoffen wiederzufinden. Bei Belastungsbeginn kommt es zur Rißöffnung und damit zum Verlust einzelner Kontaktstellen der Rißufer. Das Ultraschallsignal reagiert mit einem steilen Anstieg der Laufzeit und lokalisiert nunmehr die eigentliche Rißspitze des Ermüdungsanrisses. Im mittleren Bereich treten die der makroskopischen Rißinitiierung vorausgehenden Schädigungsprozesse in der Probe auf. Durch die Laufzeitmessung des Ultraschallsignals wird dabei eine durchschnittliche Abstumpfung der Rißspitze erfaßt. Schließlich wird durch eine beschleunigte Zunahme der Signallaufzeit die der Initiierung des stabilen Rißwachstums folgende Rißausbreitung erfaßt.

Unter der Hypothese, daß sich die zunehmende Rißspitzenabstumpfung durch einen anderen Anstieg als der Prozeß der Rißverlängerung im Kurvenverlauf der Rißfortschritts-Durchbiegungsdiagramme abbildet, wurden die vorliegenden Diagramme auf einen Umschlagpunkt im Anstiegsverhalten im Anfangsbereich der Rißausbreitung hin untersucht. Die durch das Verformungsvermögen des Werkstoffes vor der Rißspitze bestimmte Rißspitzenabstumpfung läßt sich am zutreffendsten mit einer linearen Funktion beschreiben. Der weitere Verlauf der Kurve, der Bereich der Rißlängenzunahme, ist von der Dehnungsbehinderung vor der Rißspitze abhängig und bestimmt sich durch Parameter wie Probengeometrie, Einfluß der Gefügestruktur und Plastifizierungsgrad. Das Zusammenwirken dieser Parameter ist so komplex, daß sich der folgende Kurvenverlauf nicht durch einen einheitlichen linearen oder nichtlinearen funktionellen Zusammenhang beschreiben läßt.

Die Bestimmung des Umschlagpunktes erfolgte unter Zuhilfenahme mathematischer Methoden der Kurvenanalyse. Zunächst wurde versucht, durch vereinfachte Näherungen des Kurvenverlaufes im Rißabstumpfungs- und Rißausbreitungsbereich zu einer objektiven Bewertung des Kurvenverlaufes zu kommen und durch die

Anwendung von Mehrphasenregressionsmodellen einen Umschlagpunkt zu bestimmen. Die Methode setzt voraus, daß für beide Kurvenbereiche eine zutreffende Modellfunktion gefunden werden kann. Diese Mehrphasenregression zeigte jedoch, daß ein näherungsweise bestimmter Umschlagpunkt durch den Schnittpunkt der genäherten Funktionen sehr ungenau ist und von der Güte der Anpassungsfunktion an den experimentellen Kurvenverlauf stärker beeinflusst wird als von einer Anstiegsänderung im tatsächlichen Kurvenverlauf. Die Herangehensweise wurde im vorliegenden Fall als ungeeignet verworfen.

Deshalb wurde im weiteren die Kurvenstabilität für den mittleren Kurvenbereich überprüft. Zur Auswertung wurden die Reißfortschrittsmeßdaten einer gleitenden Mittelwertbildung aus drei Punkten unterzogen und die aus diesen Daten bestimmte punktuelle Ableitung gegenüber dem Kurvenverlauf aufgetragen. Der Punkt des ersten deutlich erkennbaren Abweichens des Kurvenverlaufs von seinem ursprünglichen Anstiegsverhalten wurde als Umschlagpunkt definiert. Dieser Umschlagpunkt entspricht der gesuchten Anstiegsänderung im Verlauf des Reißfortschritts-Durchbiegungsdiagramms und wird als der Punkt angesehen, in dem Reißausbreitung beginnt.

Zur Bewertung dieses Reißinitiierungskennwertes bietet sich der Vergleich mit dem fraktografisch ermittelten Reißinitiierungskennwert J_i an. Zur Ermittlung von J_i wurde die Reißabstumpfung für alle untersuchten Proben im Rasterelektronenmikroskop (REM) ausgemessen und entsprechend der Prüfempfehlung ausgewertet und als Stretchzonenbreite (SZW) ausgewiesen. Für den Werkstoff EN-GJS-400-24C ließ sich die Stretchzone nicht in jedem Fall hinreichend sicher ausmessen.

In Abb. 7-20. wird der Vergleich zwischen diesem Umschlagpunkt und der optisch vermessenen Reißspitzenabstumpfung im REM für alle untersuchten Materialien geführt. Die Ergebnisse der Stretchzonenvermessung am REM sowie die Ergebnisse der ultraschallseitigen Ermittlung sind in Tab. A-2. im Anhang einzusehen. Diese Ergebnisse liegen in der gleichen Größenordnung, können aber im Einzelfall über 100% vom Vergleichswert, der mittels Rasterelektronenmikroskopie bestimmten maximalen Reißspitzenabstumpfung, abweichen. Sowohl die mittels REM als auch die mittels ULB-Verfahren bestimmten Reißspitzenabstumpfungen (Stretchzonen) haben geringe Dimensionen und schwanken beide im Bereich zwischen 25 - 160 μm .

Die Diskussion der Abb. 7-20. konzentriert sich zunächst auf die Untersuchung der Streubereiche der mittels REM ermittelten und aus der Auswertung der Meßergebnisse des ULB-Verfahrens erhaltenen Werte für Reißspitzenabstumpfung und vergleicht anschließend die Mittelwerte der mit den beiden Verfahren ermittelten Reißspitzenabstumpfung, getrennt für jedes Material.

- Für die Werkstoffe S460N und den 10CrMo9-10, Zustand 1, sind sowohl die Streubereiche als auch die Mittelwerte der mittels ULB-Verfahren bestimmten Werte für Reißspitzenabstumpfung größer als die mittels Rasterelektronenmikroskop bestimmten Werte.

- Für den Werkstoff 10CrMo9-10, Zustand 3, sind die verfahrensbedingten Streuungen ähnlich, aber der Mittelwert der mittels ULB-Verfahren bestimmten Werte für Rißspitzenabstumpfung ist kleiner als der aus den REM-Messungen bestimmte Mittelwert.
- Für den Werkstoff 20MnMoNi5-5 sind die Mittelwerte und die Streuungen ähnlich.
- Beim Gußeisenwerkstoff EN-GJS-400-24C ist der Mittelwert der Ultraschallmessungen größer als der der REM-Messungen. Es kamen lediglich zwei Versuche zur Auswertung.

Insgesamt ist festzustellen, daß die anhand des ULB-Verfahrens ermittelten Rißabstumpfungswerte für zwei Werkstoffe größer ist als der aus den fraktografischen Auswertungen ermittelte Wert, für einen Werkstoff kleiner und für einen Werkstoff ähnlich. Das heißt, das für spröderes Material mit dem ULB-Verfahren durchschnittlich größere Werte für Rißspitzenabstumpfung ermittelt werden als mit der Vergleichsmethode der rasterelektronischen Vermessung der Rißspitzenabstumpfung.

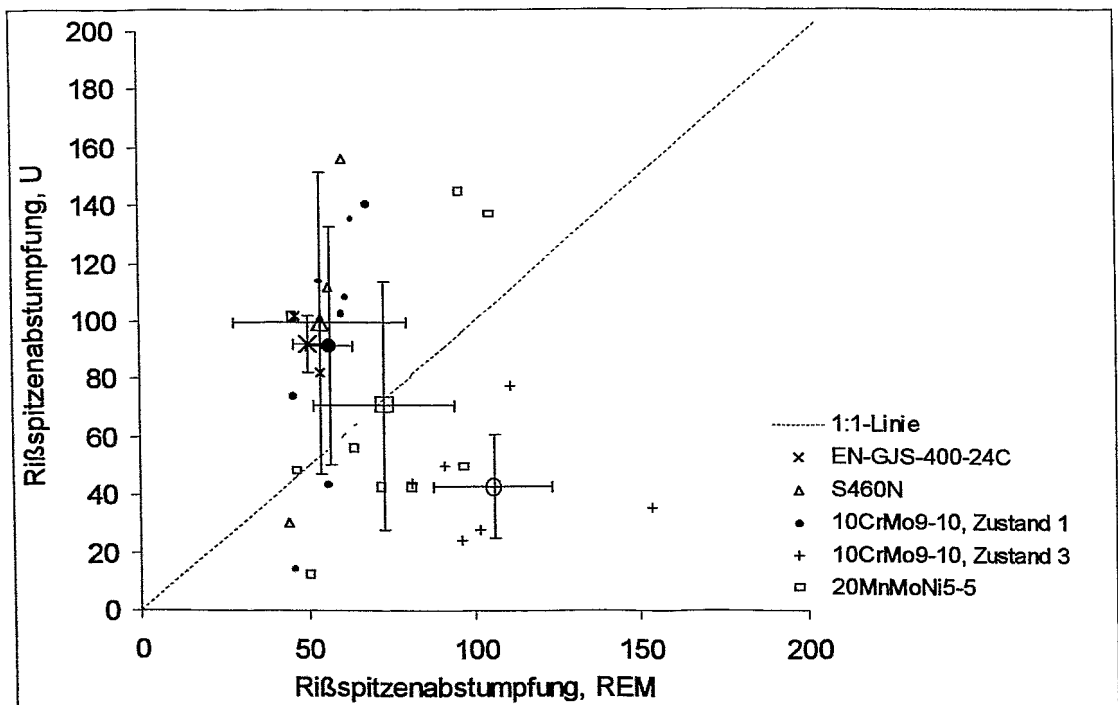


Abb. 7-20. Vergleich der Ergebnisse der maximalen Rißspitzenabstumpfung, die einerseits im REM ermittelt und andererseits auf der Grundlage der Ultraschallmessungen gewonnen wurde

Mit den Mittelwerten der Rißspitzenabstumpfung und der US-definierten Rißspitzenabstumpfung sind für beide Wärmebehandlungszustände des Material 10CrMo9-10 aus der J-R-Kurve die J_i und J_{iUS} ermittelt worden. Die J-R-Kurven wurden nach dem Mehrprobenverfahren erstellt (Abb. 7-21. und Abb. 7-22.), wobei Endrißlängen der mittels Ultraschall durchgeführten Einprobenversuche als Grundlage für diese J-R-Kurven dienten. In das Diagramm sind die Rißabstumpfungsgerechten nach ESIS P2-92 eingefügt.

Bei dem Vergleich der Streubereiche der verschiedenen Rißinitiierungskennwerte ist zu beachten, daß bei dieser Form der Aufbereitung der Meßergebnisse die Größe der Fehlerbalken, die den Streubereich der Rißinitiierungskennwerte charakterisiert, auch durch das Anstiegsverhalten des entsprechenden Kurvenbereichs der J-R-Kurve im zugrundeliegenden Δa -Bereich bestimmt (scheinbar gestreckt oder gestaucht) wird.

Für den weniger duktilen Werkstoff, 10CrMo9-10, Zustand 1, lag der aus den Ultraschallergebnissen ermittelte Wert J_{iUS} über dem fraktografisch ermittelten Rißinitiierungskennwert. Die Ultraschallergebnisse sind mit einer größeren Abweichung behaftet als J_i . Die Streubereiche für J_i und J_{iUS} überlagern sich partiell, anhand der Ultraschallmeßdaten werden jedoch auch wesentlich höhere Werte für den Rißfeldparameter J_{iUS} bestimmt.

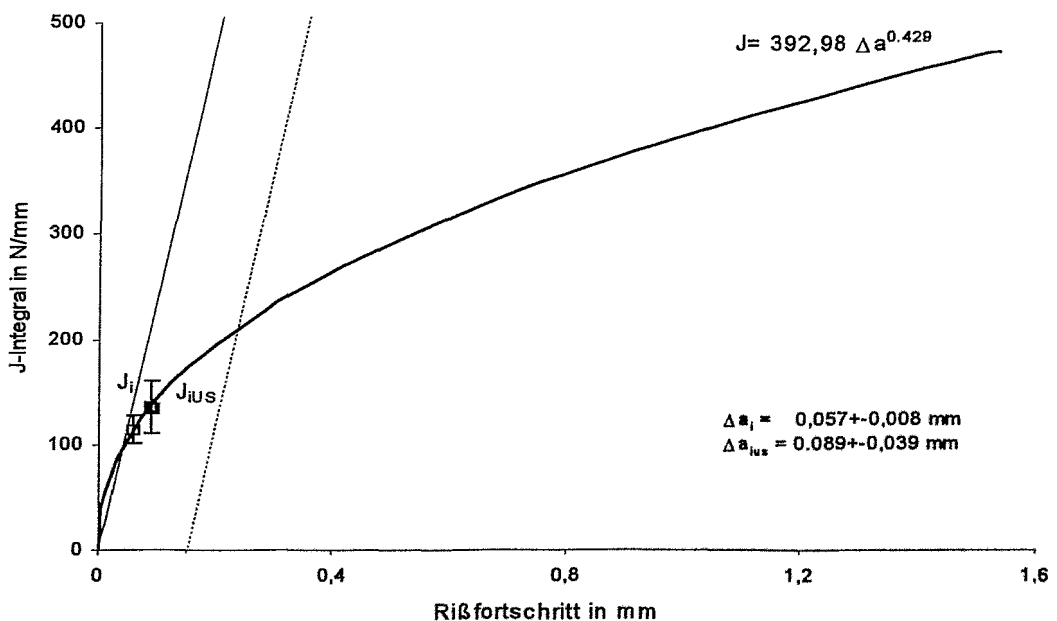


Abb. 7-21. Stretchzonenvergleich für das Material 10CrMo9-10, Zustand 1, nach dem Ultraschallverfahren und nach fraktografischer Auswertung der Bruchfläche

Für den duktileren Werkstoff stellt sich die Reihenfolge anders dar. Die mittels Ultraschallergebnisse erhaltenen Werte für J_{iUS} liegen unter den fraktografisch ermittelten Werten für J_i , die Werte für J_{iUS} sind im Vergleich zu J_i jedoch auch bei diesem Material mit der größeren Standardabweichung behaftet. Die beiden physikalischen Rißinitiierungskennwerte sind in jedem Fall konservativer als der technische Ersatzkennwert.

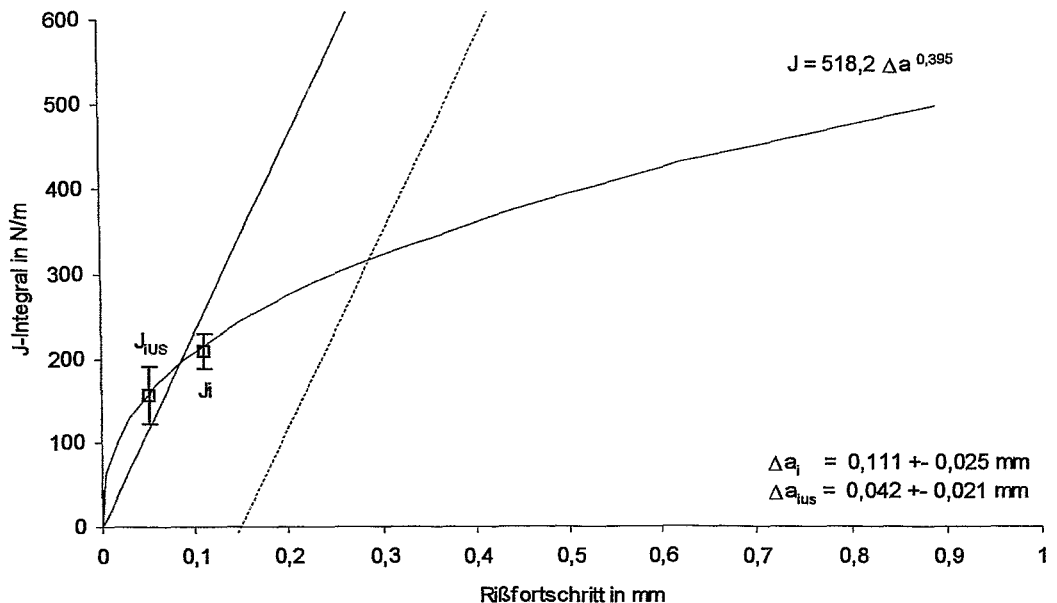


Abb. 7-22. Vergleich der Rißinitiierungskennwerte für das Material 10CrMo9-10, Zustand 3, nach dem Ultraschallverfahren und nach fraktografischer Auswertung der Bruchfläche

Dieser Vergleich der beiden Rißinitiierungskennwerte J_i und J_{iUS} kann nur orientierenden Charakter tragen. Bei diesem Vergleich handelt es sich um die Ergebnisse zweier Methoden physikalisch unterschiedlichen Ursprungs. Im Rasterelektronenmikroskop liegt eine der endgültigen maximalen Rißspitzenabstumpfung zugeordnete Fläche zur Vermessung vor. Bekanntermaßen wird die Vermessung der maximalen Rißspitzenabstumpfung im REM von großen Unsicherheiten begleitet. Im Dreipunktbiegeversuch wird der Vorgang der Rißspitzenabstumpfung erfaßt. Zudem haben sich übereinstimmende Stadien der Rißspitzenabstumpfung an den einzelnen Abschnitten der Rißfront zu unterschiedlichen Zeiten herausgebildet. Selbst die endgültige Ausbildung der Stretchzone wird deshalb von einem Einprobenverfahren als ein Prozeß wahrgenommen, der sich in den Meßergebnissen über einen entsprechenden Meßwertbereich hinweg niederschlagen muß.

Aus dieser Sicht ist die Übereinstimmung der optisch und mit dem ULB-Verfahren ermittelten Werte für den Betrag der Rißspitzenabstumpfung durchaus befriedigend.

8 Bewertung des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens

Das Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahren (ULB-Verfahren) wurde für die bruchmechanische Prüfung von seitgekerbten, ermüdungsangerissenen ISO-V-Proben entwickelt und erprobt. Der bei den ISO-V-Proben zu erwartende Gesamtrißfortschritt ist, absolut gesehen, sehr klein (hier bis ca. 2 mm). Aus diesem Grund werden an die Genauigkeit von Einprobenverfahren, die zur Prüfung dieser Proben zum Einsatz kommen, sehr hohe Anforderungen gestellt. Es müssen kleinste Rißfortschrittsbeträge ($\Delta a \ll 2 \text{ mm}$) zuverlässig erfaßt werden. Diese Aufgabe wird bei duktilen Werkstoffen zusätzlich dadurch erschwert, daß die Rißausbreitung durch eine große plastische Zone und durch starke Probendurchbiegung begleitet wird.

Ein besonderer Vorteil des ULB-Verfahrens gegenüber dem Mehrprobenverfahren und dem Teilentlastungsverfahren besteht darin, daß die mit dem ULB-Verfahren erreichbare Meßpunktdichte eine nahezu kontinuierliche Wiedergabe der Rißfortschritts-Durchbiegungskurven und der darauf aufbauenden J-Rißwiderstandskurven ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, daß die in Prüfnormen geforderte Genauigkeit eingehalten wird. In den Prüfnormen wird gefordert, daß die mittels Einprobenmethode ermittelte Endrißverlängerung nicht mehr als 15% oder 0.15 mm von der direkt auf der Bruchfläche ermittelten Endrißverlängerung abweichen darf, wobei der größere der beiden Werte gilt. Zur Bewertung der Genauigkeit der Rißlängenmessung wurde im vorliegenden Fall beim Vergleich zwischen Einprobenverfahren und fraktografisch ermittelter Endrißlänge die strengere Forderung (15%-ige Abweichung) bereits für kleinste Rißfortschrittsbeträge mit Erfolg herangezogen.

Das Verfahren kann auch für die Prüfung von Proben anderer Geometrie und Abmessungen angewandt werden. Insbesondere die Übertragung des Meßprinzips auf größere Probengeometrien bereitet keine Schwierigkeiten.

Ein weiterer Vorteil des ULB-Verfahrens ist die einfache Handhabung. Es setzt lediglich die definierte Instrumentierung der Probe mit jeweils einem Sende- und einem Empfangsprüfkopf unter Anwendung spezieller Haltevorrichtungen voraus. Die Rißfortschrittsermittlung aus der Laufzeitmessung ist automatisierbar, so daß die aktuelle J-R-Kurve bereits während des Versuches dargestellt werden kann. Da der endgültige, mit dem ULB-Verfahren ermittelte Wert für a_0 durch Rückextrapolation der folgenden Meßwerte ermittelt wird, erfolgt die endgültige Ermittlung des Gesamtrißfortschritts und eine Korrektur der J-R-Kurve nach Versuchsende.

Im folgenden soll die Leistungsfähigkeit des Ultraschall-Laufzeit-Beugungs-Verfahrens anhand eines Vergleichs mit den beiden am häufigsten angewandten Einprobenverfahren zur Rißfortschrittsmessung, dem Gleichstrom-Potentialverfahren und dem Teilentlastungsverfahren, bewertet werden. Diese beiden Einprobenverfahren gelten derzeit als die zuverlässigsten Alternativverfahren zum Mehrprobenverfahren. Verglichen werden die Methoden

der Kalibrierung der Meßverfahren, die erreichbare Genauigkeit bei der Rißfortschrittsmessung und die Prüfbarkeit verschiedener Materialgruppen sowie die Möglichkeiten zur Detektion von Rißinitiierungsvorgängen, d.h. zur Erfassung des Beginns stabiler Rißausbreitung.

8.1 Verfahrenvergleich des Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens mit dem Gleichstrompotentialverfahren und dem Teilentlastungsverfahren

Einprobenmethoden setzen die Kalibrierung ihres Meßeffektes auf den im Experiment vorliegenden Rißfortschrittsbetrag voraus.

- Beim ULB-Verfahren wird der Zusammenhang zwischen dem Rißfortschritt und der Ultraschalllaufzeit in einer einfachen, mathematischen Beziehung formuliert. Voraussetzung für die Anwendung des ULB-Verfahrens ist lediglich die einmalige Vermessung der zur Anwendung kommenden Prüfköpfe und die Kenntnis einer Materialkonstanten, der Transversalwellengeschwindigkeit des zur Prüfung vorliegenden Werkstoffs.
- Beim Teilentlastungsverfahren erfolgt die Berechnung des Rißfortschritts aus der Last-Durchbiegungskurve oder der Last-Rißaufweitungskurve anhand theoretischer Kalibriergleichungen. Mit zunehmender Duktilität und mit zunehmender Durchbiegung beschreiben diese Kalibriergleichungen den tatsächlichen Rißfortschritt ungenauer und müssen deshalb durch materialabhängige Kalibriergleichungen modifiziert werden [27].
- Die Kalibrierung des Gleichstrompotentialverfahrens kann ebenso anhand theoretischer Kalibrierfunktionen erfolgen oder muß für jeden Versuch erneut durchgeführt werden. Diese experimentelle Kalibrierung erfordert die Gleichsetzung der Potentialdifferenz im Punkt einer deutlichen Anstiegsänderung des Potential-Durchbiegungsverlaufs (oder des Kurvenminimums) und der Endpotentialdifferenz mit der optisch vermessenen maximalen Rißspitzenabstumpfung und der fraktografisch vermessenen Endrißlänge. Der so ermittelte Punkt im Potential-Durchbiegungsverlauf ist ein Ergebnis der Überlagerung der plastischen Verformung und des Rißfortschritts und muß nicht genau dem Rißinitiierungspunkt entsprechen, ein zutreffenderes Indiz für den Beginn von Rißwachstum steht jedoch nicht zur Verfügung. Nach gegenwärtigem Erkenntnisstand wird die Kalibrierung durch den Vergleich mit der tatsächlichen (fraktografisch vermessenen) Ermüdungsanrißlänge neben den zur Verfügung stehenden theoretischen Kalibrierfunktionen gleichberechtigt angewandt [14, 38] oder sogar vorgezogen [25].

Für die Bestimmung der Ermüdungsanrißlänge zu Beginn des Dreipunktbiegeversuches a_0 schreiben die drei Verfahren grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweisen vor. Die Schwierigkeit der a_0 -Bestimmung rührt daher, daß die Messung des Rißfortschritts (Aufzeichnung einer Rißausbreitungs-Durchbiegungskurve) zu Beginn des quasistatischen Dreipunktbiegeversuches vom Prozeß der Öffnung des Ermüdungsanrisses und der Vergrößerung der plastischen Zone beeinflusst wird. Der Effekt tritt zu Beginn eines Biegeversuches auf, unabhängig davon, welches Rißfortschrittsmeßverfahren angewandt wird.

- Eine eindeutige Trennung der lediglich durch die Öffnung des Ermüdungsanrisses beeinflussten Meßwerte von Meßergebnissen des Rißausbreitungsprozesses ist nur im Fall der Anwendung des ULB-Verfahrens möglich. Im Gegensatz zu Elektropotential- und Teilentlastungsverfahren (elektrische Brückenbildung bei Potentialverfahren, Stützeffekt lokaler Rißuferkontakte beim Teilentlastungsverfahren) wird der Effekt mit dem Ultraschallverfahren direkt erkannt und damit separierbar. Nach der in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Verfahrensweise werden die Meßpunkte der Ermüdungsanrißöffnung von den übrigen Meßpunkten getrennt. Ultraschallbeugungssignale von Kontaktstellen der Rißufer werden erkannt, da sie zeitlich vor den Rißspitzensignalen erscheinen müssen. Wenn ein Ermüdungsanriß mechanisch geschlossen vorliegt, kann von der tatsächlichen Rißspitze unter Umständen kein Signal erzeugt werden, da sie dann für Ultraschall kein Hindernis darstellt.
- In der Prüfvorschrift zur Anwendung des Teilentlastungsverfahrens wird dem Einfluß lokaler Kontaktstellen der Rißufer auf die Anfangsmeßwerte durch Verfahrensvorschriften begegnet. Die Probe wird zu Beginn mehrfach im elastischen Bereich belastet. Eine Differenz der dabei ermittelten Rißlängen von weniger als 0.1 mm wird in Kauf genommen und der Mittelwert der Messungen a_0 gleichgesetzt.
- Bei der Kalibrierung des Gleichstrompotentialverfahrens ist eine Bestimmung der Ermüdungsanrißlänge gar nicht vorgesehen. Das erste aus einem typischen Meßschrieb bestimmbare Ereignis, die deutliche Änderung des Kurvenanstiegs, wird der maximalen Rißspitzenabstumpfung zugeordnet.

Die Messung des aktuellen Rißfortschritts geschieht mit den ULB-Verfahren und dem Gleichstrompotentialverfahren nahezu kontinuierlich. Mit dem Teilentlastungsverfahren wird der Rißfortschritt diskontinuierlich ermittelt. Die Meßergebnisse des ULB-Verfahrens und der Gleichstrompotentialverfahrens gewähren somit eine bessere Vorstellung vom Ablauf des Rißausbreitungsprozesses einschließlich möglicher Unstetigkeiten.

Mit allen drei diskutierten Meßprinzipien lassen sich für große Rißfortschrittsbeträge (ca. 5 - 10 mm in entsprechend größeren Proben) zuverlässige Ergebnisse erzielen. Sind, wie im vorliegenden Fall, an ISO-V-Proben kleine Rißfortschrittsbeträge zu vermessen, ermöglicht das ULB-Verfahren immer noch eine zuverlässige Bestimmung der J-Rißwiderstandskurve. Bei der Messung solcher kleiner Rißfortschrittsbeträge mit dem Teilentlastungsverfahren und dem Gleichstrompotentialverfahren wurden teilweise unzulässig große Streuungen der Meßergebnisse ermittelt [22, 101] bzw. eine tendenzielle Unterschätzung der Meßergebnisse festgestellt [102].

Als ein großer Nutzen des ULB-Verfahrens wird angesehen, daß auch die Prüfung von zähen Werkstoffen gute Ergebnisse liefert, denn bekanntermaßen bereitet die Prüfung von zähen Werkstoffen sowohl mit dem Teilentlastungsverfahren [103] als auch dem Gleichstrompotentialverfahren Schwierigkeiten [25, 47]. Die im eigenen Labor durchgeführten Versuche mit dem Teilentlastungsverfahren am bainitischen

Stahl 10CrMo9-10 liefern Ergebnisse, die mit den Ergebnissen des Ultraschallverfahrens vergleichbar sind. Die Ergebnisse des Teilentlastungsverfahrens führen zu einem geringfügig steileren Anstiegsverhalten der J-R-Kurven. Die Ermittlung des Beginns von stabiler Rißausbreitung mit dem Teilentlastungsverfahren ist jedoch kritisch, da gerade im Anfangsbereich große Streuungen mit teilweise negativem Rißfortschritt vorliegen.

Das ULB-Verfahren wurde zunächst durch seinen Einsatz an bainitischem Stahl ausführlich untersucht. Nachfolgend wurde gezeigt, daß das Meßprinzip auch problemlos auf andere Werkstoffgruppen übertragbar ist. Bei der Anwendung des Verfahrens auf unterschiedliche Werkstoffe kann eine Besonderheit auftreten: Infolge der unterschiedlichen Verformungsfähigkeit der Materialien kann eine Überlagerung des Rißspitzenechos mit Folgeechos zu jeweils unterschiedlichen Stadien des Biegeversuches eintreten. In den Bereichen einer Echoüberlagerung ist keine direkte Messung des Rißfortschritts möglich (vgl. Absatz 5.3.4.). In einem solchen Fall wird durch die Anwendung des bildgebenden Auswerteverfahrens bei der Versuchsauswertung eine Überbrückung dieser Bereiche ermöglicht.

Das ULB-Verfahren ist für die Prüfung von Werkstoffen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaftsspektren anwendbar. So können prinzipiell elektrisch leitfähige und elektrisch nicht leitfähige Materialien, Werkstoffe mit hohem und niedrigem Festigkeits- Zähigkeitsverhältnis oder auch viskose Materialien geprüft werden. Der Anwendung des ULB-Einprobenverfahrens sollte man vor allem dann den Vorzug geben, wenn ein Werkstoff mit starken Gefügeinhomogenitäten (Absatz 7.2.3.) oder ein in geringen Mengen zur Verfügung stehender Werkstoff (Schweißnahtprüfung) geprüft werden soll, bei dem die Erstellung einer J-R-Kurve nach dem Mehrprobenverfahren nicht möglich ist.

8.2 Vergleichende Bewertung der Verfahren zum Nachweis von Rißinitiierung

Das ULB-Verfahren ermöglicht eine zuverlässige Bestimmung der J-Rißwiderstandskurve anhand von Originalmeßdaten bereits in ihrem Anfangsbereich, aus der die Ermittlung des physikalischen Werkstoffkennwertes J_i hergeleitet werden kann. Der physikalische Kennwert J_i zur Kennzeichnung der Rißeinleitung wird im Gegensatz zu genormten technischen Ersatzkennwerten als ein tatsächlicher Werkstoffkennwert betrachtet, der den Widerstand des Werkstoffes gegen Rißeinleitung charakterisiert. Der physikalische Rißinitiierungskennwert J_i wird üblicherweise als ein Schnittpunkt des am Rasterelektronenmikroskops vermessenen Wertes der maximalen Rißspitzenabstumpfung mit der Kurvenanpassungsfunktion der gemessenen J- Δa -Wertepaare ermittelt. Seine Bestimmung ist dann sinnvoll, wenn das Werkstoffverhalten mit der J- Δa -Kurve hinreichend genau wiedergegeben werden kann. Darüber hinaus kann auf einer mit dem Ultraschallverfahren ermittelten J-R-Kurve der Kennwert J_i auch dann ermittelt werden, wenn qualifizierende Prozeduren

zur Ermittlung von technischen Ersatzkennwerten nicht anwendbar sind. Ein Beispiel dafür ist die Prüfung von zähem Material in ISO-V-Geometrie, bei der die ermittelten technischen Ersatzkennwerte aufgrund der Probengröße außerhalb ihres vorgeschriebenen Gültigkeitsbereiches liegen.

Das während eines Biegeversuches vom Einprobenverfahren aufgezeichnete Meßsignal ist ein summarisches Ergebnis aus dem Vorgang der Rißverlängerung und der plastischen Probenverformung. Für das ULB-Verfahren ist dabei die Veränderung der geometrischen Beziehungen zwischen Rißspitze und Prüfköpfen aufgrund plastischer Probendeformation von entscheidender Bedeutung. Die Veränderung der Ultraschalllaufzeit aufgrund eines rißspitzennahen verformten Probenbereiches kann vernachlässigt werden (vgl. Abs. 5.4). Zur Datenanalyse der Ultraschallmeßdaten wurde eine Korrekturgleichung eingeführt, die den Einfluß der plastischen Probenverformung der Biegeprobe als geometrischen Effekt betrachtet und vom Meßergebnis eliminiert (vgl. Absatz 5.3.3).

Das Gleichstrompotentialverfahren kann eine Korrektur des Verformungseinflusses nicht leisten (vgl. Absatz 2.4), da die Einflußfaktoren plastische Probenverformung und Probendeformation auf das elektrische Potential nicht voneinander separierbar sind.

Es wurde versucht, eine ausschließlich aus den Meßwerten des Ultraschallverfahrens ableitbare Information zur Indikation von Rißinitiierung zu erhalten. Prinzipiell können mit einem über die gesamte Rißfront integrierenden Einprobenverfahren wie dem ULB-Verfahren Indikatoren geliefert werden, die eine Übergangsphase von Rißspitzenabstumpfung zur Rißausbreitung, den frühesten Zeitpunkt des Beginns stabiler Rißausbreitung oder/ und das Ende dieser Übergangsphase anzeigen. Analysiert wurden die mit dem ULB-Verfahren ermittelten Rißfortschritts-Durchbiegungskurven und daraus ein Wert für die maximale Rißspitzenabstumpfung (vgl. Absatz 7.3) bestimmt. Der Einfluß plastischer Durchbiegung ist entsprechend Abs. 5.3.3 aus dem Meßergebnis eliminiert worden. Mittels dieses Wertes konnte analog der Verfahrensweise zur Ermittlung des Rißinitiierungskennwertes J_i ein Rißinitiierungskennwert J_{iUS} ermittelt werden. Eine Abschätzung der Genauigkeit dieses Kennwertes erlaubt der Vergleich der J_i -Kennwerte auf der Grundlage der rasterelektronischen und der ultraschallbezogenen Vermessung. Diese Untersuchungen beziehen sich auf Meßergebnisse des Stahls 10CrMo9-10 in beiden Wärmebehandlungszuständen. Es hat den Anschein, daß das ULB-Verfahren für den duktileren der beiden Wärmebehandlungszustände den Beginn der Übergangsphase zur stabilen Rißausbreitung zuverlässiger anzeigt (Abb. 7-20.). Das Ergebnis der Rißinitiierungsbestimmung J_{iUS} aus diesen Ultraschallmeßdaten ist konservativer als der physikalische Rißinitiierungskennwert J_i . Die Ergebnisse sind bisher jedoch nicht ausreichend bestätigt. In jedem Fall sollte dieser aus Originalmeßdaten entwickelte Rißinitiierungskennwert J_{iUS} als ein Hinweis auf das tatsächliche Materialverhalten Berücksichtigung finden. Er charakterisiert die physikalische Rißinitiierung zutreffender als ein technischer Ersatzkennwert und kann ohne zusätzlichen Meßaufwand aus den Meßergebnissen abgeleitet werden.

9 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahrens

Für die Erfassung von Rißausbreitungsvorgängen mit dem ULB-Verfahren liegen sehr günstige Voraussetzungen vor, wenn, wie im Fall genormter bruchmechanischer Werkstoffprüfverfahren, die Probengeometrie, die Rißkonfiguration und die Belastungsbedingungen von vornherein bekannt sind. Das Meßprinzip des ULB-Verfahrens ist nicht eingeschränkt auf die Prüfung bruchmechanischer Biegeproben bei quasistatischer Belastung ausgerichtet. Es ist prinzipiell auch für veränderte Belastungsregimes oder höhere Belastungsgeschwindigkeiten sowie zum Nachweis von Rißuferkontakten einsetzbar. So liegt es nahe, die Übertragbarkeit des ULB-Verfahrens auf andere bruchmechanische Prüfaufgaben zu untersuchen, bei denen etablierte Meßmethoden nicht erfolgreich eingesetzt werden können.

9.1 Rißfortschrittmessung beim instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch (IKSBV)

Der Kerbschlagbiegeversuch (KSBV) ist ein bewährtes Prüfverfahren zur Charakterisierung der Werkstoffzähigkeit, das einen geringen Aufwand an Prüfzeit und Material erfordert und in langer Tradition sowohl für die Sicherheits- als auch für die Qualitätsbewertung angewandt wird. Durch seine Instrumentierung kann der Verbrauch an Schlagenergie in jedem Zeitpunkt des Experimentes (gemessener Kraft-Zeitverlauf) erfaßt und somit durch doppelte numerische Integration dieser Daten ein Kraft-Durchbiegungsverlauf zur Ermittlung einer Rißwiderstandskurve bereitgestellt werden. Die experimentelle Erfassung des entsprechenden Rißfortschritts geschieht bei der dem Versuch zugrunde liegenden hohen Prüfgeschwindigkeit derzeit im Mehrprobenverfahren (Low-blow-Test, Stop-Block-Test) [104, 105] oder näherungsweise durch die analytische Auswertung des im IKSBV gemessenen Kraft-Zeitverlaufes. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, mittels Schallemissionsmessung Rißinitiierungsprozesse zu detektieren [106, 107]. Es besteht großes Interesse, Einprobenverfahren für den instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch zu entwickeln, die es gestatten, das Fortschreiten des Risses während des rasch ablaufenden Versuches direkt zu erfassen.

Das diskutierte Ultraschallverfahren bietet gute Voraussetzungen zur In-situ-Erfassung des Rißfortschritts im IKSBV. In einem Demonstrationsexperiment wurde versucht, das ULB-Verfahren im IKSBV anzuwenden. Eine ISO-V-Probe (Werkstoff: 10CrMo9-10) wurde derart instrumentiert, daß der Schall unter dem Winkel von 45° auf die Rißspitze gelenkt wird. Anschließend wurde die Probe in einem Low-Blow-Test schlagartiger Belastung unterzogen (Schlagenergie = 8 J, Fallgeschwindigkeit des Pendelhammers ca. 0,9 m/s). Die Ultraschallmessungen wurden in situ mit einer Wiederholffrequenz von 5 kHz (5000 Messungen pro Sekunde) ausgeführt. In Abb. 9-1. wird eine im IKSBV empfangene Ultraschallsignalfolge dem im gleichen Versuch gemessenen Kraft-Zeitverlauf gegenübergestellt. Die einzelnen Ultraschallmessungen können durch den regelmäßig wiederkehrenden

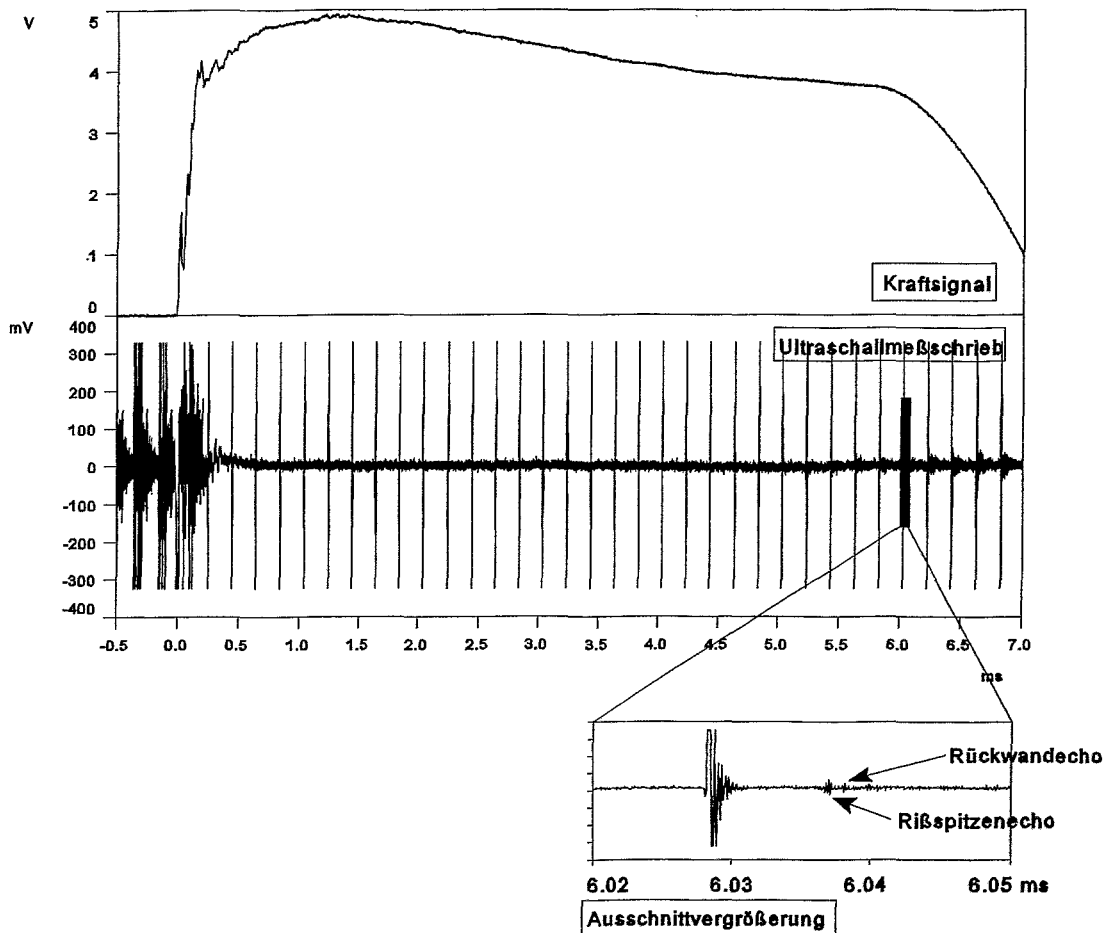


Abb. 9-1. Kerbschlagbiegeversuch (Low-Blow) mit Ultraschall-Rißlängenmessung

Sendeimpuls erkannt werden.

Das Demonstrationsexperiment zeigt:

- Das Prinzip der Rißlängenmessung durch die Laufzeitmessung einer schräg auf die Rißspitze gelenkten und dort gebeugten Transversal- oder Longitudinalwelle läßt sich auf den IKSBV übertragen. Während des Versuches erfolgt eine ausreichende Anzahl von US-Rißlängenmessungen, um daraus eine J-Rißwiderstandskurve im Sinne eines Einprobenverfahrens erstellen zu können. Anhand der Ausschnittvergrößerung des Ultraschallsignals wird deutlich, daß die aus Absatz 5.2.3 bekannte Echofolge wiedergefunden werden kann und die rißspitzengebeugte T-Welle zur Laufzeitmessung zur Verfügung steht. Derzeit können Anfangs- und Endrißlängen während des Versuches sicher gemessen werden. Um jedoch zu jedem ausgelösten Sendepuls ein Rißspitzenecho zu erfassen, ist eine

schlagfeste, zerstörungsfreie Ankopplung der Ultraschallprüfköpfe erforderlich.

- Das Experiment wurde mit verminderter Schlagenergie geführt. Dabei betrug die Anzahl der In-situ-Ultraschallmessungen parallel zur Aufzeichnung des Kraft-Zeitsignals 35 Messungen. Bei einem Kerbschlagbiegeversuch mit einer Fallgeschwindigkeit des Hammers von ca. 5 m/s können ca. 5 US-Rißlängenmessungen, bzw. bei einer Verdopplung der Wiederholfrequenz der Ultraschallimpulse auf 10 kHz ca. 10 US-Rißlängenmessungen vorgenommen werden. Die Anzahl der möglichen Wiederholraten eines Ultraschallimpulses wird in diesem Fall nicht durch die Leistungsfähigkeit der Gerätetechnik beschränkt. Eine Grenze gibt die Gesamtlaufzeit eines Ultraschallimpulses in der Probe vor, nach der er derart abgeschwächt ist, daß er die Signale der Folgeimpulse nicht beeinflusst.

Darüber hinaus ist ein beträchtliches Entwicklungspotential vorhanden:

- Echofolgeänderungen, die zum einen aufgrund der Prüfung unterschiedlicher Werkstoffe und zum anderen aufgrund belastungs-geschwindigkeits-abhängiger Änderungen der Festigkeitseigenschaften zu erwarten sind, sollten mittels bildgebender Signalanalyse (Absatz 5.3.4.) erkannt und berücksichtigt werden.
- Eine zusätzliche Erhöhung der Wiederholraten (ungeachtet meßtechnischer Möglichkeiten) läßt sich durch die Anregung rißspitzengebeugter Longitudinalwellen erreichen (Absatz 5.2.7). Deren höhere, annähernd zweifache Schallgeschwindigkeit führt zu kürzeren Signallaufzeiten und ermöglicht die Signalerfassung des Nutzsignals in kleineren Zeitbereichen, so daß während des ohnehin zeitlich sehr begrenzten Versuches eine größere Anzahl Messungen vorgenommen werden kann.

9.2 Messung der Ermüdungsrißausbreitung und des Rißschließeffectes

Erheblichen Einfluß auf das Ermüdungsrißverhalten zeigt das als Rißschließeffect bezeichnete Schließen des Risses an einzelnen Kontaktstellen der Rißufer vor der eigentlichen Rißspitze bereits bei positiven Nennbelastungen. In der Literatur bestehende unterschiedliche Auffassungen über die Bewertung des Rißschließeffectes haben nicht zuletzt ihre Ursache in meßtechnischen Unsicherheiten [108,109]. Es besteht die Forderung nach einem geeigneten Verfahren, das die Ermüdungsrißausbreitung und den Effect des Rißschließens innerhalb eines Ermüdungsversuches gleichermaßen zuverlässig erfassen kann. Das ULB-Verfahren bietet dafür ausgesprochen günstige Voraussetzungen und kann wesentliche Nachteile etablierter Verfahren zur Messung des Rißschließeffectes überwinden.

In einem ersten Demonstrationsversuch wurde die Ermüdungsrißausbreitung an einer bruchmechanischen Probe mit dem ULB-Verfahren verfolgt. Während einer Belastungssequenz der Probe wurden 100 Ultraschallmessungen ausgelöst [110]. Die Belastungssequenz bestand aus einer Haltezeit bei Oberlast, linearem

Zeit und einer weiteren Haltezeit. Das in Abbildung 9-2. dargestellte Grauwertbild entstand aus den aufgezeichneten, grauwertskalierten Amplituden-Zeit-Signalen dieser 100 Messungen. Die X-Achse der Grauwertdarstellungen entspricht der Laufzeit der Ultraschallsignale, auf der Y-Achse sind die Messungen 1 bis 100 übereinander aufgetragen. Mit dem abgebildeten Zeitausschnitt werden Ultraschallsignale aus einem Bereich an und vor der eigentlichen Ermüdungsrißspitze erfaßt. Über den größeren Bereich des Bildes hinweg liegt der Riß vollständig geöffnet vor, gemessen werden Beugungssignale von der Rißspitze. In einem schmalen Streifen erscheinen Signale mit größerer Amplitude (stärkerer Kontrast des Streifenmusters) zu kürzeren Laufzeiten hin verschoben. In diesem Versuchsabschnitt ist der Riß teilweise geschlossen. Die Ultraschallwellen werden an den einzelnen Kontaktstellen der Rißufer transmittiert und gebeugt und erscheinen so zeitlich vor einem Signal der eigentlichen Rißspitze.

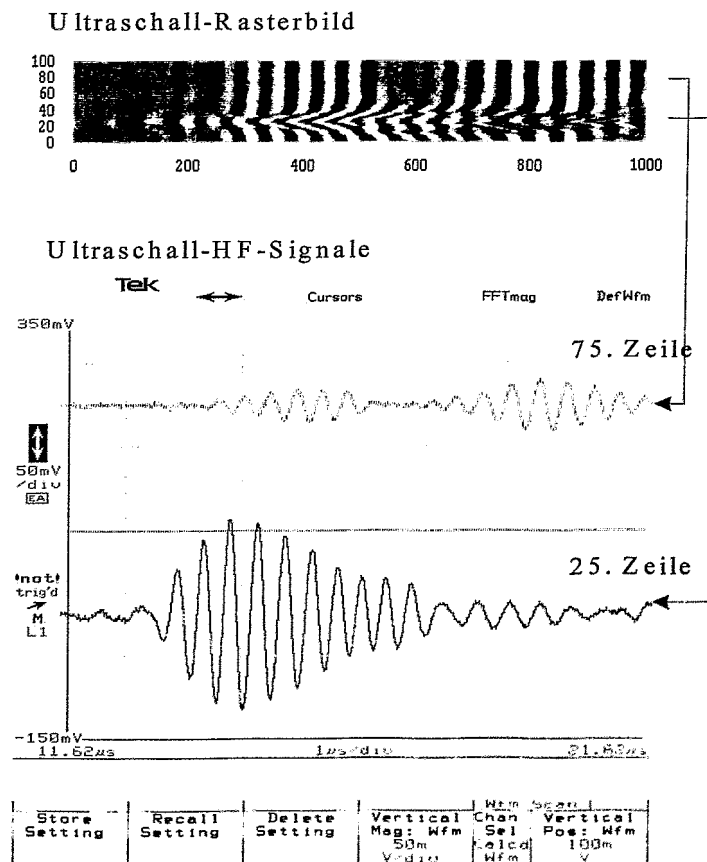


Abb. 9-2. Ultraschallmessungen an einem schwelend belastetem Ermüdungsriß

Das Experiment läßt folgende Schlußfolgerungen zu:

- Das ULB-Verfahren birgt das Potential, während eines Versuches Ermüdungsrißausbreitung zu verfolgen und gleichzeitig Rißschließspannung und Rißöffnungsspannung zu ermitteln.
- Es ist prinzipiell möglich, die Vorgänge an der Bruchfläche in Rißausbreitungsrichtung bezüglich der Lage ihrer Kontaktstellen und der Rißspitze örtlich auflösen zu können. Aus der Laufzeit der gebeugten Ultraschallsignale wird die Lage der Kontaktstellen vor der Rißspitze unterschieden [111]. Bereits im quasistatischen Dreipunktbiegeversuch wurde mit dem ULB-Verfahren der Vorgang der Rißöffnung des Ermüdungsanrisses zu Beginn des Biegeversuches aufgezeichnet (Absatz 5.3.2.). Das Meßergebnis wird im Fall des Dreipunktbiegeversuches für die genaue Kenntnis der Position der Rißspitze zu Beginn stabiler Rißausbreitung benötigt. (Zur Bestimmung der Anrißlänge und der Rißöffnungsspannung kann die Ultraschallmessung während des letzten Ermüdungszyklus beim Einbringen eines Ermüdungsanrisses genutzt werden.)
- Durch eine Probeninstrumentierung mit mehreren Sende- und Empfangswandlerpaaren läßt sich eine Ortsauflösung der Meßergebnisse hinsichtlich der Rißfront (Differenzierung in Probenrand- und Probeninnengebiete) erzielen.
- Prinzipiell ist eine Bewertung der Intensität des Rißschließens durch die Auswertung der Echoamplitude der Beugungssignale mittels digitaler Signalverarbeitung möglich.
- Unter Beibehaltung des diskutierten Meßprinzips (der direkte Weg des Ultraschallsignals zwischen Sende- und Empfangswandler wird durch den Riß unterbrochen) ist die Prüfung von verschiedenen Probengeometrien (SENB, CCT) realisierbar [112].
- Das Verfahren ermöglicht eine Verfolgung des Rißschließeffektes ohne Unterbrechung des Rißausbreitungsversuches. Hierdurch kann der unerwünschte Einfluß von zeitabhängigen Relaxations- und Kriechprozessen auf die zu messende Ermüdungsrißausbreitung minimiert werden.

10. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein Einprobenverfahren zur Erfassung duktilen Rißfortschritts im quasistatischen Dreipunktbiegeversuch auf der Grundlage eines Ultraschallverfahrens methodisch entwickelt und an Werkstoffen unterschiedlichen Zähigkeits-Festigkeitsverhältnisses erprobt. Der Schwerpunkt dieser Entwicklung lag auf der Anwendung bruchmechanischer Kleinproben. Hintergrund des Vorhabens sind Forderungen aus der Reaktorsicherheitstechnik, bruchmechanische Kennwerte an standardisierten Kleinproben in ISO-V-Geometrie zu ermitteln. Die Übertragung des Meßprinzips auf größere Probengeometrien bereitet grundsätzlich keine Schwierigkeiten, sondern würde die Meßsituation vereinfachen.

Dem Meßprinzip liegt der Effekt der Ultraschallwellenbeugung an spaltförmigen Hindernissen zugrunde. Ein auf die Rißspitze einfallender Ultraschallimpuls wird als Zylinderwelle in alle Richtungen gebeugt. Die Laufzeit des von einem Sendewandler auf die Rißspitze gerichteten und dort in Richtung Empfangswandler gebeugten Echos wird zur in-situ-Rißfortschrittsmessung genutzt.

Eine empirische Identifizierung wesentlicher im Versuch gemessener Ultraschallsignale erfolgte zunächst unter Zuhilfenahme des geometrischen Strahlenmodells. Durch Schallfeldsimulationen auf der Grundlage der Elastodynamischen Finiten Integrationstechnik konnte ein umfassendes Verständnis der Signalbildungsabläufe erzielt werden. Es gelang, die Ausbreitung des Wellenfeldes zu visualisieren und die Entstehung der empfangenen Echosignale zu rekonstruieren. Die Simulationsergebnisse gestatten, die Veränderung der Echofolgen bei Rißausbreitung und Probenverformung während des Biegeversuches darzustellen. Demnach ändert sich die Laufzeit des T-Wellenechos hauptsächlich durch Rißwachstum, wird jedoch auch durch die geometrischen Veränderungen der Biegeprobe beeinflusst. Es wurden Grenzbereiche definiert, außerhalb derer eine Rißlängenmessung nach dem vorgeschlagenen Meßprinzip beeinträchtigt wird.

Diese theoretischen Ergebnisse fanden durch einen Vergleich der errechneten Ergebnisse der Schallwellenausbreitung mit der auf experimentellem Wege erhaltenen, stroboskopischen Visualisierung der Wellenausbreitung an den Randbereichen der Probe ihre Bestätigung.

Für das Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren (ULB-Verfahren) wird eine Kalibriergleichung zwischen der Laufzeit eines rißspitzengebeugten Ultraschallsignals und der Rißlänge abgeleitet. Die Kalibriergleichung berücksichtigt die durch plastische Verformung hervorgerufene Probendeformation, so daß der Rißfortschritt letztlich aus der Signallaufzeit und der Probendurchbiegung bestimmt wird.

Das Verfahren ermöglicht eine Bestimmung der Ermüdungsanrißlänge der Dreipunktbiegeprobe allein aus Ultraschallmeßdaten. Sie wird in einem engen

Anfangsbereich der Probendurchbiegung, in dem Signale von mechanischen Kontaktstellen der Rißufer auftreten können, durch lineare Regression darauffolgender Meßwerte ermittelt. Damit kann mit diesem Verfahren der Einfluß eines geschlossen vorliegenden Risses auf das Meßergebnis eliminiert werden. Für andere Einprobenverfahren führen die Auswirkungen des Rißschließens, wie gezeigt wurde, zu weitaus umfangreichem Korrekturaufwand der gewonnenen Meßwerte.

Zwischen den Rißfortschrittswerten, die mittels Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren ermittelt wurden und den nach Versuchsende an den aufgebrochenen Proben fraktografisch ermittelten Rißfortschrittswerten besteht eine gute Übereinstimmung. Die in den Prüfnormen an Einprobenverfahren gestellte Genauigkeitsanforderung, daß beide Werte nicht mehr als 15% voneinander abweichen dürfen, wird erfüllt. Prinzipiell liegt die erreichbare Genauigkeit der Rißfortschrittmessung mittels Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren (das im vorliegenden Anwendungsfall über einen Bereich der Rißfront mittelt) deutlich über der aufgrund der Rißfrontwölbung tatsächlich erreichten Genauigkeit der vorgestellten Ergebnisse.

Die Echofolge kann im Verlauf der Belastung verändert werden. Um trotzdem eine eindeutige Zuordnung zum Bezugssignal zu finden, wurde eine bildhafte Darstellungsform entwickelt, die den vollständigen Versuchsablauf mit seiner hohen Meßpunktdichte kompakt und übersichtlich widerspiegelt. Sie basiert auf der Grauwertskalierung der gemessenen Amplituden-Zeitsignale. Durch Ausnutzung dieser Bildinformation kann das Rißspitzenecho auch im Falle einer Überlagerung mit Folgeechos und anschließender Reihenfolgeänderung der Ultraschallechofolge weiterverfolgt werden.

Das dem ULB-Verfahren zugrundeliegende Meßprinzip ist anwendbar, solange ein direktes Beugungssignal von der Rißspitze angeregt werden kann. Unter den gegebenen Bedingungen konnte bei den Messungen ein Rißlängenbereich von ca. 40 -70 % der Probenhöhe erfaßt werden. Ein genauerer Zahlenwert kann nicht angegeben werden, da sich Rißausbreitungsverhalten und Probennachgiebigkeit materialspezifisch und probenspezifisch ändern.

Die mit dem Verfahren erreichbare Meßpunktdichte ermöglicht eine nahezu kontinuierliche Konstruktion gemessener Rißfortschritts-Durchbiegungskurven und den daraus resultierenden J-Rißwiderstandskurven. Das ULB-Verfahren wurde an einem hochzähen, bainitischen Stahl erprobt. Seine prinzipielle Anwendbarkeit auf unterschiedliche Werkstoffgruppen wurde anhand von Untersuchungen an weiteren Stählen, einem Grauguß- und einem Aluminiumwerkstoff demonstriert. Die mit diesem Einprobenverfahren entwickelten J-Rißwiderstandskurven wurden jeweils einem Vergleich mit nach dem Mehrprobenverfahren bestimmten J-Rißwiderstandskurven unterzogen.

Die Leistungsfähigkeit des ULB-Verfahrens bei bruchmechanischen Untersuchungen wurde im Vergleich mit zwei weiteren Einprobenverfahren, dem

Teilentlastungsverfahren und dem Gleichstrompotentialverfahren, diskutiert und im Einzelfall anhand experimentell ermittelter Ergebnisse des Teilentlastungsverfahrens ausgewiesen.

Die auf Grundlage der Ultraschallmeßergebnisse zugänglichen Informationen wurden hinsichtlich ihres Aussagegehaltes über Rißinitiierungsprozesse ausgewertet. Es wurde versucht, aus der genauen Analyse des Kurvenverlaufs einen Rißinitiierungskennwert zu bestimmen. Es hat den Anschein, daß das ULB-Verfahren für duktile Werkstoffe den frühesten Beginn stabiler Rißausbreitung anzuzeigen vermag. Die Ergebnisse sind bisher noch nicht ausreichend gesichert.

Das ULB-Verfahren bietet günstige Voraussetzungen, im Rahmen weiterer Meßaufgaben der experimentellen Bruchmechanik eingesetzt zu werden. Bei der Auswahl des Meßprinzips wurde berücksichtigt, daß Belastungsregime oder Belastungsgeschwindigkeit in bruchmechanischen Experimenten Änderungen unterliegen oder der Nachweis von Rißuferkontakten gefordert werden kann. So konnte im Rahmen eines Demonstrationsexperimentes die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Rißfortschrittmessung im instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch gezeigt werden. Das ULB-Verfahren bietet die Möglichkeit, während des Kerbschlagbiegeversuches eine ausreichende Anzahl Messungen durchzuführen, um daraus J-Rißwiderstandskurven im Sinne eines Einprobenverfahrens zu erstellen. Darüber hinaus konnte die Anwendbarkeit des ULB-Verfahrens während eines Ermüdungsrißausbreitungsversuches demonstriert werden. Mit dem ULB-Verfahren kann sowohl Ermüdungsrißausbreitung erfaßt werden als auch gleichzeitig, d.h. ohne Versuchsunterbrechung, der Effekt des Rißschließen erfaßt und in Rißausbreitungsrichtung sowie entlang der Rißfront örtlich aufgelöst werden.

Literatur

1. Voss, B., R. A. Mayville: The Use of Partial Unloading Compliance Method for Determination of J-R-Curves and J_{IC} , Elastic Plastic Fracture Test Methods: The User's Experience, ASTM STP 856, E. T. Vessel, Ed., ASTM 1985, pp. 117-130,
2. Fernandez Saez, J., J. Chao, J.M. Amo, J. Duran: Influence of the Measurement Errors of Crack Growth on Fracture Toughness Evaluation. A Monte Carlo Simulation, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 43, No. 2, pp. 287-295, 1992,
3. Curry, D.A., I. Milne, The Detection and Measurement of Crack Growth during Ductile Fracture, Central Electricity Research Laboratories Report RD/L/N64/79, CERL Leather head, 1979, pp. 401-434,
4. Kanninen, M.F., Popelar, C. H., Broek, D.; A critical survey on the application of plastic fracture mechanics to nuclear pressure vessel and piping, Nuclear Engineering and Design, 67 (1981), pp. 27-55,
5. Roos, E.; Grundlagen und notwendige Voraussetzungen zur Anwendung der Reißwiderstandskurve in der Sicherheitsanalyse angerissener Bauteile, VDI-Fortschrittsberichte Reihe 18, Nr. 122, VDI-Verlag Düsseldorf, 1993,
6. ESIS P2-92, Procedure for Determining the Fracture Behaviour of Materials, European Structural Integrity Society, Delft Jan. 1992,
7. Blumenauer, H., Bruchmechanische Werkstoffcharakterisierung, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, Leipzig, 1991,
8. British Standards Institution Document BS 7448-1: 1991, Fracture Mechanic Toughness Tests, Methods determination of KDOWNIDOWNc critical CTOD and critical J values of metallic materials, BSI, 1991,
9. Schwalbe, K.-H., Bruchmechanik metallischer Werkstoffe, Carl Hanser Verlag München 1980,
10. Stehmann, S., Mikrofraktrographische Bewertung des Rißeinleitungs- und Rißausbreitungswiderstandes duktiler Gußeisenwerkstoffe, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 1994,
11. Roos, E., U. Eisele, Determination of Material Characteristic Values in Elastic-Plastic Fracture Mechanics by Means of J-Integral Crack Resistance Curves, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 16, No. 1, Jan. 1988, pp. 1-11,
12. Eisele, U., E. Roos, Bestimmung bruchmechanischer Initiierungskenngrößen auf der Basis des J-Integrals, Materialprüfung 31 (1989) 10,

13. Silcher, H., U. Eisele, E. Roos; Bewertung bruchmechanischer Werkstoffkennwerte im Hinblick auf Geometrie- und Größenabhängigkeit, Abschlußbericht Forschungsvorhaben Ro 651/1-1, MPA Stuttgart, Juli 1990,
14. Schwalbe, K.-H., B. K. Neale, J. Heerens: EFAM GTP 94, The GKSS test procedure for determining the fracture behaviour of materials, GKSS 94/E/60,
15. Sprock, A., D. Holland, J. Arndt, W. Dahl, Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Geometrieinfluß des Reißinitiierungswertes J_I , 25. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., 1995, S. 287-300,
16. Heerens, J., A. Cornec, K.-H. Schwalbe: Results of a Round Robin on Stretch Zone Width Determination, Fatigue Fracture Engineering Materials Structure, Vol. 11 No.1, pp. 19-29, 1988,
17. ASTM/ E 813 - 89, Standard Test Method for J_{IC} , a Measure of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01.
18. Landes J. D., J. A. Begley: Test Results from J-Integral Studies, an Attempt to Establish a J_{IC} Testing Procedure, ASTM STP 560 1974, pp. 170,
19. Landes, J.D., The Blunting Line in Elastic-Plastic Fracture, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. Vol. 18, No.11, 1995, pp. 1289-1297,
20. Kobayashi, H., H. Nakamura, H. Nakazawa, Evaluation of Blunting Line and Elastic-Plastic Fracture Toughness, Elastic-Plastic-Fracture: Second Symposium, Volume II - Fracture Resistance Curves and Engineering Applications, ASTM STP 803, C.F. Shih and J.P. Gudas, Eds. American Society for Testing and Materials, 1983, pp. II-420-II-438,
21. Janoschek, E., H.P. Keller: Ermittlung der Reißzähigkeit des Vergütungsstahles 34CrMo4 mit Potentialmethode, Schallemissionsanalyse und Wiederanschwingverfahren, Materialprüfung 28 (1986) Nr. 4, S. 95-100,
22. Schwalbe, K.-H., D. Hellmann, J. Heerens, J. Knaack, J. Müller-Roos: Measurement of Stable Crack Growth Including Detection of Initiation of Growth Using the DC Potential Drop and the Partial Unloading Methods, Elastic-Plastic Fracture Test Methods: The User's Experience, ASTM STP 856, E.T. Wessel and F.J. Loss, Eds., American Society for Testing and Materials, 1985, pp. 338-362,
23. Wallin, K., T. Saario, P. Auerkari, K. Törrönen: Simultaneous Measurement of Crack Extension by Unloading Compliance and Potential Drop Methods, Technical Research Centre of Finland (VTT), Metals Laboratory,

24. Krompholz, K., G. Ullrich: Determination of J-Integral R Curves for the Pressure Vessel Material A533 using the Potential-Drop Technique and the Multispecimen Method, Engineering Fracture Mechanics Vol. 23, No. 5, 1986, pp. 803-820,
25. Bohac, I. , S. Kranz, L. Pesek, W. Bleck, W. Dahl: Ermittlung von Reißwiderstandskurven an austenitischen Stählen mittels Einprobenmethode, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V.,DVM-Arbeitskreis Bruchvorgänge, 1996, S. 153-166,
26. Clarke, G. A., W. R. Andrews, P. C. Paris, D. W. Schmidt: Single Specimen Test for J_{IC} Determination, Mechanics of Crack Growth, ASTM STP 590, American Society for Testing and Materials, 1976, pp. 27-42,
27. Fischer, F.: Bruchmechanische Bewertung hochfester Baustähle und ihrer Schweißverbindungen bei statischer Beanspruchung, TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, 1993,
28. Heckel, K.: Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik, 3. Auflage, München, Wien, Karl-Hanser-Verlag, 1991, ISBN 3-446-16168-6,
29. Fischer, F., G. Pusch; Baustähle bruchmechanisch prüfen, Materialprüfung, Jhg. 37 (1995), S. 114 - 117,
30. Joyce, J. A.: Characterization of the Effects of Large Unloading Cycles on the Ductile Tearing Toughness of HSLA Steel, Journal of Testing and Evaluation 18 (1990), 6, pp. 373-384,
31. Voss, B. : ECF & Fracture Behaviour and Design of Materials and Structures, Engineering Materials Advisory Services, Ltd. 339 Halesowen Rd., Cradley Heath, Warley, West Midlands B64 6PH, UK. 1990, pp. 979-984,
32. ASTM E 647-95, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates,
33. ASTM E 1737 - 96, Standard Test Method for J-Integral Characterization of Fracture Toughness, Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01;
34. Horstmann, M. , J.K. Gregory, K.-H.Schwalbe: The AC Potential Drop Method. Materialprüfung 35 (1993) 7-9, S. 212-216,
35. Kockelmann, H., A. Schlüter: Grundlagenuntersuchungen zum Potentialsondenverfahren. DFG-Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Ko 896/1-1, Dez. 1986,

36. Thaulow, Ch., M. Hauge, A. Guleiksrud, A.J. Paauw: Single-Specimen Test Measurement of J_i and $J-\Delta a$ with a Pulsed D-C Potential-Drop Technique. Fracture Mechanics: Eighteenth Symposium, ASTM STP 945, D.T. Read and R.P. Reed, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988, pp. 333-346,
37. Schöne, D., D. Aurich: Rißfortschritt messen - Automatisierte Meßwert-erfassung mit einer Gleichstrompotentialsonde im Rißentstehungs- und Rißfortschrittsbereich. Materialprüfung 34 (1992) 7-8, S. 224-227,
38. ISO-Entwurf ISO/TC 164/SC 4- N140 (Rev5), Metallic materials - Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness, International Organization for Standardization 1999,
39. Johnson, H. H.: Calibrating the Electric Potential Method for Studying Slow Crack Growth, Material Research and Standards 5, 1965, S. 442-445,
40. Hackett, E. M., M. T. Kirk: An Evaluation of J-R-Curve-Testing of Nuclear Piping Materials Using the Potential Drop Technique, NUREG/ CR-4540, U.S. Nuclear Regulatory Commission, August 1986,
41. Kockelmann, H., A. Schlüter: Bruchmechanische Werkstoffprüfung - Einfluß der Stromfrequenz bei Potentialsondenmessungen. Materialprüfung 30 (1988) 4, S. 103,
42. Dietzel, W., K.-H. Schwalbe: Monitoring stable crack growth using a combined a.c./d.c. potential drop technique, Materialprüfung 28 (1986) Nr. 11, S. 368-372,
43. Ude, J., E. Schick, M. Schröder, F. Michel: Die Anwendung des Potential-sondenverfahrens bei bruchmechanischen in-situ-Versuchen. Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V., DVM-Tagung Werkstoffprüfung, 5. und 6. Dezember 1996, Bad Nauheim, S. 453-458,
44. H. Blumenauer, F. Michel, J. Ude, E. Schick: Ermittlung der Rißeinleitungszähigkeit mit dem Potentialsondenverfahren, DVM-Tagung Werkstoffprüfung 1996, Fortschritte in der Prüftechnik, Bad Nauheim 1996,
45. de Roo, P., B. Marandet: Application of A.C: Potential Drop Method to the Detection of Initiation in Static and Dynamic Testing, CSNI-Workshop, Ductile Fracture Test Methods, Paris, 1.-3. 12. 1982,
46. Baer, W.: Bruchmechanische Bewertung ferritischer Gußeisenwerkstoffe sowie artgleicher Schweißverbindungen bei statischer Beanspruchung, Dissertation, TU Bergakademie Freiberg, 1995,

47. Dalle Donne, V. Bachmann, H. Döker: Kontinuierliche Ermittlung der stabilen Rißverlängerung an zähen Werkstoffen mit der Potentialmethode, 24. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge 1992, S. 361-371,
48. Riemelmoser, F., R. Pippan, H. Weinhandl, O. Kolednik: Grenzen und Möglichkeiten der DC-Potentialmethode. 26. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, Deutscher Verband für Materialforschung und -prüfung e.V. 1994, S. 227-237,
49. Gibson, G.P.: Evaluation of the A.C. Potential Drop Method to Determine J-Crack Resistance Curves for a Pressure Vessel Steel, Engineering Fracture Mechanics Vol. 32 No. 3, pp. 387-401, 1989,
50. Wallin, K., T. Saario, P. Auerkari, K. Törrönen (Technical Research Centre of Finland VTT, Metals Laboratory): Simultaneous Measurement of Crack Extension by Unloading Compliance and Potential Drop Methods. Ductile Fracture Test Methods, CSNI-Workshop, 1. - 3. 12. 1982,
51. Schwalbe, K.-H., D. Hellmann: Application of the Electrical Potential Method to Crack Length Measurements Using Johnson's Formula. Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 9, No. 3, May 1981, pp. 218-221,
52. Heerens, J., K.-H. Schwalbe, D. Hellmann, J. Knaack, J. Müller-Roos: Application of the DC potential drop and the partial unloading methods to fracture mechanics tests. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 85/E/16, 1985,
53. Heerens, J., K.-H. Schwalbe, A. Cornec: Modifications of ASTM E 813-81 Standard Test Method for an Improved Definition of J_{ic} Using New Blunting-Line Equation, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, 88/E/59, 1988,
54. Loibnegger, F.: Zur Rißeinleitung und ihrer Bedeutung in Stahl, Dissertation, TVFA, Technische Universität Wien 1990,
55. Klima, S., D. J. Lesco, J. C. Freche: Ultrasonic Technique for Detection and Measurement of Fatigue Cracks, Report TN D-3007, National Aeronautics and Space Administration Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1965,
56. DVM-Merkblatt 002, Ermittlung von Rißinitiierungswerten und Rißwiderstandskurven bei Anwendung des J-Integrals, Deutscher Verband für Materialprüfung, Juni 1987,
57. Krüger, G., W. Löbner: Methode zur Bestimmung des Beginns stabiler Rißausbreitung für die Kennwertermittlung in der Bruchmechanik, Neue Hütte 24 (1979), 5,

58. Tseng, M. K., H. L. Matcus: A Single Specimen Determination of J_{IC} for Aluminium Alloys, Engng. Fract. Mechn. 16 (1982) pp. 895-903,
59. Lai, Z., L. J. Chen, J. M. Chang, C. X. Ma: A New Method of Determining of J_{IC} of Steel by Means of Single Specimen, Engng. Fract. Mechn. 17 (1983) 5 pp.395-403,
60. Ullrich, G., K. Krompholz: Bestimmung der Initiation des stabilen Rißwachstums (J-Integral) auf der Basis des Theorems der übereinstimmenden Zustände, Materialprüfung 28 (1986) 3,
61. Ernst, H., P. C. Paris, M. Rossow, J. W. Hutchinson: Analysis of Load-Displacement Relationship to Determine J-R-Curve and Tearing Instability Materials Properties, Fracture Mechanics, ASTM STP 677, Ed. C. W. Smith, American Society for Testing and Materials, 1979, pp. 581-599,
62. Reese, E. D., K.-H. Schwalbe: The Linear Normalization Technique - an Alternative Procedure for Determining J-R-Curves from a Single Specimen Test Record Based on Landes' Normaization Method, Fatigue Engineering Mater. Struct. Vol. 16, No. 3,1993, pp. 271-280,
63. Kobayashi, T., I. Yamamoto, M. Niinomi: Evaluation of Dynamic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Impact Test, Engng. Fract. Mechn. 24 (1986) 5, pp. 773-783,
64. Falk, J., W. Dahl: Bestimmung von dynamischen Rißwiderstandskurven aus dem instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch, 23. Vortragsveranstaltung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, Berlin, 1991, S. 391-400,
65. Achenbach, J. D.; Wave Propagation in Elastic Solids, North Holland, 1973,
66. Harumi, K., M. Uchida, T. Miyajima, Y. Ogura: New Technique to Distinguish Tip Echo and to Measure Surface Crack Sizes Using Tip Echo, Ultrasonic Defect Sizing, Japanese Tip Echo Handbook, Ed. by K. Harumi, Y. Ogura, M. Uchida, published by Tip Echo Working Group of 210 and 202 Sub-Committee of Japanese Society for Non-destructive Inspection, 1989, pp. 35-38,
67. Silk, M.G.: The transfer of ultrasonic energy in the diffraction technique for crack sizing, Ultrasonics, May 1979, p. 113-121,
68. Harumi, K., S. Ogura, M. Uchida, T. Miyajima: Tip Echo Method in Japan - with Motion Picture of Tip Wave, Non-Destructive Testing (Proc. 12th World Conference) edited by J. Boogaard and G.M. van Dijk, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1989, pp. 279-284,

69. Ogilvy, J.A., J.A.G. Temple, Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection, Ultrasonics, November 1983, pp. 259-269,
70. Silk, M.G.: The Role of Ultrasonic Diffraction in NDT, Proc. Brit. Inst. HDT Annual Conf. Sheffield 1989, p. 17-31,
71. DIN V ENV 583-6: 2000-03, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Teil 6: Beugungslaufzeittechnik, eine Technik zum Auffinden und Ausmessen von Inhomogenitäten, Deutsches Institut für Normung e.V., 2000
72. Fellingner, P., Ein Verfahren zur numerischen Lösung elastischer Wellenausbreitungsprobleme im Zeitbereich durch direkte Diskretisierung der elastodynamischen Grundgleichungen, Uni/GH Kassel, Dissertation am Lehrstuhl für Theoretische Elektrotechnik, 1991,
73. Langenberg, K.J. et al., Evaluation of materials and structures by quantitative ultrasonics, Inverse methods and imaging, ed. by J.D. Achenbach, Springer Verlag Wien-New York, 1993 - by CISM,
74. Hauthal, Kähling: Bestimmung des Rißbeginns und der Rißfortpflanzungsgeschwindigkeit bei dynamischen Zug-Druckversuchen, Bericht Nr. 417-3/62, Institut für Leichtbau und ökonomische Verwendung von Werkstoffen, Forschungsbereich Werkstoffe, Pirna 1962,
75. Klima, S.J., D.M. Fisher, R.J. Buzzard, Monitoring Crack Extension in Fracture Toughness Tests by Ultrasonics, Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 4, No. 6, Nov. 1976, pp. 397-404,
76. Yasunaka, T., N. Iwao, K. Kimura, K. Hoshimoto, I. Muto, H. Fukuhara, S. Matsumoto, H. Yoshida, Ultrasonic Detection of Onset of Crack Extension in Fracture Toughness Specimen of a HT60 Steel, Transactions of National Research Institute for Metals, Vol. 28, No. 3 (1986) pp. 241-247,
77. Salzmann, F., T. Varga, Ultraschallverfahren zur Bestimmung der Rißinitiation an Kompaktzugproben, Material und Technik 1983, No. 3, S. 109-115,
78. Loibnegger, F., F. Salzmann, T. Varga, Bestimmung der Rißinitiation an ermüdungsangerissenen Kerbschlagbiegeproben, 11. MPA Seminar, Okt. 1985, S. 1-19,
79. Lyndberg, Bryne: Crack Arrest, Additional Safety against Catastrophic Fracture, Nordic Liaison Committee for Atomic Energy, ed. by Lars Dahlberg, November 1989, ISBN 87 7303 402 9,
80. Hirano, K., H. Kobayashi, H. Nakazawa: A Single Specimen Determination of Elastic-Plastic Fracture Resistance by Ultrasonic Method, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986, pp. 415-434,

81. Underwood, J. H.: The Equivalence of K_{IC} and J_{IC} Fracture Toughness Measurements in Ni-Cr-Mo-Steels, *Experimental Mechanics*, September 1978, S. 350-355,
82. Rehbein, D.K., L. VanWyk, R.B. Thompson, O. Buck: Tensile Overload and Stress Intensity Shielding Investigations by Ultrasound, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 9 Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, 1990,
83. Golan, S., R. Arone: Measuring of Closure Forces with Ultrasonic Diffracted Waves, *New Procedures in Nondestructive Testing*, Springer-Verlag Berlin, S. 587-596, 1983,
84. Yasunaka, T., N. Iwao, N. Furuya, K. Kimura, H. Yamawaki, Measurement of J_{IC} and Its Evaluation for High Strength Steels Using Both Ultrasonic Through Transmission and Angle Beam Reflection Methods, *Transactions of National Research Institute for Metals*, Vol. 25, No. 3 (1986) p. 35-41,
85. Bouami, D., D. De Vadder, Detection and Measurement of Crack Closure and Opening by an Ultrasonic Method, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 23, No. 5, pp. 913-920, 1986,
86. D. de Vadder, D., Y. Park, D. Francois: A New Ready-to-use Apparatus for Accurate Measurements on Fatigue Specimens, *EGF 10th Congress*, Oct. 1991, Budapest/ Hungary, p. 633-639,
87. Silk, M.G.: Defect Sizing using Ultrasonic Diffraction, *British Journal of NDT*, Jan. 1979, p. 12-15,
88. Hirano, K., H. Kobayashi, H. Nakazawa, A. Hayashi: Monitoring of Surface Fatigue Crack Growth and Crack Tip Closure Behavior by the Ultrasonic Method, *Role of Fracture Mechanics in Modern Technology* G.C. Sih, H. Nisitani and T. Ishihara (Eds.), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1987, pp. 723,
89. Silk, M.G., C.P. Hobbs: Practical Derivation of Flaw Behaviour: An Aid to Condition Monitoring, *Condition Monitoring and Diagnostic Technology*, Vol. 1, No. 1, June 1990, p. 18-24,
90. Lien, E., Siegmund, R. S. : Ultrasonic Diffraction Measurements of Fatigue Crack Growth, *British Journal of NDT*, No. 22, 1980, pp. 281-283,
91. Date, K., H. Shimada, Y. Ito: Monitoring Crack Extension in Fracture Toughness Tests by Ultrasonic Surface Wave, *The Non-destructive Testing Journal*, Japan, Vol. 2, No. 3, 1984, p. 132-137,
92. Kunze, R.: Ultraschallverfahren zur Erfassung von Rißbildung und Rißfortschritt bei quasistatischer Belastung, Diplomarbeit, TU Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft, 1994,

93. K.J. Langenberg, Ch. Hofmann: Mathematisch-numerische Modellierung der Ultraschallstreuung an oberflächenverbundenen Rissen mit dem EFIT-Code, Arbeitsbericht, Uni/GH Kassel, Lehrstuhl Theoretische Elektrotechnik, 1993,
94. Köhler, B., Ch. Schurig: Visualization of Ultrasonic Fields on Solids, I. Ultrasonics World Congress 1995, Berlin, Sept. 3 to 7, 1995, pp.459 -462,
95. DIN EN 12223, Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Beschreibung des Kalibrierkörpers Nr. 1, Deutsches Institut für Normung e.V., 1999
96. Rehmer, B.: bruchmechanische Bewertung ferritischer Gußeisenwerkstoffe mit Kugel- und Vermiculargrafit in Abhängigkeit von Beanspruchungsgeschwindigkeit und Temperatur, Dissertation der Universität/ Bergakademie Freiberg, 1992,
97. Kühnicke, E.: persönliche Mitteilungen, TU Dresden, Lehrstuhl für technische Akustik, 1998,
98. Dzugan, J.: Unloading Compliance for Charpy Size Three Point Bending Specimens, Internal Report of Investigation, Forschungszentrum Rossendorf, 2000,
99. Udoh, A.: Ermittlung fließbruchmechanischer Kennwerte für ferritisches GGG-40 und seine Schweißverbindung bei dynamischer Beanspruchung, Dissertation der Universität/ Bergakademie Freiberg, 1997,
100. Bergmann, U., J. Böhmert, H.-W. Viehrig: Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte an Reaktordruckbehälterstählen mit der Einproben-Compliance-Methode und Korrelation zur Kerbschlagarbeit, FZR-Report 81, Forschungszentrum Rossendorf, 1995,
101. Heerens, J.: Rißabstumpfung, Spaltbruch im Übergangsbereich und stabiles Rißwachstum - untersucht mit den Methoden der nichtlinearen Bruchmechanik, Dissertation der Technischen Universität Hamburg - Harburg, 1990,
102. Steenkamp, P.A.J.M.; J-R-Curve Testing of Three Point Bend Specimens by the Unloading Compliance Method, Fracture Mechanics 18th Symposium, ASTM STP 945, Philadelphia, 1988, pp. 583-610,
103. Hellmann, D.: Geometrieinfluß auf das stabile Rißwachstum bei nichtlinearem Werkstoffverhalten, GKSS-Forschungsbericht GKSS 83/E/38, Geesthacht, 1983,
104. Blumenauer, H., R. Ortmann: Dynamic Fracture Toughness Determination of Ductile Steels by the Instrumented Charpy Test, Failure Analysis, Theory and Practice ECF-7, Budapest Hungary 1988, pp. 625-633,
105. Ortmann, R., H. Blumenauer, J. Man, M. Holzmann; Rißwiderstandskurven und Rißeinleitungszähigkeit, Materialprüfung 36 (1994) 1-2, S. 21-25,

106. Richter, H., J. Böhmert, M. Valo, H.-W. Viehrig; Detektion von duktiler Rißinitiierung durch Schallemission, Forschungsbericht des Forschungszentrum Rossendorf, FZR-230, August 1998,
107. Richter, H.; Ermittlung zähbruchmechanischer Kennwerte unter schlagartiger Beanspruchung mittels Schallemission, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2000,
108. Döker, H., V. Bachmann; in ASTM STP 982, ed. by J. C. Newman, W. Elber, ASTM, Philadelphia, 1988, pp. 247-259,
109. Schaper, M., A. Böhm, F. Schlät, A. Tkatch; On Fatigue Crack Closure and its Significance, 10th Congress on Material Testing, Vol. II, Budapest, Hungary, Oct. 1991, pp. 566-571,
110. Bergner, F., M. Schaper, U. Bergmann; Analyse von Rißschließvorgängen mit Ultraschallverfahren, DVM-Bericht 230, 30. Tagung des DVM-Arbeitskreises Bruchvorgänge, 17./18. Februar 1998, Dresden, S. 151-160,
111. DFG-Projektantrag SCHA 583/ 5-1, "Zeit- und orts aufgelöste Erfassung und Bewertung des Rißschließeffektes mit Ultraschallverfahren", 1999,
112. Bergner, F., U. Bergmann, V. Fleischer, Das Konzept des Ultraschall-Laufzeit-Prozeßablauf-Bildes, DGZfP-Seminar zerstörungsfreie Materialcharakterisierung, Jena 14./15.10. 1996, S. 253 - 258.

Anhang

Tab. A-1.

Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchungen bei quasistatischer Dreipunktbiegung.
ISO-V-Proben (10 x 10 x 55 mm³)

Material: 10CrMo9-10, Zustand 1	Probenbezeichnung	Δa_{opt} [mm]	Δa_{us} [mm]	a_{0opt} [mm]	a_{0us} [mm]	J [N/mm]	$J_{1,5}$ [N/mm]	$J_{0,2}$ [N/mm]
	15_1	0,678	0,587	4,927	4,893	54	30	-
	15_2	0,47	0,413	4,902	4,848	53	26	-
	16_1	1,438	1,403	4,975	4,926	98	52	-
	16_2	1,545	1,535	4,899	4,839	118,4	64	-
	16_3	1,511	1,516	4,888	4,814	-	-	-
	16_4	0,81	0,747	4,835	4,768	-	-	-
	16_5	0,291	0,285	4,927	4,872	31,2	24	-
	17_1	1,174	1,105	4,906	4,865	-	-	-
	17_2	0,612	0,599	4,855	4,77	37,2	18	-
	17_3	0,578	0,534	4,863	4,795	30,2	13	-
	17_4	0,983	0,953	4,924	4,854	-	-	-

Material: 10CrMo9-10, Zustand 3	Probenbezeichnung	Δa_{opt} [mm]	Δa_{us} [mm]	a_{0opt} [mm]	a_{0us} [mm]	J [N/mm]	$J_{1,5}$ [N/mm]	$J_{0,2}$ [N/mm]
	35_4	0,98	0,892	4,962	4,93	151	149	-
	35_5	0,622	0,601	4,913	4,871	145,5	144	-
	36_1	0,23	0,234	4,976	4,926	-	-	-
	36_2	0,652	0,621	4,824	4,785	90	55	-
	38_4	0,376	0,419	6,029	5,92	-	163	-

Fortsetzung von Tab. A-1.

Material: 20MnMoNi5-5	Probenbezeichnung	Δa_{opt} [mm]	Δa_{us} [mm]	a_{0opt} [mm]	a_{0us} [mm]	J_i [N/mm]	J_{iUS} [N/mm]	$J_{0,2}$ [N/mm]
	c1_2	0,088	0,089	4,887	4,809	22,34	20	-
	c2_1	0,526	0,529	5	4,916	102,7	103	-
	c2_2	-	-	5,024	4,901	-	-	-
	c2_3	0,1147	0,113	4,894	4,816	-	-	-
	c3_2	1,038	1,009	4,9	4,894	111,9	70	-
	c4_1	0,214	0,2505	4,876	4,781	-	-	-
	c4_2	0,074	0,0543	4,79	4,755	-	-	-
	c4_3	0,248	0,261	4,855	4,769	-	-	-

Material: S460N	Probenbezeichnung	Δa_{opt} [mm]	Δa_{us} [mm]	a_{0opt} [mm]	a_{0us} [mm]	J_i [N/mm]	J_{iUS} [N/mm]	$J_{0,2}$ [N/mm]
	S6	2,747	2,727	4,813	4,735	84	27	-
	S7	0,185	0,192	4,893	4,82	68	-	-
	S10	0,722	0,696	4,82	4,761	56	35	-

Material: EN-GJS-400-24C	Probenbezeichnung	Δa_{opt} [mm]	Δa_{us} [mm]	a_{0opt} [mm]	a_{0us} [mm]	J_i [N/mm]	J_{iUS} [N/mm]	$J_{0,2}$ [N/mm]
	G1	1,52	1,513	4,593	4,524	6,7	1,5	39
	G2	2,357	2,337	4,567	4,53	15,5	6,7	38,8
	G3	0,799	0,807	4,73	4,703	-	-	34,8
	G4	1,139	1,26	5,164	5,145	14,6	6,7	35,6

Tab. A-2.

Ergebnisse der Rißspitzenabstumpfungsmessung im Rasterelektronenmikroskop und der Auswertung der mittels ULB-Verfahren gewonnenen Meßdaten

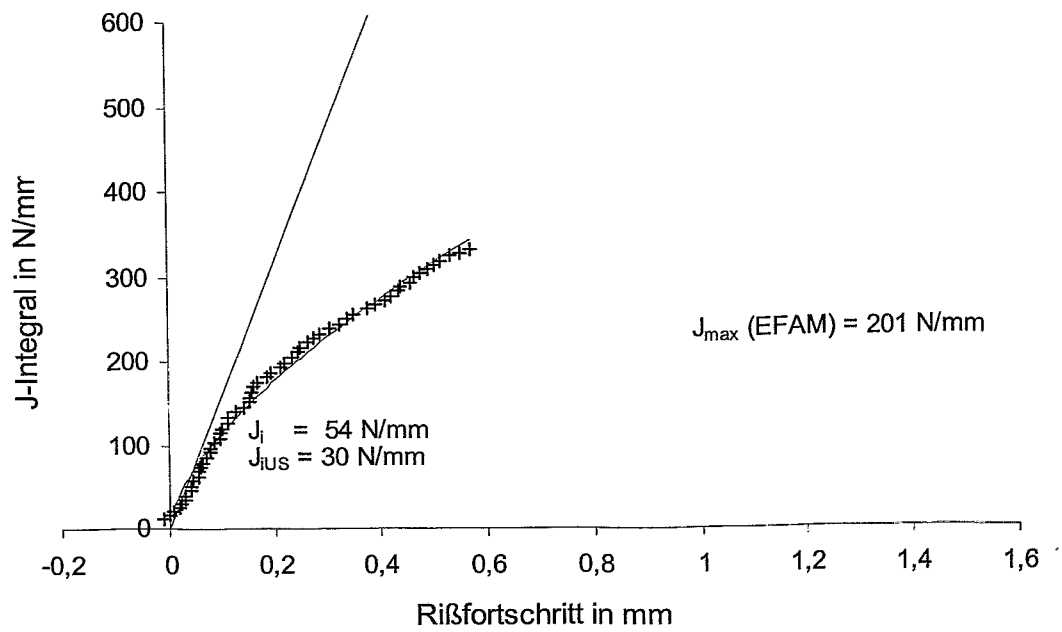
Material: 10CrMo9-10, Zustand 1	Probenbezeichnung	SZW _{REM} [µm]	SZW _{us} [µm]
	15_1	-	-
	15_2	45,3	73,9
	15_4	55,8	44
	16_1	63,7	135,3
	16_2	67,9	140,5
	16_4	-	-
	16_5	61,3	108,4
	16_6	45,6	14,3
	17_1	-	-
	17_2	60,1	103
	17_3	53,5	113,9
	17_4	-	-

Material: 10CrMo9-10, Zustand 1	Probenbezeichnung	SZW _{REM} [µm]	SZW _{us} [µm]
	35_3	81,5	43,7
	35_4	90,9	49,9
	35_5	111,1	77,2
	36_1	96,3	23,9
	36_2	153,8	35,3
	38_4	101,8	27,8

Material: 20MnMoNi5-5	Probenbezeichnung	SZW _{REM} [µm]	SZW _{us} [µm]
	c1_2	104,5	137
	c2_1	96,6	49,5
	c2_2	64,2	56,1
	c2_3	46,5	48,3
	c3_1	45,2	101,7
	c3_2	95,8	144,7
	c3_3	80,9	42,9
	c4_1	70,8	-
	c4_2	50,3	12,3
	c4_3	72,2	42,7

Material: S460N	Probenbezeichnung	SZW _{REM} [µm]	SZW _{us} [µm]
	S6	56,6	112
	S7	65,3	-
	S9	44,1	30
	S10	60,8	156

Material: EN-GJS-400-24C	Probenbezeichnung	SZW _{REM} [µm]	SZW _{us} [µm]
	G1	38,2	-
	G2	53,7	82
	G3	-	-
	G4	46,2	102



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

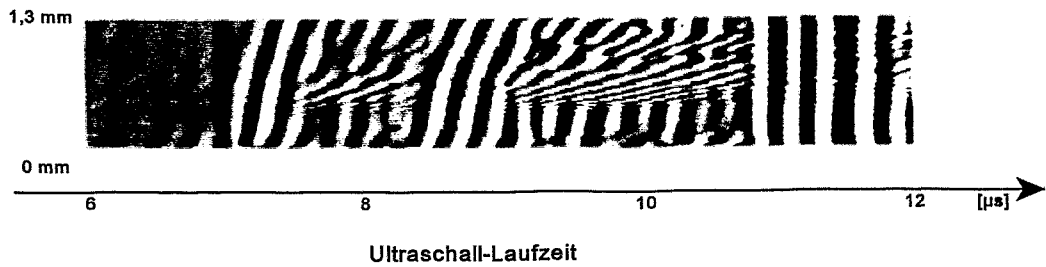
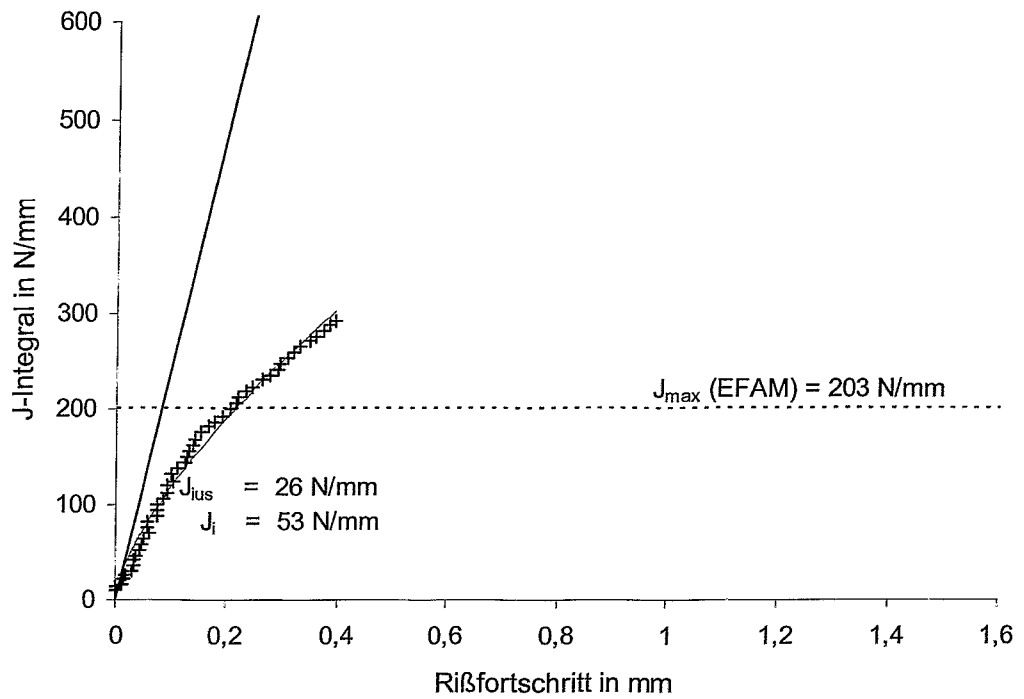


Abb. A-1. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 15_1



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

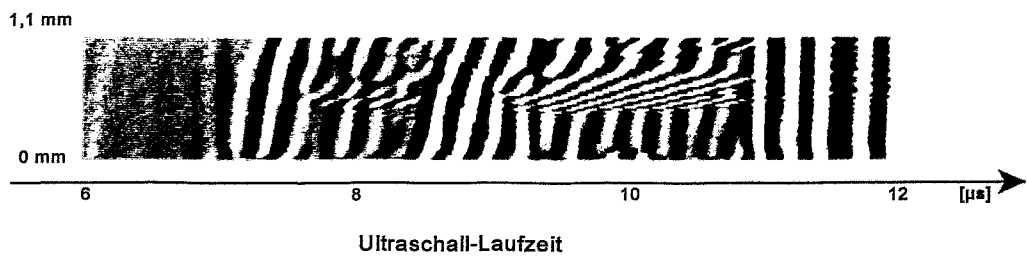


Abb. A-2. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Versuch 15_2

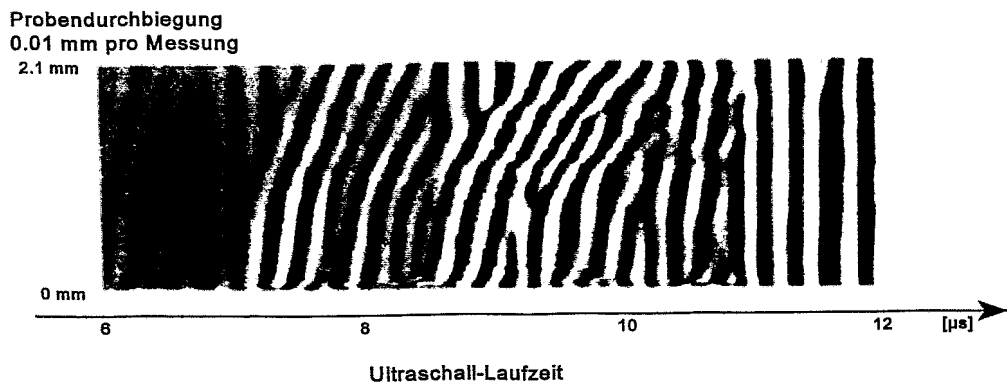
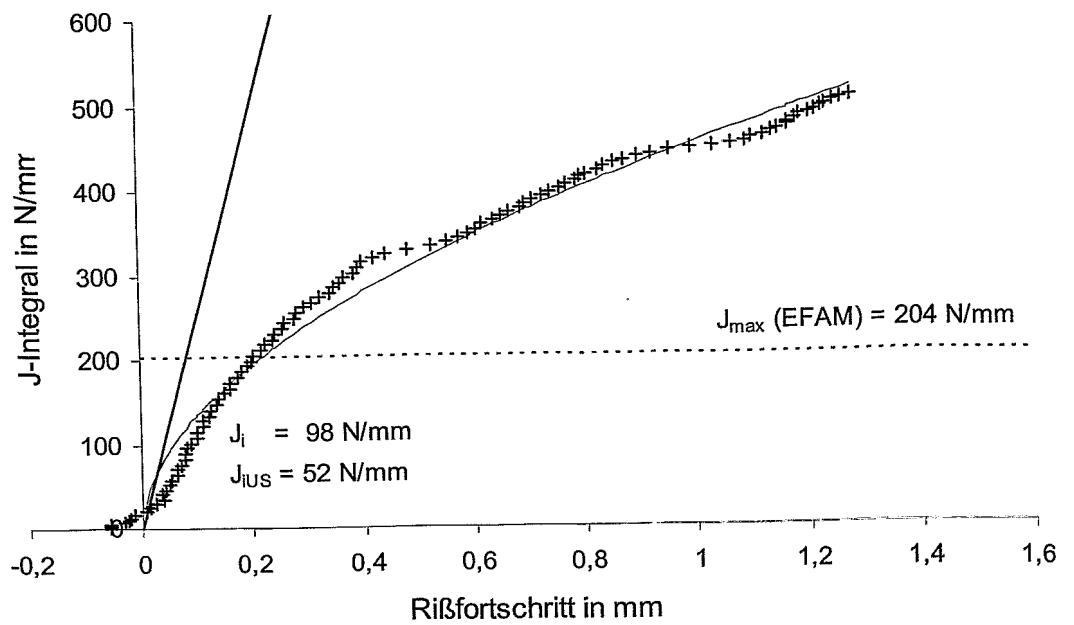
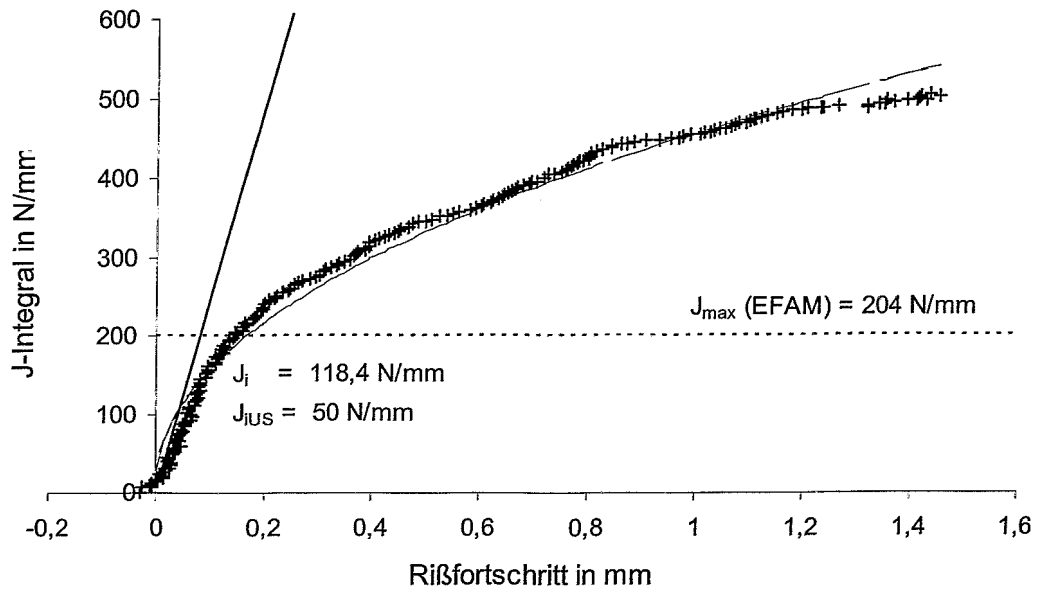


Abb. A-3. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 16_1



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

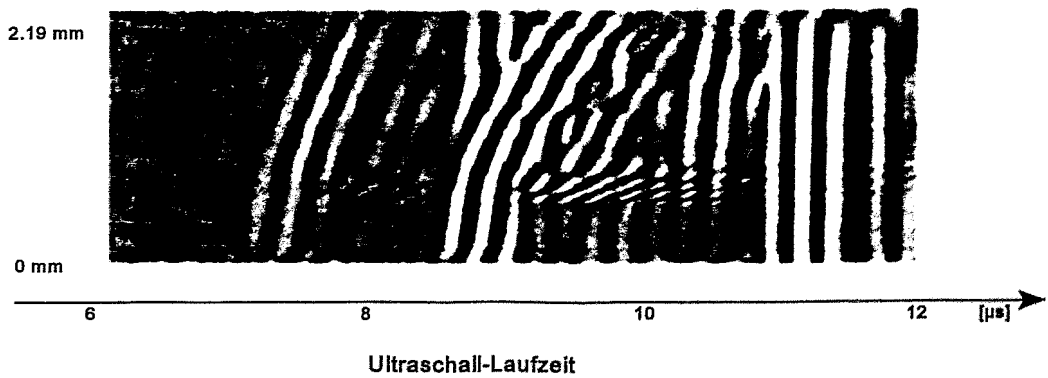
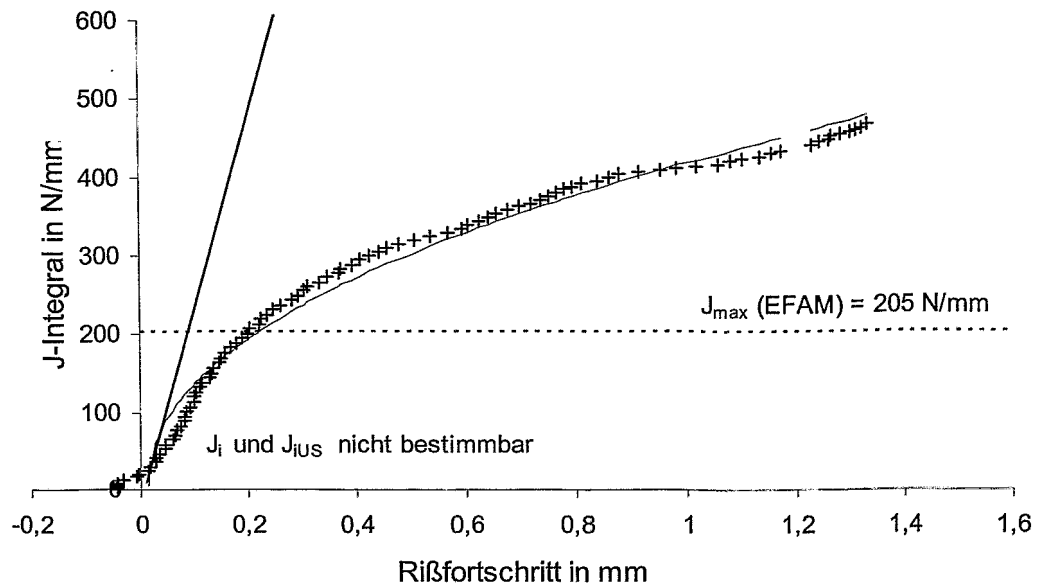


Abb. A-4. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 16_2



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung
1.96 mm

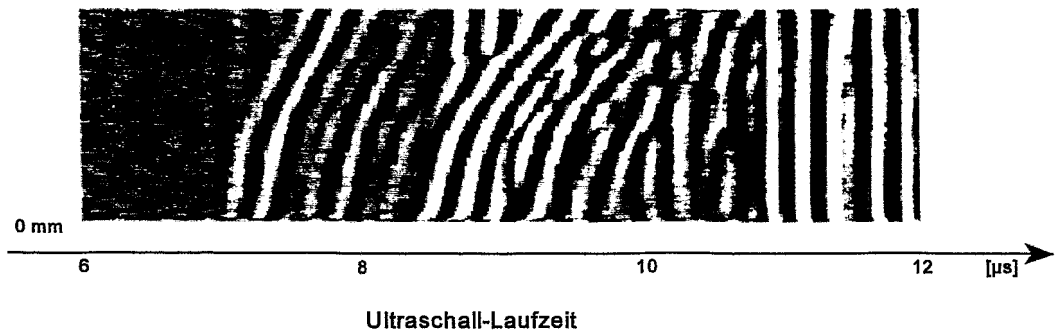
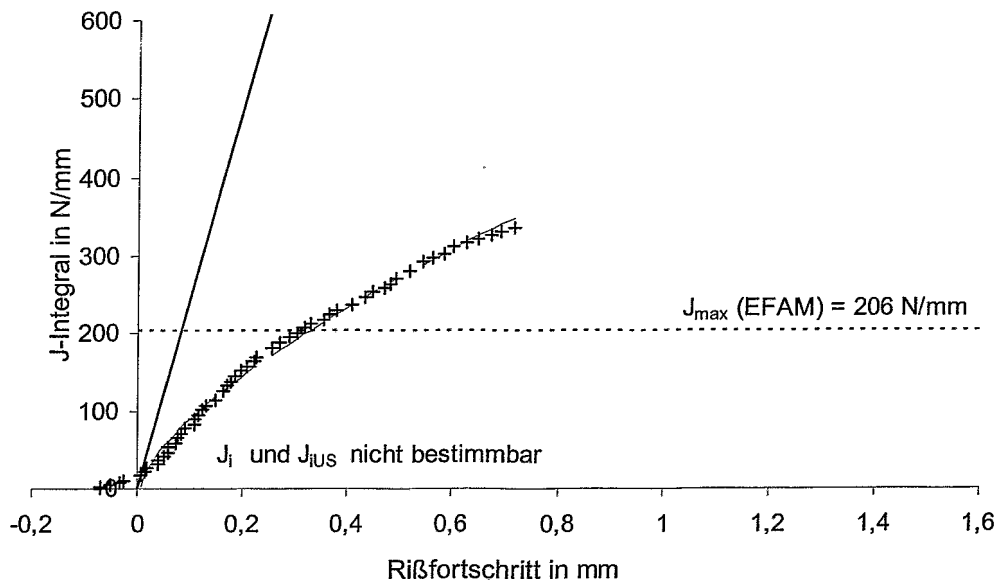


Abb. A-5. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 16_3



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

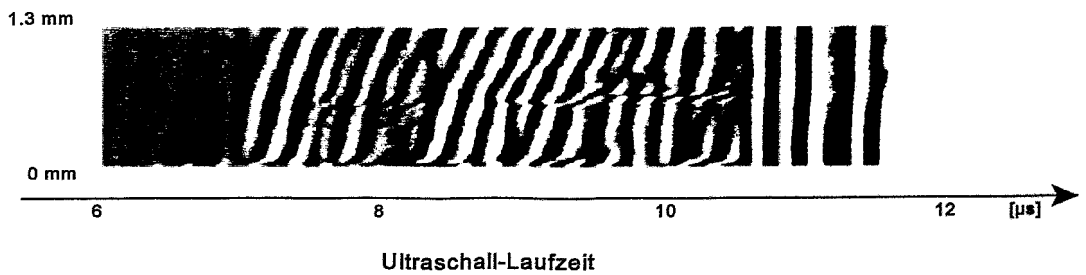
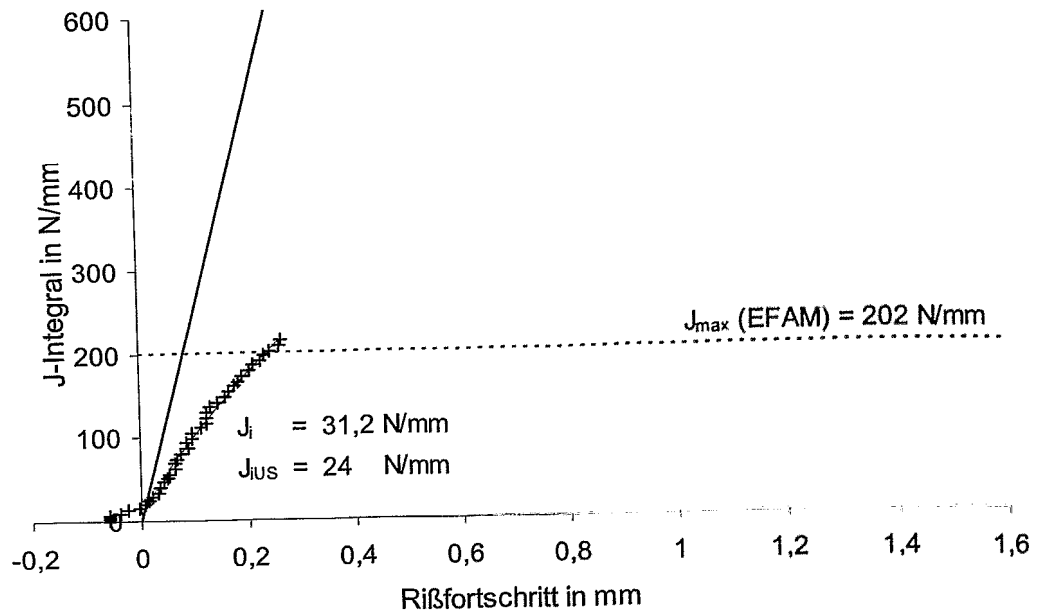


Abb. A-6. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 16_4

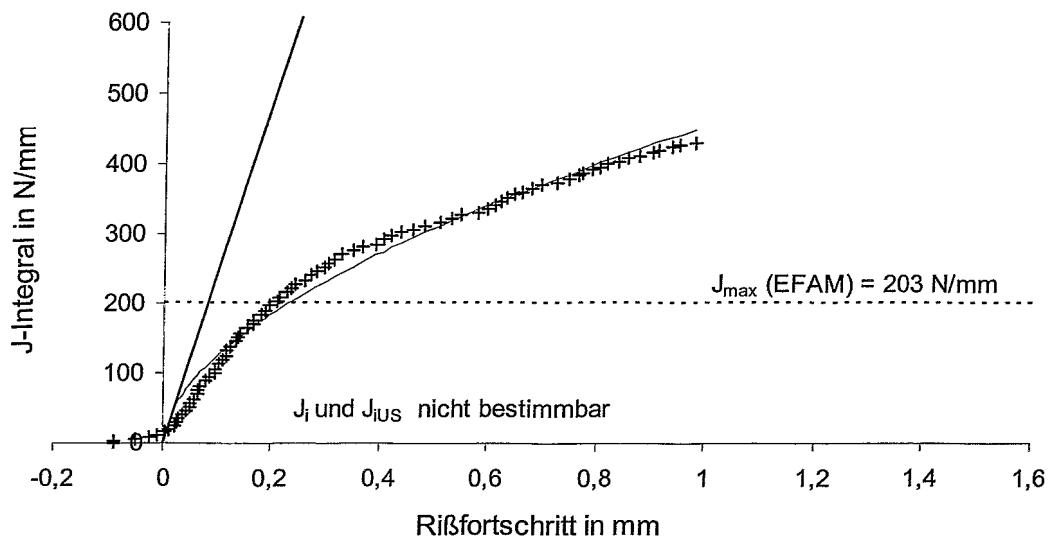


Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

0.84 mm



Abb. A-7. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 16_5



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

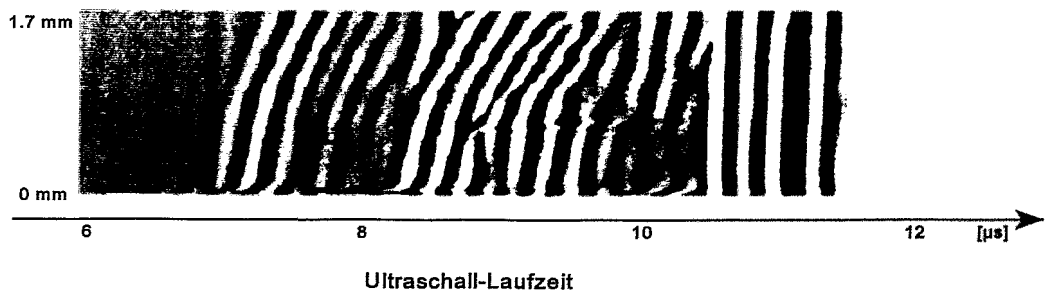
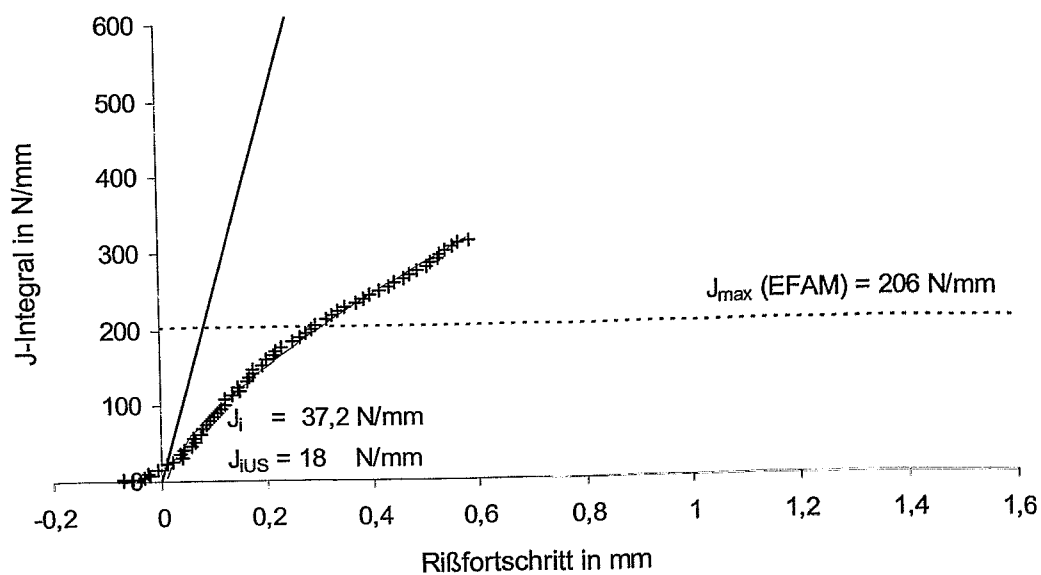


Abb. A-8. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 17_1



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

1,28 mm

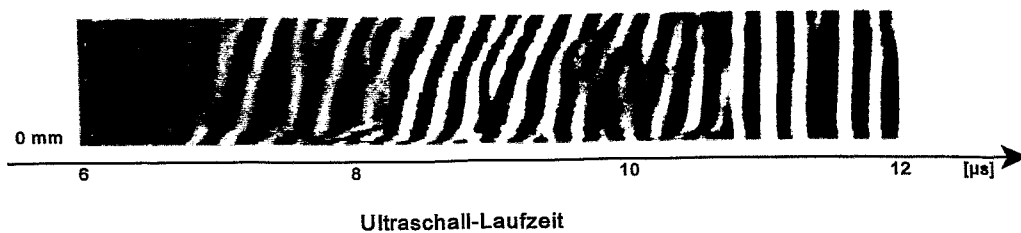
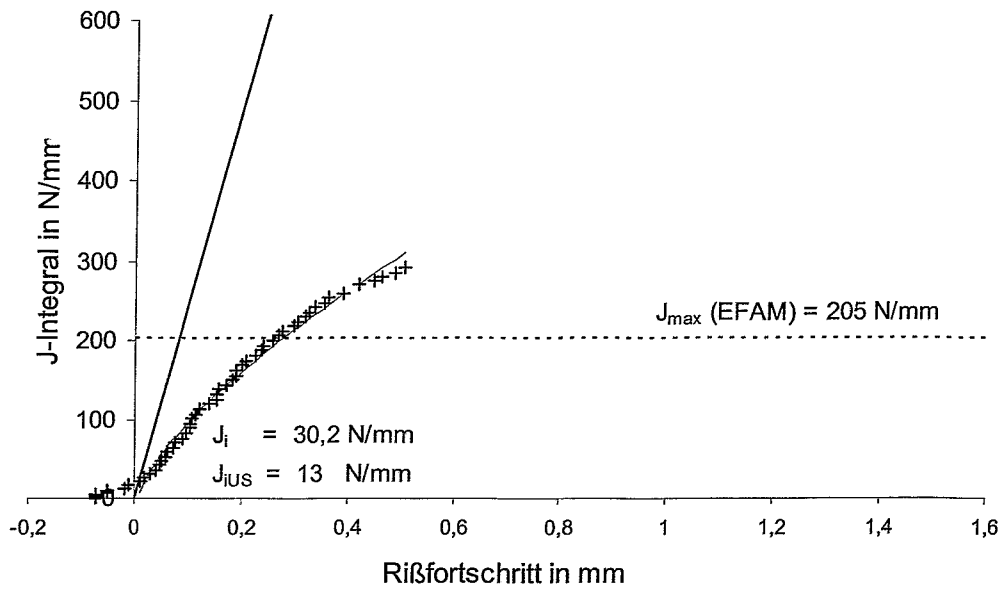


Abb. A-9. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 17_2



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

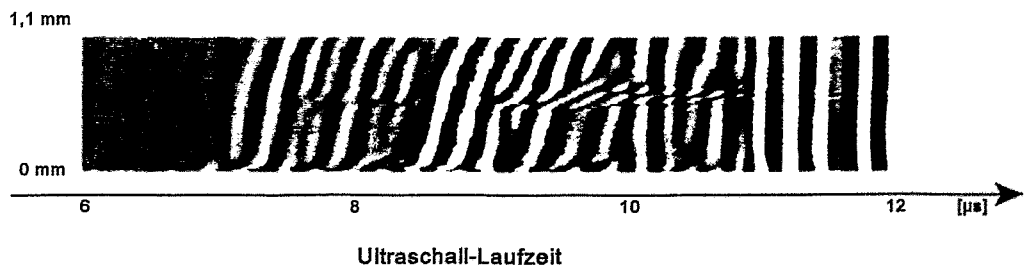
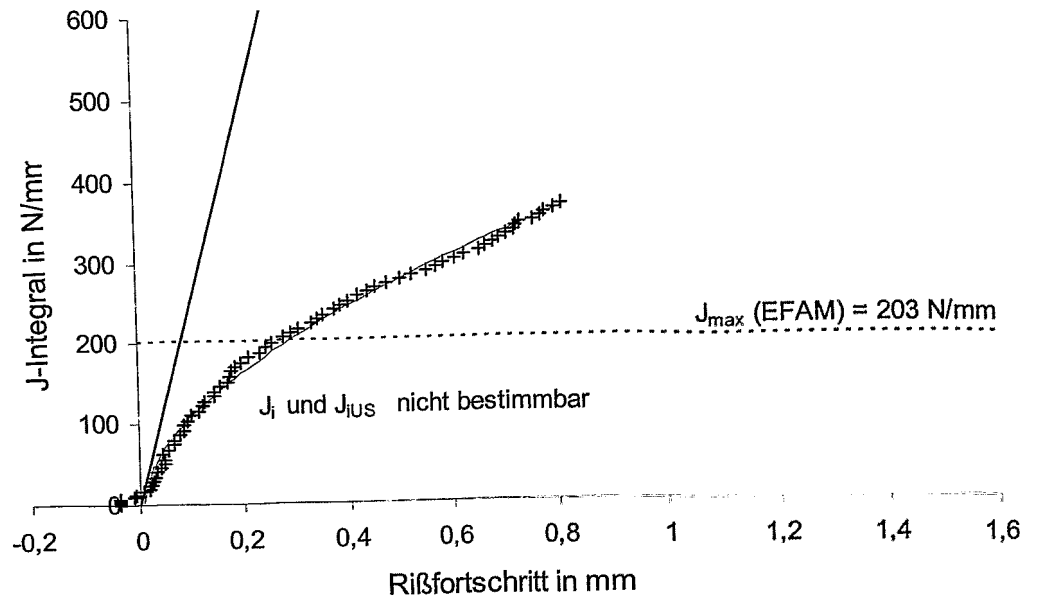


Abb. A-10. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 17_3



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

1,3 mm

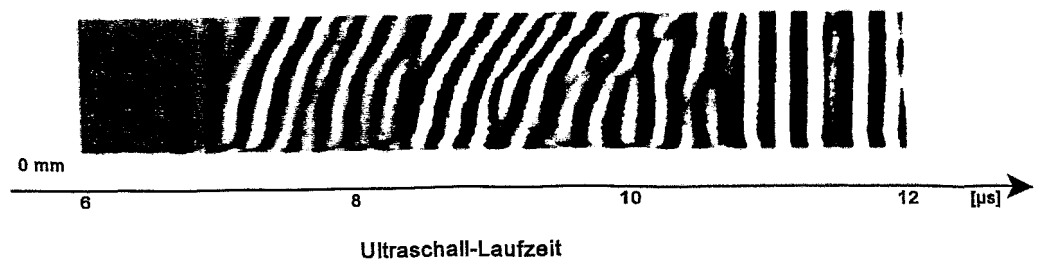
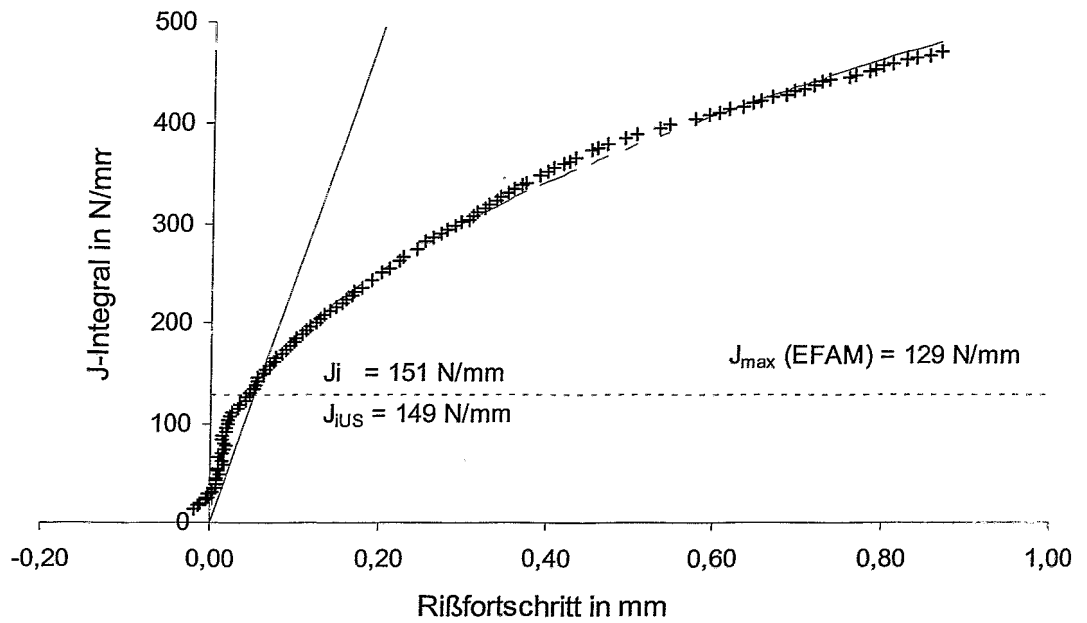


Abb. A-11. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 1, Versuch 17_4



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung
2,7 mm

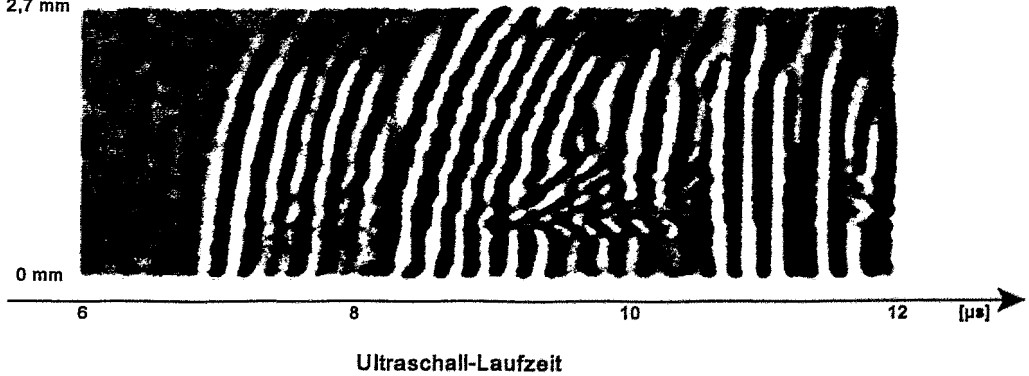
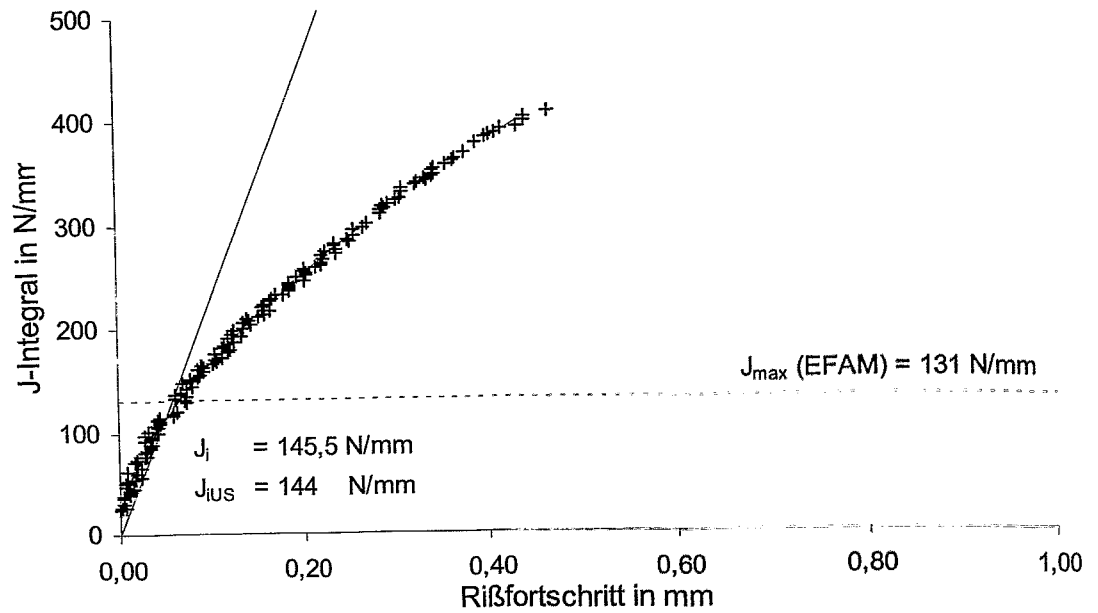


Abb. A-12. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 3, Versuch 35_4



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

2,1 mm

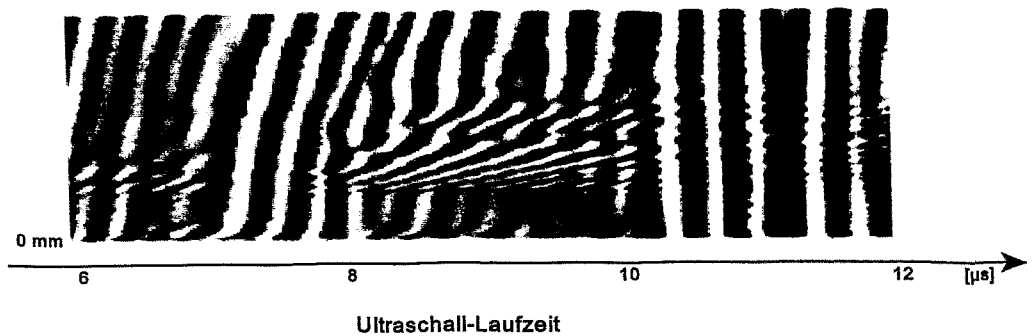
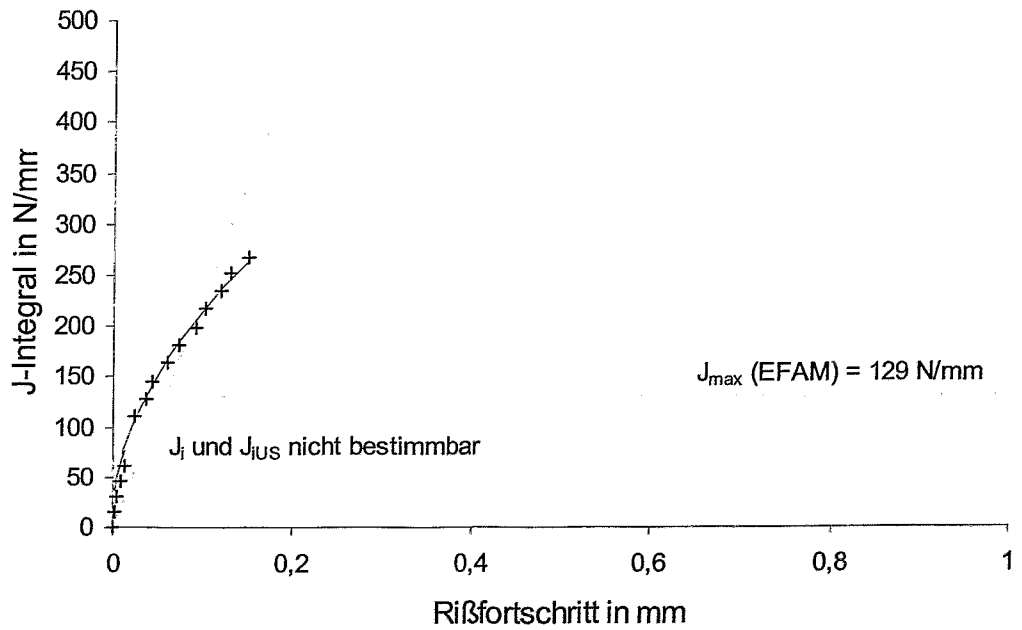


Abb. A-13. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 3, Versuch 35_5



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung

1,3 mm

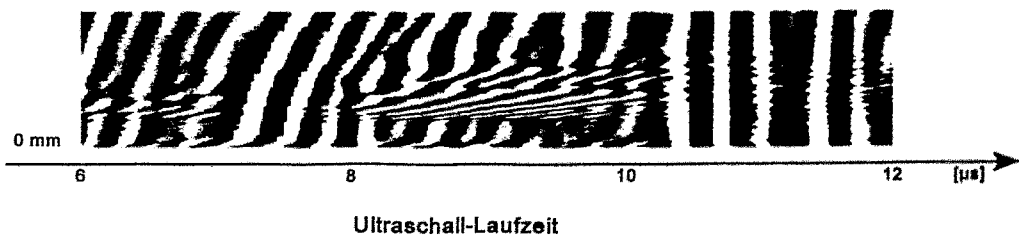
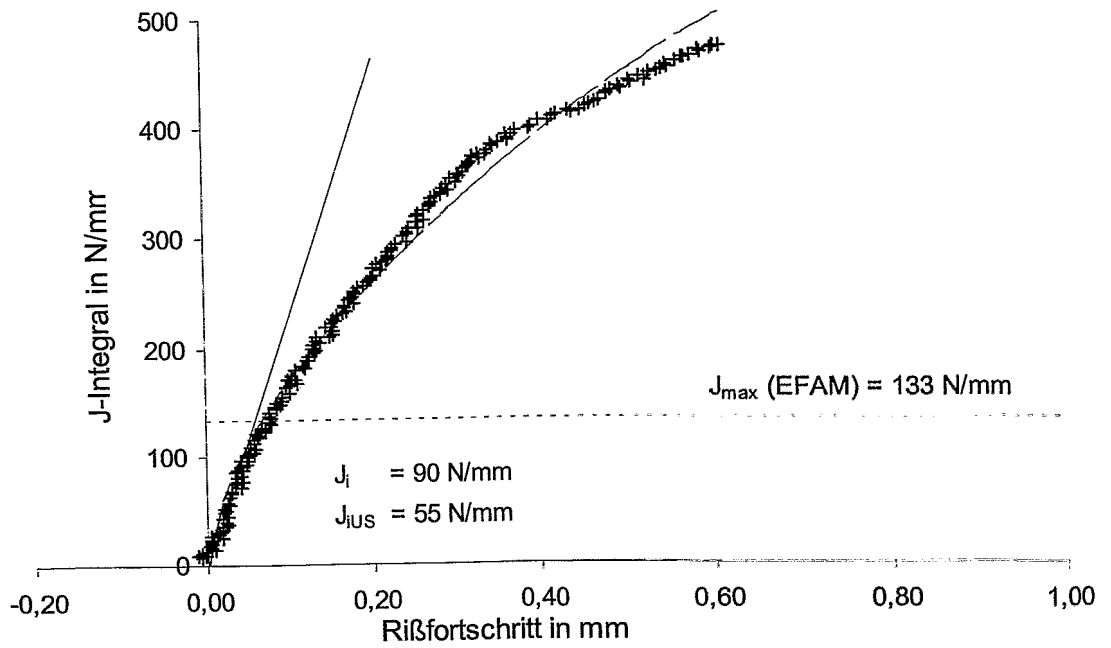


Abb. A-14. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 3, Versuch 36_1



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung
2,3 mm

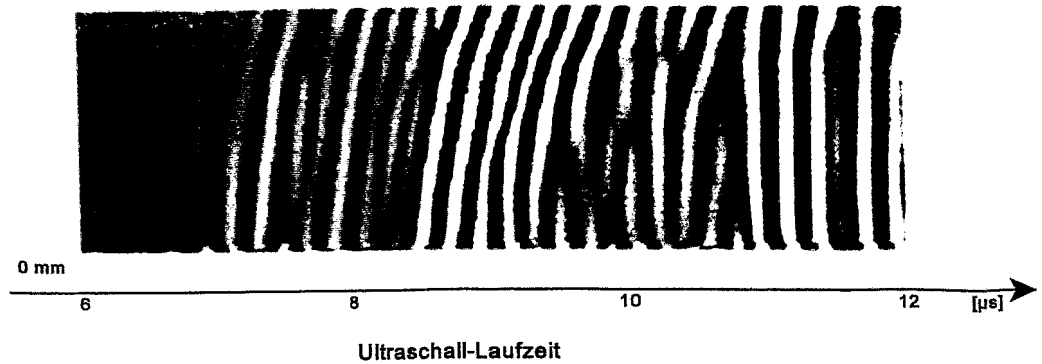
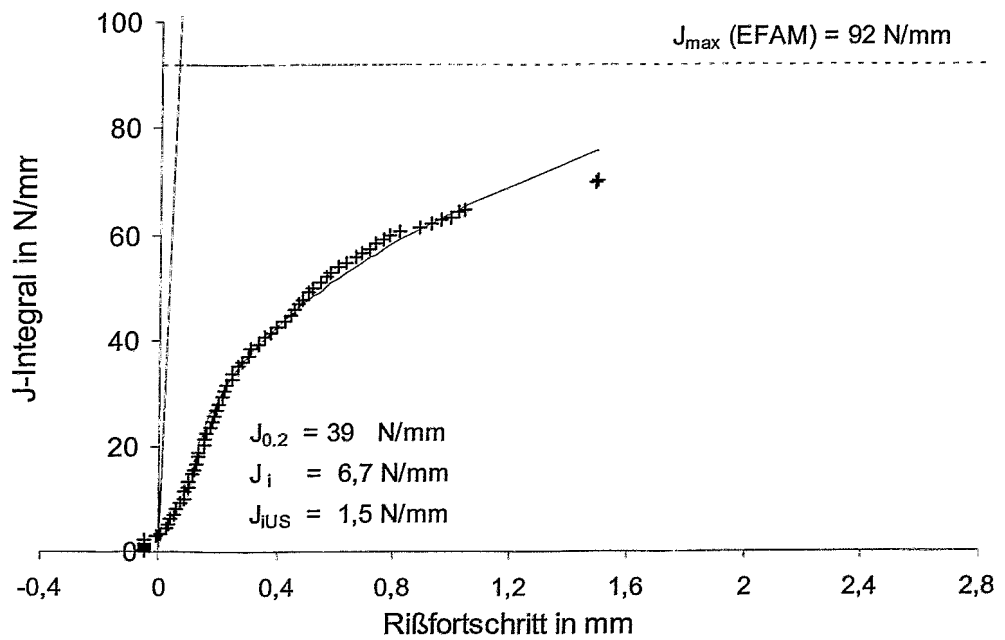


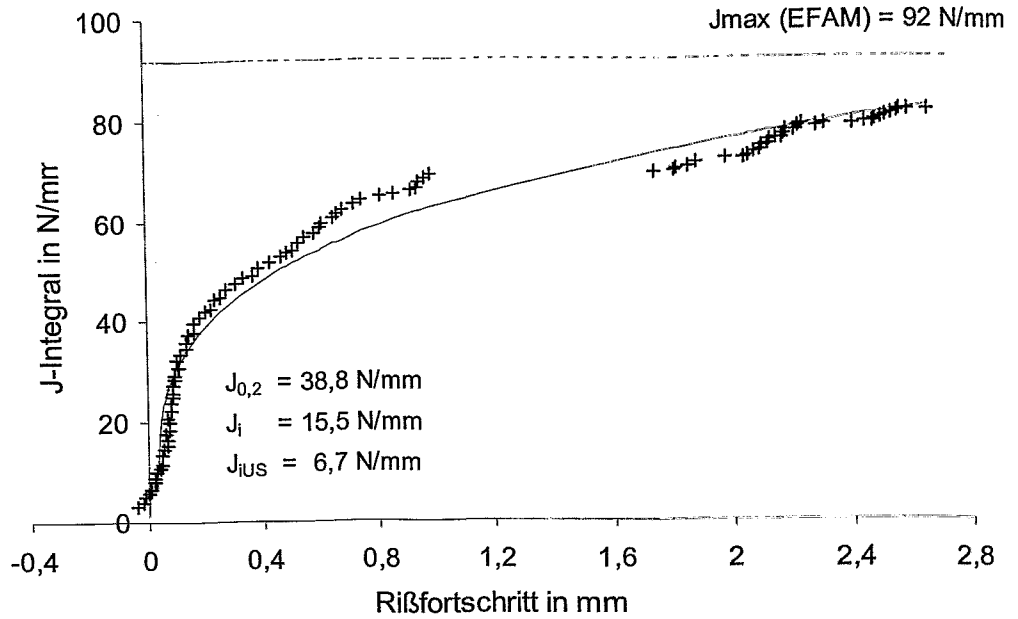
Abb. A-15. J-R-Kurve, 10CrMo9-10, Zustand 3, Versuch 36_2



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung



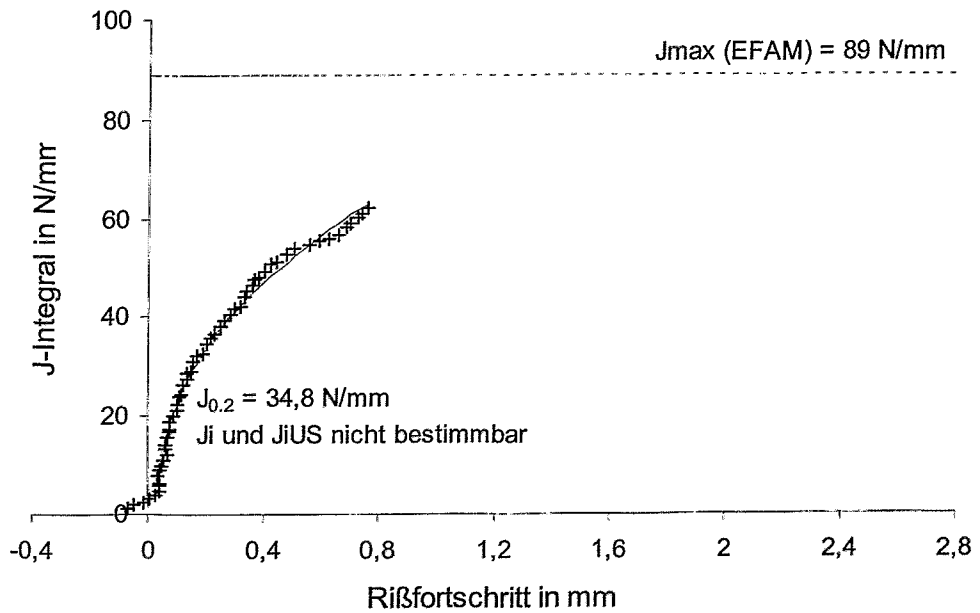
Abb. A-16. J-R-Kurve, EN-GJS-400-24C, Versuch G1



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung



Abb. A-17. J-R-Kurve, EN-GJS-400-24C, Versuch G2



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

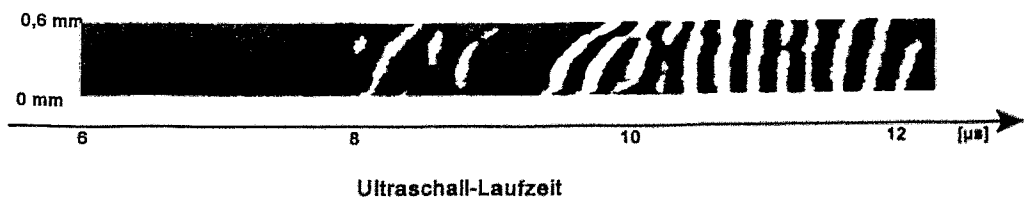
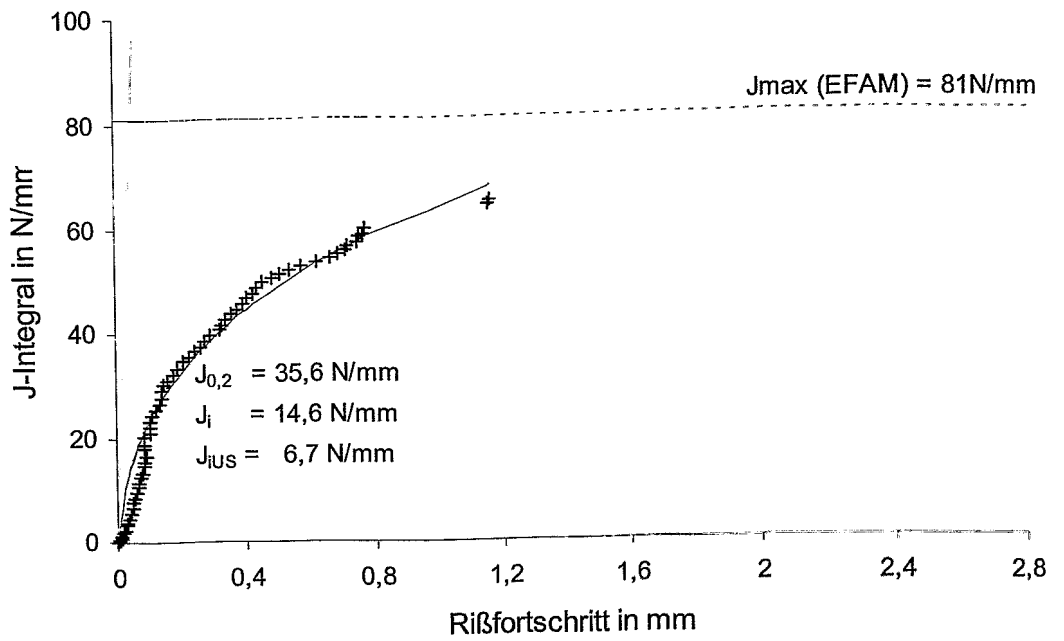


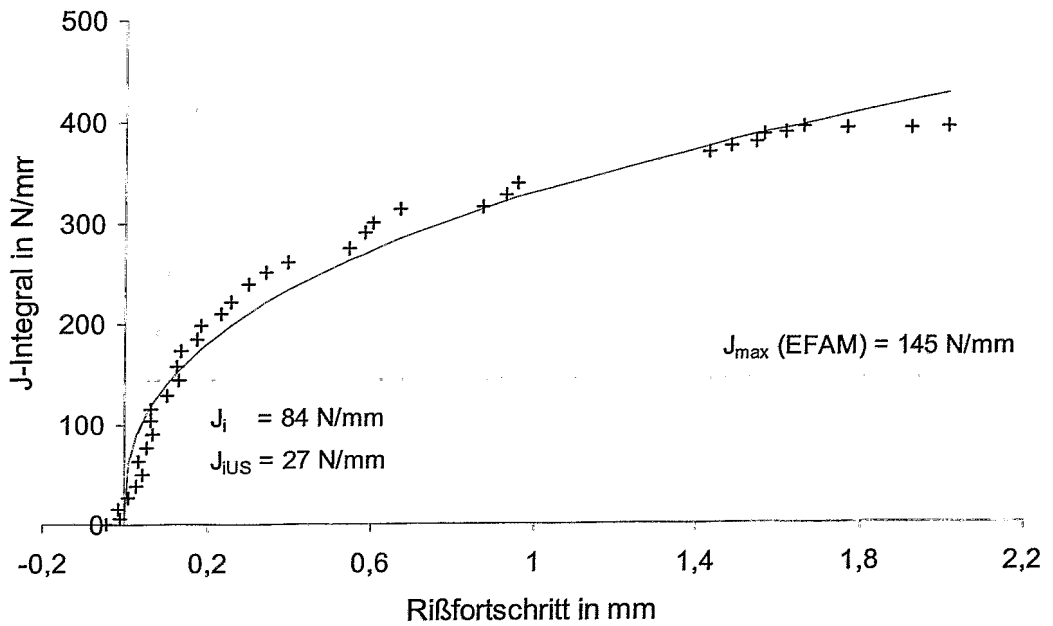
Abb. A-18. J-R-Kurve, EN-GJS-400-24C, Versuch G3



Probendurchbiegung
0.01 mm pro Messung



Abb. A-19. J-R-Kurve, EN-GJS-400-24C, Versuch G4



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

3,0 mm

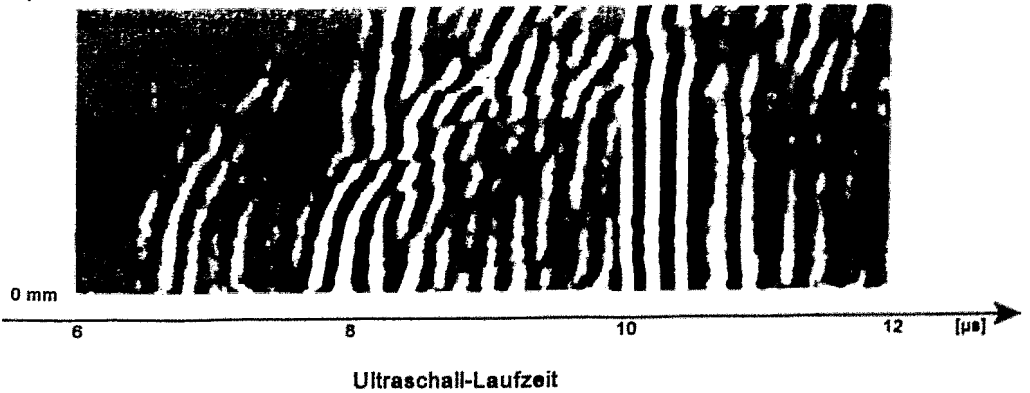
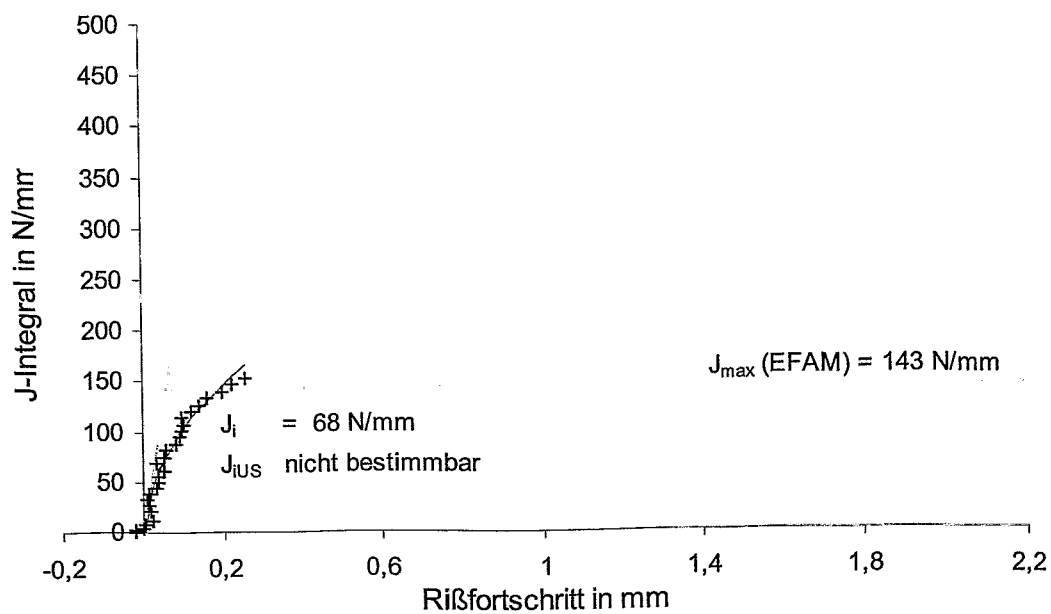


Abb. A-20. J-R-Kurve, S460N, Versuch S6



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

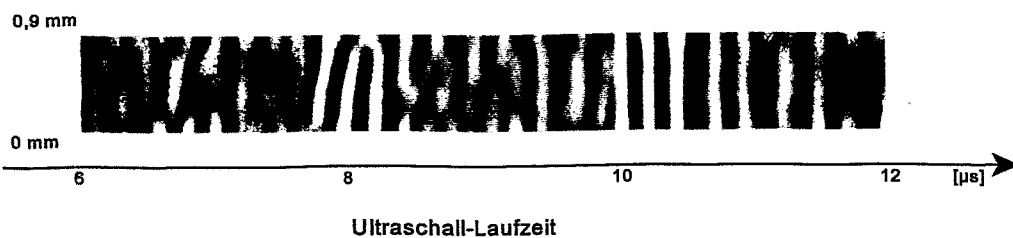
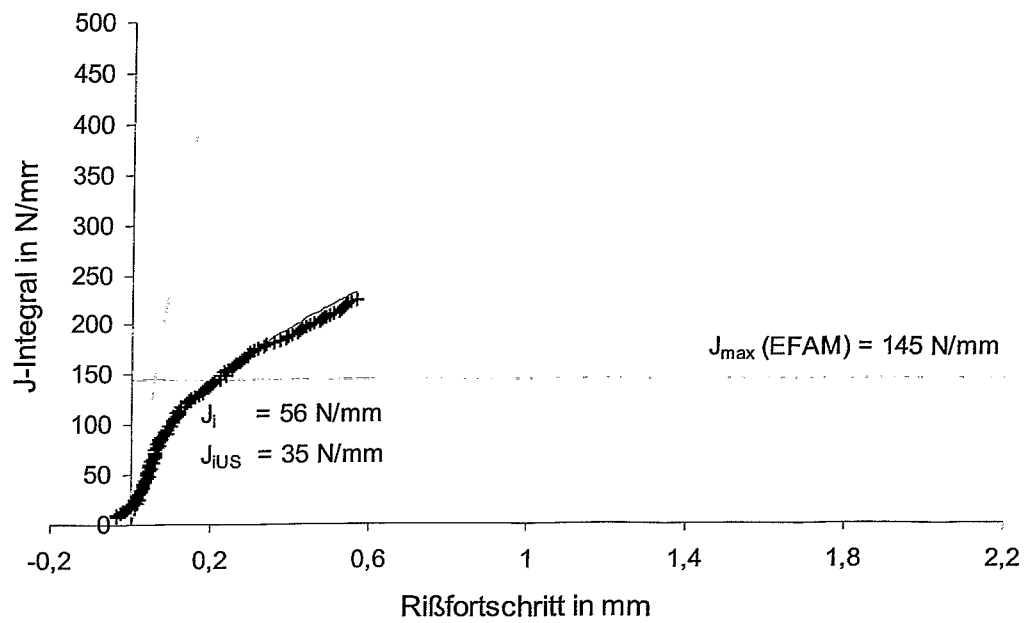


Abb. A-21. J-R-Kurve, S460N, Versuch S7



Probendurchbiegung
0,01 mm pro Messung

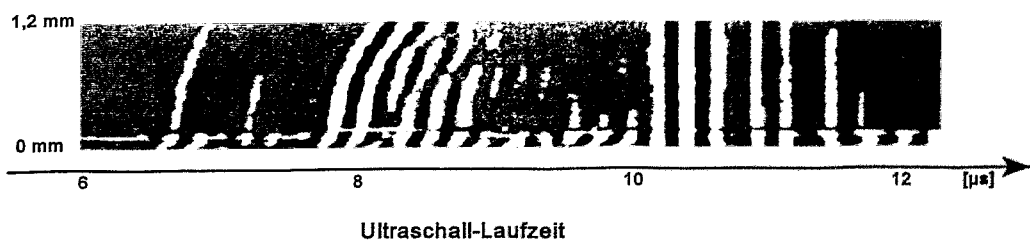


Abb. A-22. J-R-Kurve, S460N, Versuch S10