

FORSCHUNGSZENTRUM
ROSSENDORF e.V.

FZR

Archiv Ex.

FZR-177

April 1997

U. Bergmann und F. Bergner

Mathematisch-numerische Modellierung der
Ultraschallstreuung an oberflächenverbundenen
Rissen mit dem EFIT-Code

Forschungszentrum Rossendorf e.V.

Postfach 51 01 19 · D-01314 Dresden

Bundesrepublik Deutschland

Telefon (0351) 260 2766

Telefax (0351) 260 2205

E-Mail U.Bergmann@fz-rossendorf.de

Mathematisch-numerische Modellierung der Ultraschallstreuung an oberflächenverbundenen Rissen mit dem EFIT-Code

Ute Bergmann, Frank Bergner

Diesen Bericht haben die Autoren im Rahmen eines von der Deutschen Akademie der Naturforscher LEOPOLDINA unterstützten Forschungsvorhabens angefertigt. Die Autoren danken der LEOPOLDINA für die Förderung der Arbeit.

Zusammenfassung

Ein im Forschungszentrum Rossendorf entwickeltes Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren zur Messung von stabilem Rißwachstum wurde durch Simulationsrechnungen analysiert. Das Meßverfahren beruht auf der wiederholten Messung der Laufzeit eines an der Rißfront gebeugten Ultraschallimpulses während der quasistatischen Belastung einer einseitig angerissenen stabförmigen Probe in Dreipunktbiegung. Gegenstand der Simulationen waren die Erzeugung des Ultraschallimpulses, die Schallfeldausbreitung und die Signalbildung im Empfangswandler mit Hilfe der Elastodynamischen-Finiten-Integrations-Technik. Den aufeinanderfolgenden Phasen des Dreipunkt-Biegeversuches wurde durch Einbeziehung von zunehmender Rißlänge und Probendurchbiegung, Rißabstumpfung und Materialschädigung Rechnung getragen. In den 2D-Simulationen wurden Probengeometrie, Rißlänge sowie die Charakteristik der Ultraschallwandler berücksichtigt. Die Simulationsrechnungen ergaben folgende Ergebnisse:

- Die Natur der empfangenen Meßsignale und die Entstehung jedes einzelnen angeregten Echos wurden vollständig aufgeklärt. Es konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden, daß es sich bei dem zur Laufzeitmessung herangezogenen Meßsignal tatsächlich um das an der Rißspitze gebeugte Transversalwellenecho handelt.
- Durch Variation der Versuchsparameter (Wellenmode, Aperturfläche, Wandlerposition und Meßfrequenz) in den Simulationsrechnungen konnten Informationen über eine mögliche Optimierung der Meßanordnung zur Erhöhung ihrer Meßgenauigkeit und ihres Aussagegehaltes gewonnen werden.
- Insgesamt bestätigen die Simulationen die gute Eignung des entwickelten Meßverfahrens zu Rißfortschrittmessungen an Kleinproben aus duktilem Material.

Abstract

An ultrasonic time-of-flight diffraction method for measuring stable crack growth in a three point bending specimen was analyzed by simulations of the wave field evolution in the test specimen.

To calculate the actual crack length from the experimental measured time of flight of a crack tip diffracted ultrasound pulse the echo trains were successively measured during the whole bending test. The simulations deal with the generation and evolution of the ultrasound field in the specimen and with the design of the received signal. The simulations took into account the actual test geometry, the crack growth process, the blunted crack tip and the process of bending.

With these simulations all individual received echoes are reproduced and interpreted. The echo, qualified for measuring the time of flight is undoubtedly the transverse wave diffracted on the crack tip. In order to optimize the test method and to increase the accuracy of measurements during the simulations parameters like probe position, wave mode, measuring frequency and length of aperture of the probes were separately varied. From the comparison between the simulations and the experimental measurements it can be concluded, that the developed method is well suited for measuring stable crack growth in small specimens made from ductile material.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung

1. Einleitung	1
2. Experimentelle Situation	1
3. Die EFIT-Simulation der Schwellenausbreitung	2
3.1 Der EFIT-Code	2
3.2 Prinzip der Schwellenausbreitung	2
3.3 Simulation der Schwellenausbreitung in einer Biegeprobe ..	3
3.4 Simulation der Echobildung im Empfangsfall	4
4. Simulation des Rißfortschritts	5
5. Simulation der Probendurchbiegung	6
6. Detektierbarkeit von Rißinitiierungsprozessen	8
7. Modifizierung der Versuchsanordnung	8
7.1 Anregung von Oberflächenwellen	8
7.2 Anregung von Longitudinalwellen	9
7.3 Modifizierung der Prüfkopfanordnung	9
8. Schlußfolgerungen	10
Literatur	11
Abbildungsverzeichnis	12
Abbildungen	

1. Einleitung

In vorangegangenen Arbeiten wurde ein im Forschungszentrum Rossendorf entwickeltes Ultraschallverfahren zur Messung des duktilen Rißfortschritts bei quasistatischer Dreipunktbiegung vorgestellt [1,2]. Dabei wird aus der gemessenen Laufzeit eines an der Rißspitze gebeugten Ultraschallimpulses auf die aktuelle Rißlänge geschlossen. Dieses Verfahren setzt voraus, daß das Rißspitzenecho aus einer aufgezeichneten Echofolge separiert werden kann. In [1,2] wurde das Rißspitzenecho einer eingeschallten Transversalwelle empirisch identifiziert und zur Rißfortschrittsmessung herangezogen. Trotz der guten Übereinstimmung mit den fraktografisch ermittelten Rißlängen bestand keine endgültige Sicherheit über Entstehung und Veränderung aller empfangenen Echosignale.

Die Elastodynamische Finite-Integrations-Technik (EFIT) ist ein Simulationsprogramm, das zur Analyse der Ausbreitung elastischer Wellen entwickelt worden ist [3,4]. Unter Berücksichtigung der gegebenen experimentellen Situation wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, um

- 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 die empfangenen Echos zu interpretieren und
- den Einfluß von Probendurchbiegung und Rißausbreitung auf die Echofolge zu erkennen.

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) ermöglichen eine Erhöhung des Aussagegehaltes und der Meßgenauigkeit.

2. Experimentelle Situation

Mit dem Ultraschall-Laufzeitverfahren wird in einem stabförmigen Testkörper die Ausbreitung eines einseitig eingebrachten Anrisses unter monotoner Lasteinwirkung verfolgt. Mittels einer Werkstoffprüfmaschine wird die Biegeprobe verformt. Dabei wird die Last und die Lastangriffspunktverschiebung entlang der Kraftwirkungslinie gemessen. Zur Rißlängenmessung wurde folgende Meßanordnung entwickelt. Sender- und Empfängerprüfkopf (45°-Transversalwellenprüfköpfe) sind jeweils links und rechts mit "Blickrichtung" auf die Rißspitze fest angebracht. In Abhängigkeit von der Belastung wird im Sendeprüfkopf ein Signal ausgelöst, das eine Schallwellenfront im Material erzeugt, die sich in der Probe ausbreitet und nach Umlaufen der Rißspitze vom Empfängerprüfkopf registriert wird. Die Anordnung der Sensoren beiderseits der Rißufer gewährleistet, daß bereits das erste am Empfängerprüfkopf eintreffende Echo Informationen über die Rißspitze enthält und von den folgenden Echos nicht verfälscht wird. Aus der Laufzeit des als Rißspitzensignal identifizierten Echos wird schließlich auf den aktuellen Rißfortschritt geschlossen.

In Abb. 1 ist der beschriebene Versuch schematisch dargestellt. Experimentell ermittelte Meßergebnisse in verschiedenen Versuchsstadien veranschaulichen das Prinzip der Rißlängenmessung mit dem Ultraschall-Laufzeitverfahren. Die erste Messung wurde zum Zeitpunkt des Rißstarts ausgelöst. Die untere Echofolge ist

charakteristisch für die Rißwachstumsphase. Tabelle 1 enthält einige experimentelle Daten, die in die Simulationsrechnungen eingehen.

Abmessungen der Biegeprobe	10 x 10 x 55 mm ³
Testmaterial	ferritisch-perlitischer Stahl
Longitudinalwellengeschwindigkeit	5900 m/s
Transversalwellengeschwindigkeit	3230 m/s
Oberflächenwellengeschwindigkeit	2987 m/s

Tab. 1 Zur Simulation benötigte Probenparameter

3. Die EFIT-Simulation der Schallwellenausbreitung

3.1 Der EFIT-Code

Der numerische Modellierungscode EFIT ist ein Werkzeug zur quantitativen Modellierung der Anregung, Ausbreitung und Streuung von Ultraschallwellen. In diesem Programmcode wird die Ausbreitung elastischer Wellenfelder auf der Grundlage der elastodynamischen Bewegungsgleichungen (Hookesches Gesetz und Newton-Cauchy-Gleichung) beschrieben und unter Nutzung der Finiten Integrationstechnik numerisch gelöst (3,4). 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.

Auf der Basis der Diskretisierung der linearen akustischen Grundgleichungen in Integralform wurde der AFIT-Code (Akustischen Finite-Integrations-Technik) entwickelt. Mit diesem Werkzeug läßt sich die Ultraschallausbreitung in scherspannungsfreien Medien untersuchen, in denen nur eine Volumenschallwellenart angeregt werden kann.

3.2 Prinzip der Schallwellenausbreitung

Um das prinzipielle Wellenausbreitungsverhalten in der Modellprobe zu verstehen, wurde die Aufgabe zuerst mit AFIT untersucht. Mit dem AFIT-Code läßt sich die

Schallwellenausbreitung ausschließlich unter Berücksichtigung von Reflexions- und Beugungsvorgängen an Grenzflächen betrachten, da bei dieser Methode mögliche Wellentypumwandlungen außerachtgelassen werden. In Abb. 2 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. 2 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. 2 zum Zeitpunkt $t = 1\mu\text{s}$ nach der Schallwellenanregung läßt sich die einfallende Welle mit ihrem Intensitätsmaximum unter 45° erkennen. Der Einfallswinkel 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. 2, $t = 3\mu\text{s}$) 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 im Bild linksseitigen Probenhälfte können nun unbeachtet bleiben, da sie die Signalbildung im Empfänger nicht beeinflussen. In Abb. 2, $t = 5\mu\text{s}$ erreicht die kreisförmige Welle, ausgehend von der Rißspitze, die Auflagefläche des Empfängerprüfkopfes. Ihr folgt die aus dem Eingangsimpuls entstandene rückwandreflektierte Welle, die die Prüfkopfapertur in Abb. 2 zwischen $t = 7$ und $t = 8\mu\text{s}$ erreicht. Eine rückwandreflektierte Welle, die aus der Kreiswelle der Rißspitze entstand, folgt unmittelbar.

3.3 Simulation der Schallwellenausbreitung in einer Biegeprobe

Im praktischen Ultraschallexperiment findet durch die Wechselwirkung mit Grenzflächen ein komplizierterer Wellenausbreitungsprozeß statt. Neben dem Effekt der Schallbeugung und Reflexion werden unter bestimmten Bedingungen Wellenartumwandlungen (Modekonversionen) hervorgerufen. Das heißt, in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel auf eine Grenzfläche kann sich eine Schallwellenart teilweise in eine andere umwandeln. Dadurch spaltet sich das in 3.2 beschriebene charakteristische Ausbreitungsverhalten in mehrere Teilprozesse auf, was zu einer Vielzahl von weiteren Reflexions- und Schallbeugungsvorgängen und folglich zu Wellenüberlagerungen führt. Mit dem EFIT-Code soll hier der Entstehungsprozeß jedes einzelnen Wellenzugs verfolgt werden, denn auch modekonvertierte Sekundärechos können großen Einfluß auf das Meßergebnis besitzen.

Der vollständige Schallausbreitungsvorgang ist in Abb. 3 veranschaulicht. Die Aufnahmen wurden über den Zeitbereich von 2 bis $9\mu\text{s}$ in Abständen von $1\mu\text{s}$ errechnet. In Abb. 3 zum Zeitpunkt $2\mu\text{s}$ ist die bereits beschriebene Transversalwelle

gut zu erkennen. Durch Bildung kreisförmiger L-Wellenfronten an den Aperturkanten des Sendeprüfkopfes entsteht eine Longitudinalwelle (L-Welle), die zum Zeitpunkt von $3 \mu\text{s}$ die Rißspitze bereits erreicht. Aus den unterschiedlichen Wellenlängen von L-Welle und Transversalwelle (T-Welle) resultiert der unterschiedliche Abstand der Wellenberge und Täler innerhalb der Wellenfronten. Die L-Welle erscheint im Bild als die breitere Wellenfront. Diese 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. Besser deutlich wird der Prozeß der Modekonversion in Abb. 3, $t = 4 \mu\text{s}$, wenn sich die im Prüfkopf angeregte T-Welle mit entsprechend hoher Schallintensität an der Rißspitze in eine L-Welle und eine T-Welle aufspaltet. Diese kreisförmige L-Welle erreicht aufgrund ihrer höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit die Kante der Auflagefläche des Empfängerprüfkopfes (rechtsseitig des Risses angebracht) zum Zeitpunkt etwa bei $t = 5 \mu\text{s}$, die T-Welle trifft erst bei etwa $t = 6 \mu\text{s}$ ein. In Abb. 3, $t = 5 \mu\text{s}$ sind von der Rückwand ausgehende L- und T-Wellen zu erkennen. Sie sind Ergebnis eines Reflexionsvorganges der aus der einfallenden T-Welle entstandenen kreisförmigen L-Welle an der Probenrückwand. In Abb. 3 zum Zeitpunkt $t = 6 \mu\text{s}$ sind die aus der Rückwandreflexion der kreisförmigen T-Welle entstandenen L- und T-Wellen zu erkennen. Der Teil der T-Welle, der nicht an der Rißspitze gebeugt worden ist, wird an der Rückwand der Probe vollständig reflektiert. Diese Wellenfront überlagert sich in diesem Beispiel teils mit der rückwandreflektierten T-Welle, die aus der T-Kreiswelle entstand.

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. 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 L-Welle und die aus der L-Kreiswelle reflektierten Rückwandechos.

3.4 Simulation der 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 Daten des anliegenden Schalldruckes werden in den Knotenpunkten des EFIT-Gitters im Bereich der Empfängerapertur zu jedem Zeitpunkt aufgezeichnet und in einem sogenannten HF-Bild aufgetragen (Bild 4). 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. 4). Um eine Echofolge zu modellieren, wie sie im Experiment gemessen werden kann, werden die Daten des HF-Schemas unter Berücksichtigung

dieser Zeitverschiebung über die Aperturcoordinate integriert. Im Ergebnis erhält man einen simulierten Amplituden-Zeit-Verlauf (Abb. 5). In Abb. 5 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 Rißebebe 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. Die Entstehung der wesentlichen Echos ist in der Legende zu Abb. 4 erklärt.

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 extrem geringe Amplituden und sind in Abb. 5 nicht sichtbar. 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 dieser gewählten Funktionen zeigt Abb. 6.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, daß eine Interpretation der empfangenen Echofolgen auf rein experimentellem Wege kaum möglich wäre. Aufgrund des komplizierten Prozesses der Wellenausbreitung in dieser Testgeometrie ist es vorteilhaft, zu Laufzeitmessungen das zeitlich erste Echo heranzuziehen, da Überlagerungen des Nutzsignals durch Sekundärechos zu Laufzeitmeßfehlern führen können. Das rißspitzengebeugte Transversalwellenecho ist das zeitlich zuerst eintreffende Echo mit großer Amplitude. Es wird nur in geringem Maße durch Sekundärechos überlagert und ist deshalb für Rißfortschrittsmessungen in dieser Prüfanordnung gut geeignet. Das Rückwandecho trägt keine Information über die Position der Rißspitze.

4. Simulation des Rißfortschritts

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit des Rißfortschrittsmeßprinzipes auf der Grundlage der rißspitzengebeugten Transversalwelle werden Rechnungen für Modellkörper gleicher Kontur mit unterschiedlichen Rißlängen bei Vernachlässigung der Probendurchbiegung durchgeführt. In Abb. 7 sind die Simulationsergebnisse für Echofolgen bei Rißlängen von 5 mm und 6 mm gegenübergestellt. Die Echos T/L bis T/T/L sind zu längeren Laufzeiten hin verschoben. Deutlicher 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 und simulierter Ergebnisse von $\Delta t = 0,43 \mu s$.

Es ist zu erwarten, daß das T-Wellenecho (T/T) mit fortschreitendem Riß durch Echos mit anderen Laufwegen überlagert wird. Ab einem bestimmten Rißfortschritt kann sich die zeitliche Folge der Wellenzüge so überlagern, daß das T-Wellenecho nicht mehr eindeutig separierbar ist und damit nicht mehr zur Messung von Rißfortschritt herangezogen werden kann. In diesem Fall erreicht das durch die am Riß gebeugte L-Welle erzeugte Rückwandecho annähernd zeitgleich mit der gesuchten T-Welle den Empfänger und interferiert mit diesem.

Die Simulationsergebnisse bestätigen prinzipiell die Anwendbarkeit des Meßprinzipes zur Rißfortschrittsmessung. Die Methode versagt bei sehr großem Rißwachstum (ca. 70% des Probenquerschnittes im vorliegenden Fall).

Die Verschiebung der Prüfköpfe auf der Probenoberfläche symmetrisch zur Rißebeine beeinflusst entscheidend die Abfolge der Echobildung. Der Sendeprüfkopf muß so angebracht sein, daß die einfallende T-Welle die Rißspitze während des gesamten Rißausbreitungsprozesses direkt anschallt. Wenn durch die einfallende T-Welle nur ein primäres Rückwandecho angeregt wird und der Riß während des Biegeprozesses in den Einschallbereich des Prüfkopfes erst hineinwächst, führt fortschreitendes Rißwachstum zu einer Echoüberlagerung von rißspitzengebeugten und primär rückwandreflektierten Signalen und damit zu einer Änderung der bekannten zeitlichen Reihenfolge in der empfangenen Echofolge. Dann ist mit dem untersuchten Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren keine eindeutige Interpretation der Echosignale möglich.

Aus Abb. 7 geht hervor, daß sich auch die Amplitudenverhältnisse der Echos ändern. Prinzipiell können die Amplitudenveränderungen auf die Überlagerung mehrerer Echos und auf die Veränderung der Winkelverhältnisse zwischen Prüfkopf und Riß zurückgeführt werden. Diese Amplitudendynamik wird im nächsten Abschnitt aus der Sicht des Einflusses der Probendurchbiegung diskutiert.

5. Simulation der Probendurchbiegung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde Rißfortschritt ohne Biegung simuliert, im Experiment wird der Rißfortschritt jedoch erst durch Biegung hervorgerufen. Diese Probendurchbiegung kann großen Einfluß auf die Echofolge haben, da das Drehzentrum der Probe nicht mit der Rißspitze übereinstimmt und dadurch die Winkelverhältnisse zwischen Rißspitze und Schallwandlern einer ständigen Veränderung unterliegen.

Zur Beschreibung geometrischer Veränderungen einer Probe während der Durchbiegung im Dreipunkt-Biege-Versuch wurde ein Modell herangezogen, das den Prozeß der Drehpunktverschiebung als Drehung zweier sich symmetrisch verhaltender Probenhälften beschreibt. Die Probe dreht sich während des Biegevorganges nicht um einen konstanten Drehpunkt, sondern um ein der Rißspitze vorgelagertes Rotationszentrum, dessen Lage sich in Abhängigkeit von der verbleibenden Restligamentgröße der angerissenen Probe während der Rißausbreitung verschiebt. Der Abstand des Rotationszentrums zur Rißspitze kann durch einen Ausdruck der Form $r(W-a)$ beschrieben werden [5,6], wobei W die Probenbreite und a die Rißlänge bezeichnet und r ein konstanter Zahlenfaktor ist. Über die Größe des Zahlenfaktors werden unterschiedliche Angaben gemacht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird $r = 0.4$ verwandt [5].

Es ist schematisch untersucht worden, wie eine relative Positionsänderung der

Schallwandler zum rißbehafteten Materialbereich die Entwicklung des Echobildes prägt. Der Einfluß des Biegeprozesses wird in drei Stadien simuliert, die 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 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. 8). Der Vergleich dieser Simulationsergebnisse mit experimentell ermittelten Ergebnissen in Abb. 8 läßt einen nicht geringen Einfluß der Probenrotation auf die Laufzeit und Amplitudendynamik der Echos erkennen. Für Ultraschall-Laufzeitmessungen des Rißfortschritts hat die Probenrotation eine entscheidende Bedeutung. Durch diese 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. 8 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. In [7] wurde auf analytischem Weg gezeigt, wie dieser Fehler eliminiert und aus der gemessenen Laufzeit auf die Rißlänge geschlossen wird.

Die Probenrotation während des Biegeversuches wirkt sich auch auf die Amplitudendynamik der Echos, besonders des Rißspitzenechos, aus. Mit zunehmender Probendurchbiegung und mit eintretendem Rißfortschritt ändern sich jeweils die Winkel, unter denen die einfallende Welle die Rißspitze trifft und die rißspitzengebeugte Welle die Aperturfläche des Empfängerprüfkopfes erreicht. Unterschiedliche Einfallswinkel und Detektionswinkel können zu Veränderungen der Amplitudenhöhe und zu Phasenverschiebungen des rißspitzengebeugten Signals führen [8]. Im vorliegenden Fall (Abb. 8) führt dieses Verhalten zu einer Zunahme der Amplitudenhöhe des T/T-Wellenechos. Bereits die Änderung des Einfallswinkels der Wellenfronten in den Empfängerprüfkopf beeinflusst die Signalbildung. Wenn eine Wellenfront frontal auf die Auflagefläche des Prüfkopfes trifft, erzeugt sie ein kurzzeitiges Signal hoher Intensität. Wenn sie jedoch nahezu parallel zum Empfänger verläuft, erzeugt sie einen zeitlich ausgedehnten Peak geringerer Amplitude. Der Einfluß der Probendurchbiegung auf die Amplitude des Meßsignals wird um so kleiner sein, je schmaler die Apertur des Empfängers ist. Diese Überlegungen müssen Berücksichtigung finden, wenn Amplitudenänderungen während des Biegeprozesses zu Aussagen über den Materialzustand vor der Rißspitze herangezogen werden sollen.

Die absolute Verschiebung der Laufzeiten der Echofolgen in Simulation und Experiment (Abb. 8) kommt zustande, da bauartspezifische Prüfkopfcharakteristika eine Verlängerung des Schalllaufweges bedingen, die in der Simulation nicht berücksichtigt wird.

6. Detektierbarkeit von Rißinitierungsprozessen

Stabilem Rißwachstum ist der Prozeß der Rißinitiierung vorgelagert, der durch plastische Verformung, Porenbildung im Umfeld der Rißspitze und Rißspitzenabstumpfung vorhandener Anrisse charakterisiert ist. Raster-elektronenmikroskopische 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 Kerbes variiert:

- Haariß, $l = 5 \text{ mm}$, in der Modellierung wurden die Gitterbindungen zwischen den Rißufern gelöst,
- ein Haariß, $l = 5 \text{ mm}$, 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 Haariß und einem Haariß mit vorgelagerter Pore (Abb. 9). Danach steigt die Amplitude und Impulsbreite des T/T-Wellenechos bei Vorhandensein einer der Rißspitze vorgelagerten Pore im Vergleich zur Amplitude des Beugungssignales im homogenen Rißspitzengebiet. 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.

7. Modifizierung der Versuchsanordnung

Im folgenden werden ausgewählte Modifizierungen der Prüfanordnung besprochen, um Ansatzpunkte für die Optimierung des Meßverfahrens zu erhalten. Dabei wird die Eignung anderer Schallwellenmodi zur Rißinitiierungs- und Rißfortschrittsmessung untersucht und mögliche Veränderungen der Prüfanordnung diskutiert.

7.1 Anregung von Oberflächenwellen

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 [9]. 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 Wellenmodi 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 [9] gefundenen unerwartet großen Abweichungen zwischen fraktografisch gemessenem und mittels Ultraschall ermitteltem Rißfortschritt sein. Diese Rißdetektionsmöglichkeit scheint daher weniger geeignet, Rißwachstumsprozesse zu verfolgen [10], als die Anwendung rißspitzengebeugter Volumenwellen.

7.2 Anregung von Longitudinalwellen

Das T-Wellenecho wird mit fortschreitendem Rißwachstum ebenfalls durch weitere Wellenfronten überlagert, siehe Abschnitt 3.4. Die Anwendung von L-Wellen auf die Laufzeitmessung hat prinzipiell den Vorteil, daß die Meßgenauigkeit erhöht wird, da ein L-Wellenecho der Rißspitze unabhängig von der Rißlänge in zeitlicher Folge vor allen gebeugten und modekonvertierten Wellenfronten am Empfängerprüfkopf eintreffen muß und nicht durch sie beeinflusst werden kann. In den Rechnungen wurden die T-Wellenwinkelprüfköpfe durch zwei L-Wellen-Normalprüfköpfe ersetzt, so daß sich das Schallbündel parallel zur Rißebeine ausbreitet. Die Simulationsrechnung zeigt, daß die rißspitzengebeugte L-Welle zu schwach ist, um detektiert werden zu können. Bei einem geneigten Einschallwinkel (L-Wellen-Winkelprüfkopf) wird die Rißspitze mit 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 gute Eignung (Abb. 10).

7.3 Modifizierung der Prüfkopfanzordnung

Um weitere Ansatzpunkte zur Optimierung des Verfahrens zu erhalten, sind eine Reihe unterschiedlicher Meßanzordnungen modelliert worden. Diese Simulationen reduzieren den enormen experimentellen Aufwand, der sonst zur Erprobung neuer Prüfanordnungen nötig ist. Als besonders aussichtsreich kann die folgende Anordnung gelten. Die rückwandseitige Anbringung eines zusätzlichen Empfängerprüfkopfes auf der gleichen Seite der Rißebeine wie der Sendeprüfkopf ermöglicht den Empfang von rißspitzengebeugten Signalen und verhindert den Empfang der primären Transversalwelle und der durch sie entstehenden Oberflächenwellen. Diese Anordnung ist zur Rißlängenmessung weniger gut geeignet als die in Absatz 4 untersuchte Prüfanordnung. Jedoch können Veränderungen der Form des Rißgrundes vom Empfänger in dieser Position gut detektiert werden (Abb. 11). Es zeigte sich, daß abgerundete Rißspitzen zu einer wesentlich größeren Amplitudenauslenkung der rißspitzengebeugten T- und L-Wellen führen als Poren vor einem Rißspalt. Bei Rißwachstum dagegen verringert sich die Amplitudenhöhe dieser Echos deutlich. Dieses Ergebnis dient als Hinweis für eine Erweiterung der Prüfanordnung. Die Amplituden der so gemessenen Echofolgen können auf ihre Aussage über Rißinitiierungsprozesse hin ausgewertet und mit den Ergebnissen aus der Rißlängenbestimmung korreliert werden.

8. Schlußfolgerungen

Mittels EFIT-Simulationen wurde ein neuentwickeltes Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren zur Rißlängenmessung untersucht. Die Simulationsrechnungen zeigen:

1. Alle empfangenen Rißbeugungssignale lassen sich hinsichtlich ihrer Entstehung interpretieren.
2. Mit dem bisher experimentell entwickelten und angewandten Ultraschall-Laufzeit-Beugungsverfahren kann zweifelsfrei Rißfortschritt gemessen werden.
3. Das zur Rißfortschrittsmessung herangezogene rißspitzengebeugte Transversalwellenecho wird neben Rißwachstum in geringerem Maße auch durch die Probendurchbiegung beeinflusst.
4. Im Verlauf zunehmender Probendurchbiegung bzw. Rißfortschritts wird das zur Messung genutzte T-Wellenecho von anderen Echos überlagert. Unter den vorliegenden Bedingungen führt das zu einer Beschränkung der Meßbarkeit des Rißfortschritts bis auf ca. 30 % der ursprünglichen Probendicke.
5. Genauigkeit und Meßbereich der Rißlängenmessung lassen sich verbessern, wenn das Laufzeit-Beugungsverfahren auf der Grundlage einer schräg eingeschallten Longitudinalwelle realisiert wird.
6. Ein weiterer Empfängerprüfkopf, der auf der Probenrückfläche angebracht wird, scheint geeignet, Rißabstumpfungsprozesse zu detektieren. In jedem Fall bedeutet die Anwendung eines weiteren Empfängers einen Informationsgewinn.

Trotz der konkreten Anwendung auf das Testmaterial Stahl tragen die Untersuchungen universellen Charakter, denn es ist möglich, die Gesetzmäßigkeiten der Schallausbreitung auf anderes isotropes Testmaterial zu übertragen. Die durch die Simulationsrechnungen angeregten Veränderungen der Meßanordnung werden in zukünftigen experimentellen Arbeiten zur Weiterentwicklung des Meßverfahrens untersucht, um die Genauigkeit der Rißfortschrittsmessung mit dem untersuchten Verfahren zu erhöhen und zusätzliche Informationen über den Rißausbreitungsprozeß zu erhalten.

Literatur

- 1 R. Kunze, Ultraschallverfahren zur Erfassung von Rißbildung und Rißfortschritt bei quasistatischer Belastung, Diplomarbeit, TU Dresden, Institut für Werkstoffwissenschaft, 1994
- 2 U. Bergmann, J. Böhmert, F. Bergner, Ultraschallverfahren zur Messung duktilen Rißfortschritts bei quasistatischer Belastung, DVM-Arbeitskreis Bruchvorgänge, Köln, 1995, S. 177 - 186
- 3 P. Fellinger, 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
- 4 K.J. Langenberg 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
- 5 British Standards Institution Document BS 5762, Methods for crack opening displacement (COD) Testing, BSI, 1979
- 6 O. Kolednik, On the Calculation of COD from the Clip-Gauge Displacement in CT- and Bend-Specimens, Engineering Fracture Mechanics Vol. 29, No.2, 1989, pp. 173-188
- 7 F. Bergner, U. Bergmann, Punktquelle-Punktempfänger-Modell zur Rißfortschrittmessung mit Ultraschall, Tagung Werkstoffprüfung, Bad Nauheim, 1995, S. 419 - 426
- 8 J.A. Ogilvy, J.A.G. Temple, Diffraction of elastic waves by cracks: application to time-of-flight inspection, Ultrasonics, November 1983, pp. 259-269
- 9 K. Date, H. Shimada, Monitoring Crack Extension in Fracture Toughness Tests by Ultrasonic Surface Wave, The Nondestructive Testing Journal, Japan, Vol.2, No.3, 1984, pp. 132-127
- 10 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

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Schema des Laufzeit-Beugungsverfahrens zur Rißfortschrittmessung
- Abb. 2 Darstellung der Schallwellenausbreitung und Berücksichtigung von Reflexion und Beugung anhand nur eines Wellenmodes an einer Biegeprobe
- Abb. 3 EFIT-Simulation der Schallwellenausbreitung in einer Biegeprobe, Prüffrequenz 5 MHz
- Abb. 4 zeitabhängige Darstellung des Eintreffens der unterschiedlichen Wellenfronten in den Empfängerprüfkopf (HF-Bild)
- Abb. 5 simulierte Echofolge für eine Probe mit Rißlänge 5 mm und einem Prüfkopfabstand von 6 mm zur Rißebe
- Abb. 6 Prüfkopfparameter
- Abb. 7 Gegenüberstellung simulierter Echofolgen bei Rißverlängerung, Beispiele mit einer Rißlänge von 5 und 6 mm
- Abb. 8 Gegenüberstellung der Simulations- und Meßergebnisse bei Überlagerung von Rißausbreitungs- und Biegeprozeß
- Abb. 9 Simulation von Rißformveränderungen, Prüffrequenz 10 MHz, (Amplitudenmaßstab jeweils der Bildhöhe angepaßt)
- Abb. 10 Geneigt eingeschallte Longitudinalwelle, Prüffrequenz 10 MHz, Gegenüberstellung simulierter und gemessener Echofolgen (Amplitudenmaßstab jeweils der Bildhöhe angepaßt)
- Abb. 11 Simulation von Kerbgrundveränderungen und Rißfortschritt, rückseitige Empfängeranordnung (Amplitudenmaßstab jeweils der Bildhöhe angepaßt)

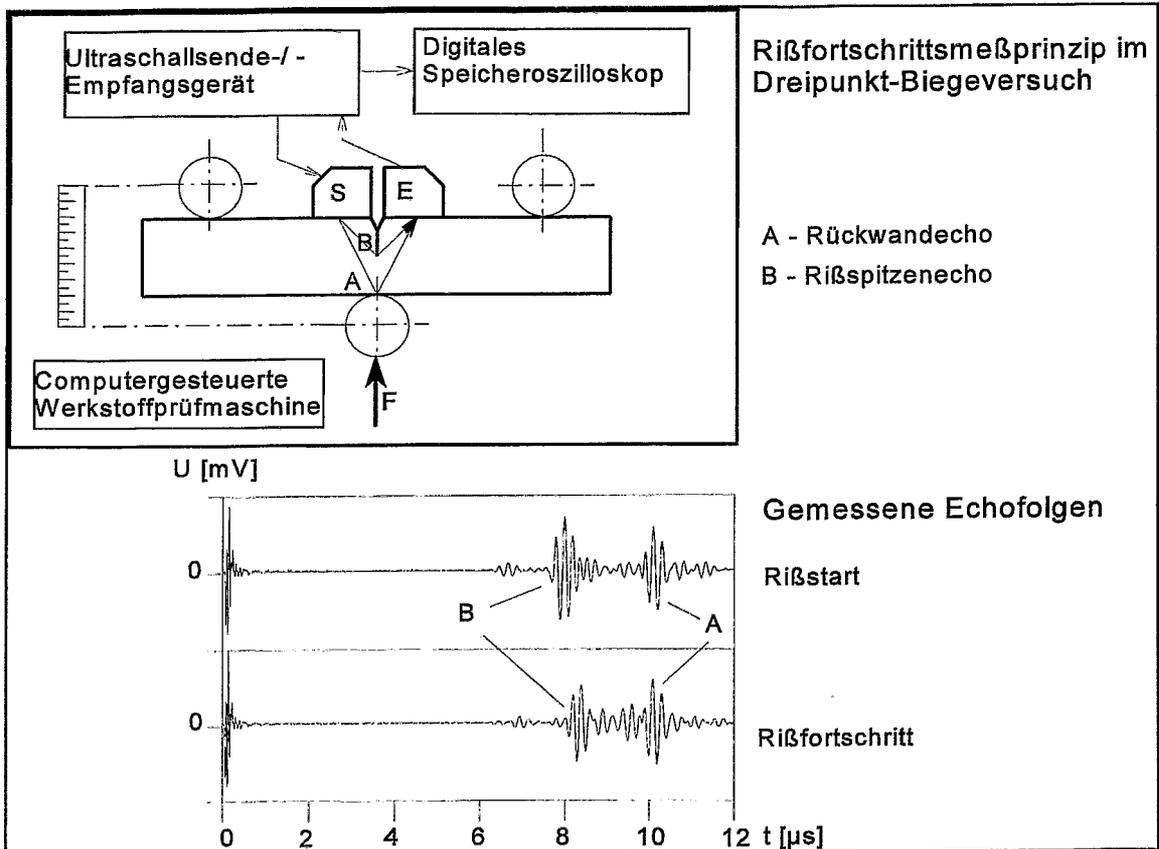


Abb. 1 Schema des Laufzeit-Beugungs-Verfahrens zur Rißfortschrittsmessung

Schnappschüsse

zum Zeitpunkt

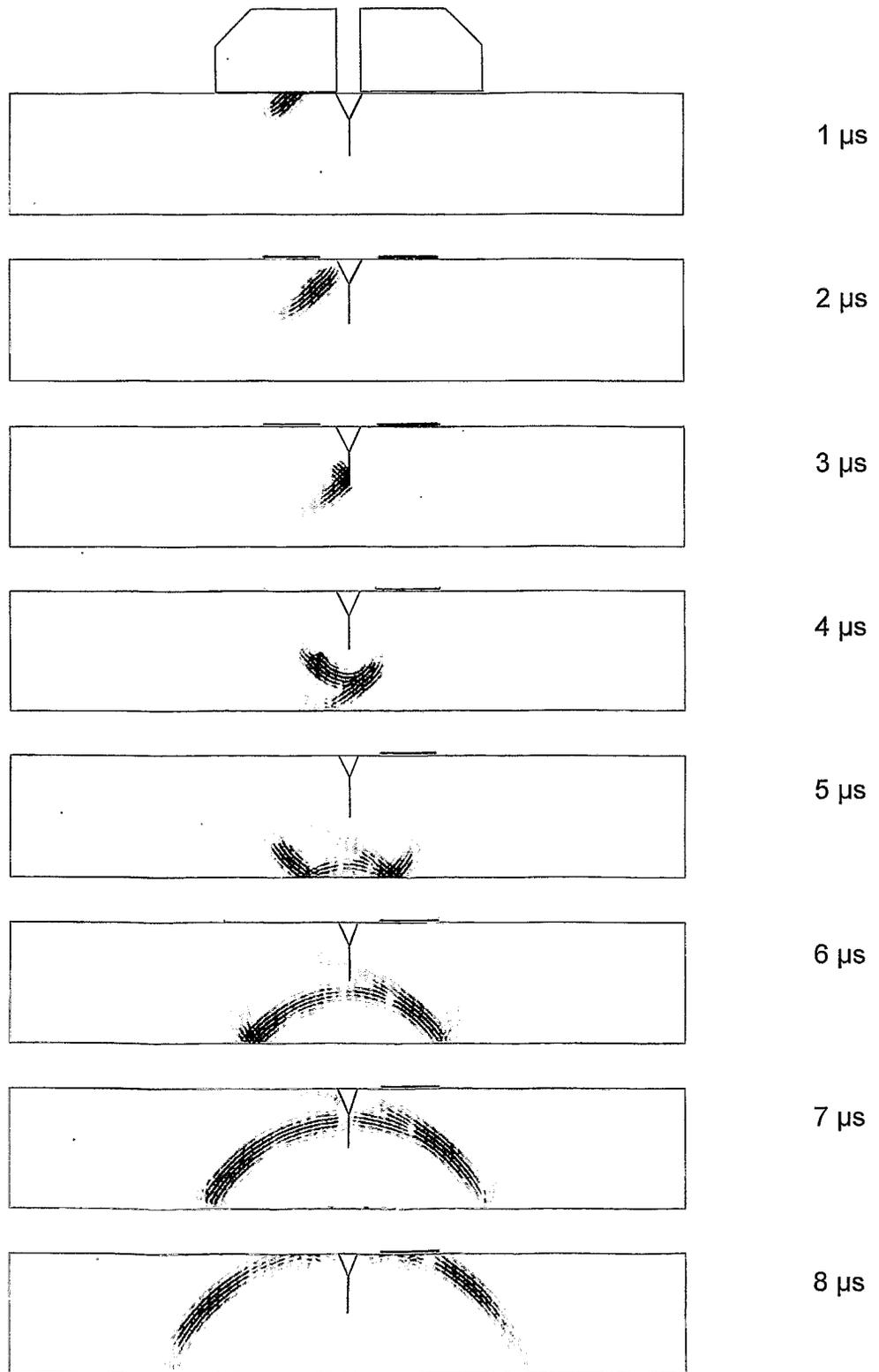


Abb. 2

Darstellung der Schallwellenausbreitung und Berücksichtigung von Reflexion und Beugung anhand nur eines Wellenmodes an einer Biegeprobe

Schnappschüsse

zum Zeitpunkt

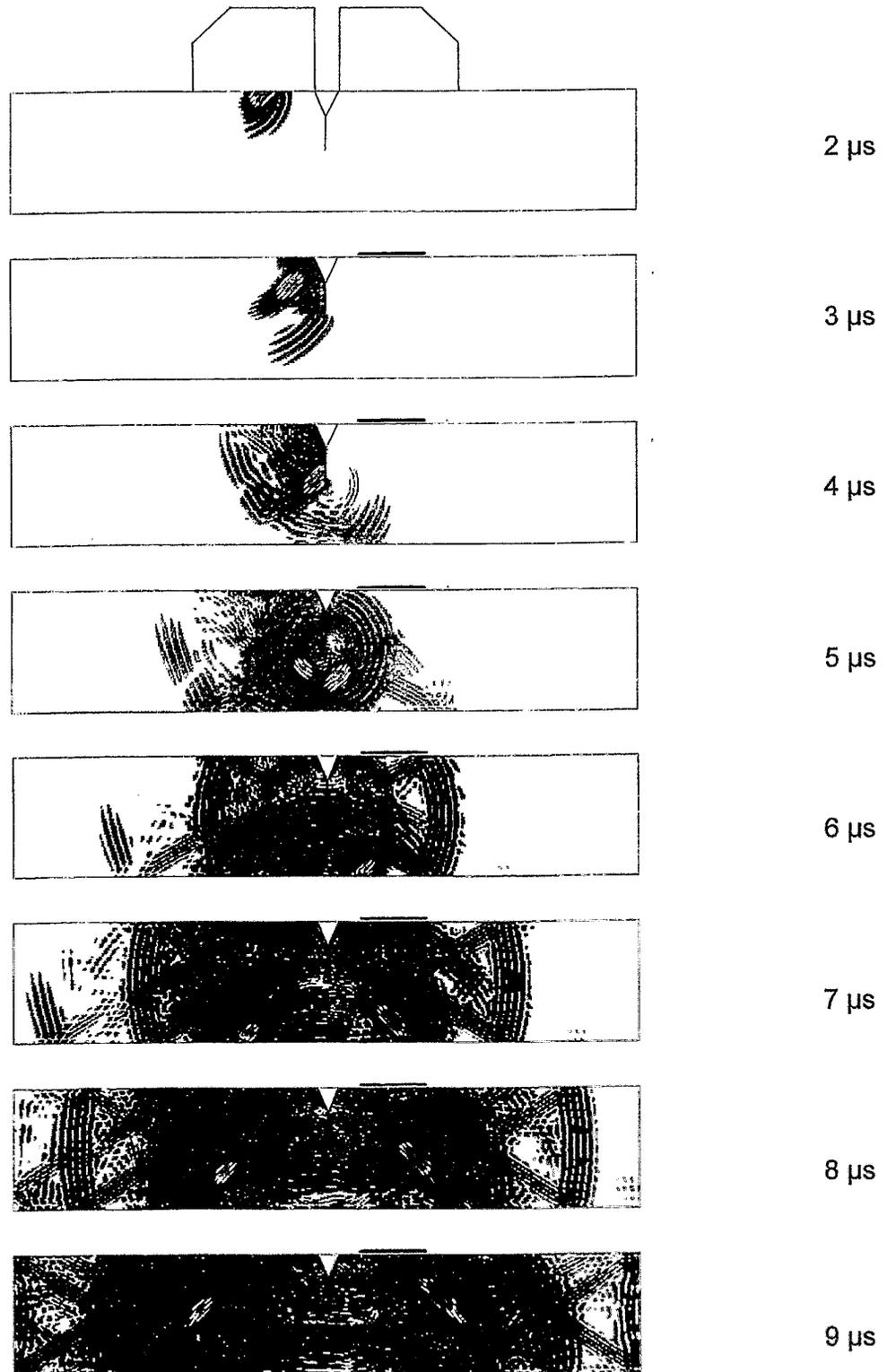


Abb. 3 EFIT-Simulation der Schallwellenausbreitung in einer Biegeprobe, Prüffrequenz 5 MHz

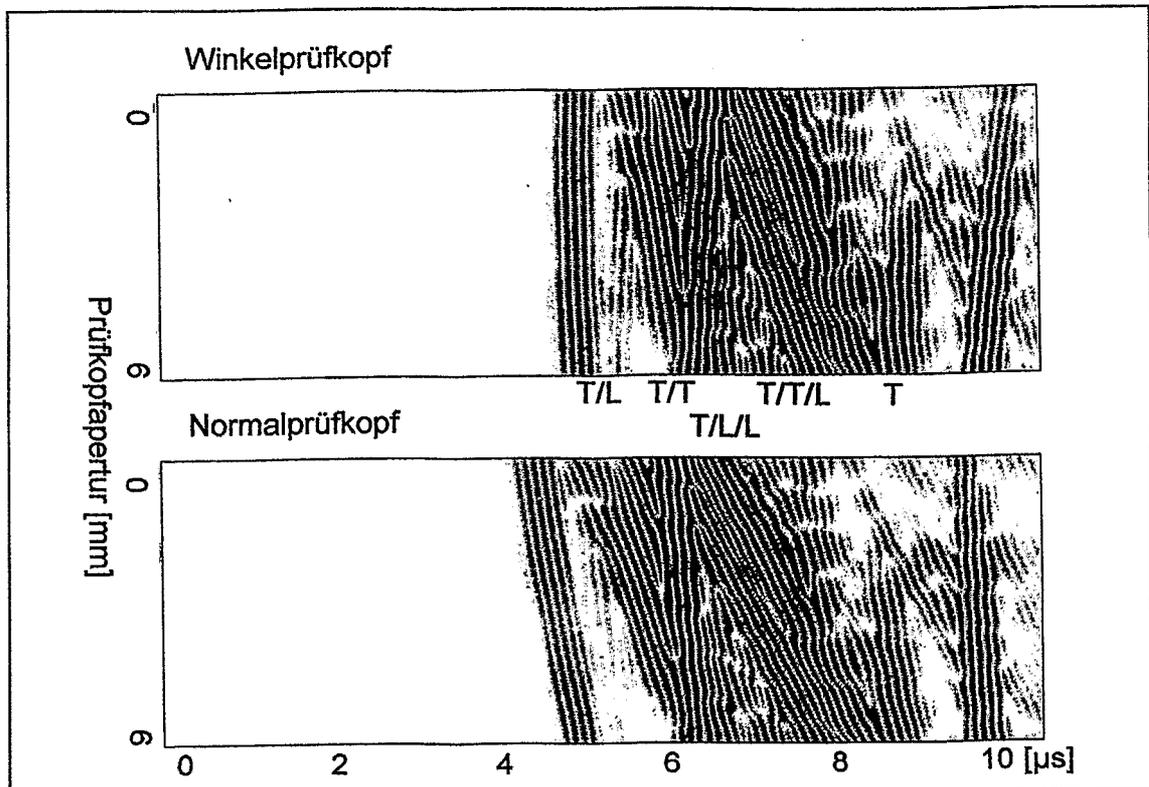


Abb. 4 Zeitabhängige Darstellung des Eintreffens der unterschiedlichen Wellenfronten in den Empfängerprüfkopf (HF-Bild)

- T/L eine aus der Rißspitzenbeugung der einfallenden T-Welle entstandene L-Welle,
- T/T rißspitzengebeugte T-Welle,
- T/L/L rückwandreflektierte L-Welle, entstanden durch die einfallende T-Welle, die an der Rißspitze gebeugt und dort zu einer L-Welle modekonvertiert wurde,
- T/T/L rückwandreflektierte L-Welle, entstanden durch die einfallende T-Welle, die an der Rißspitze gebeugt und dort zu einer T-Welle modekonvertiert wurde,
- T rückwandreflektierte T-Welle.

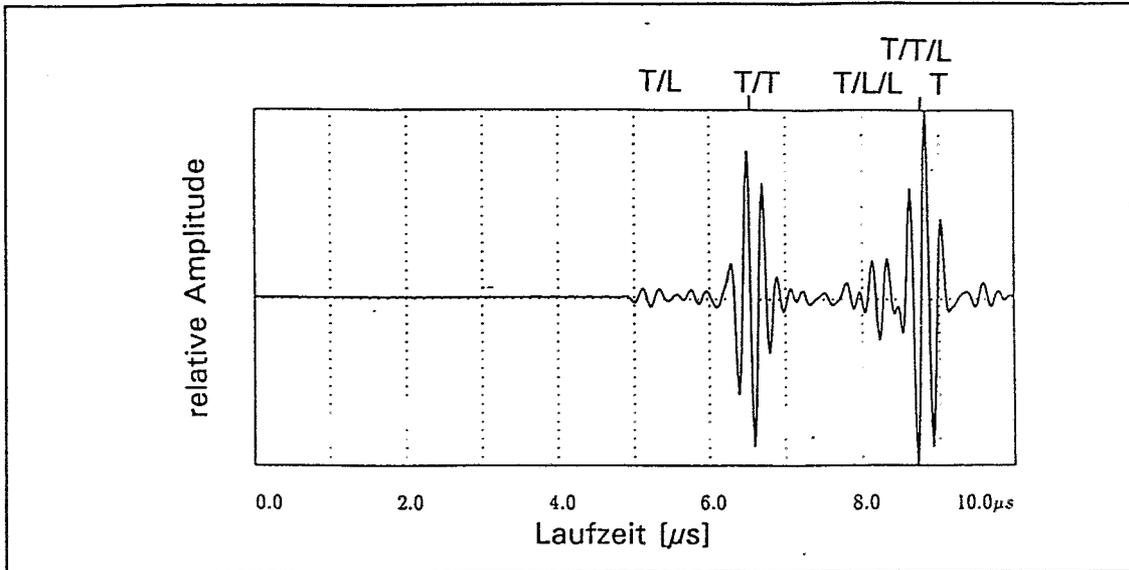


Abb.5 simulierte Echofolge für eine Probe mit Rißlänge 5 mm und einem Prüfkopfabstand von 6 mm zur Rißebeane

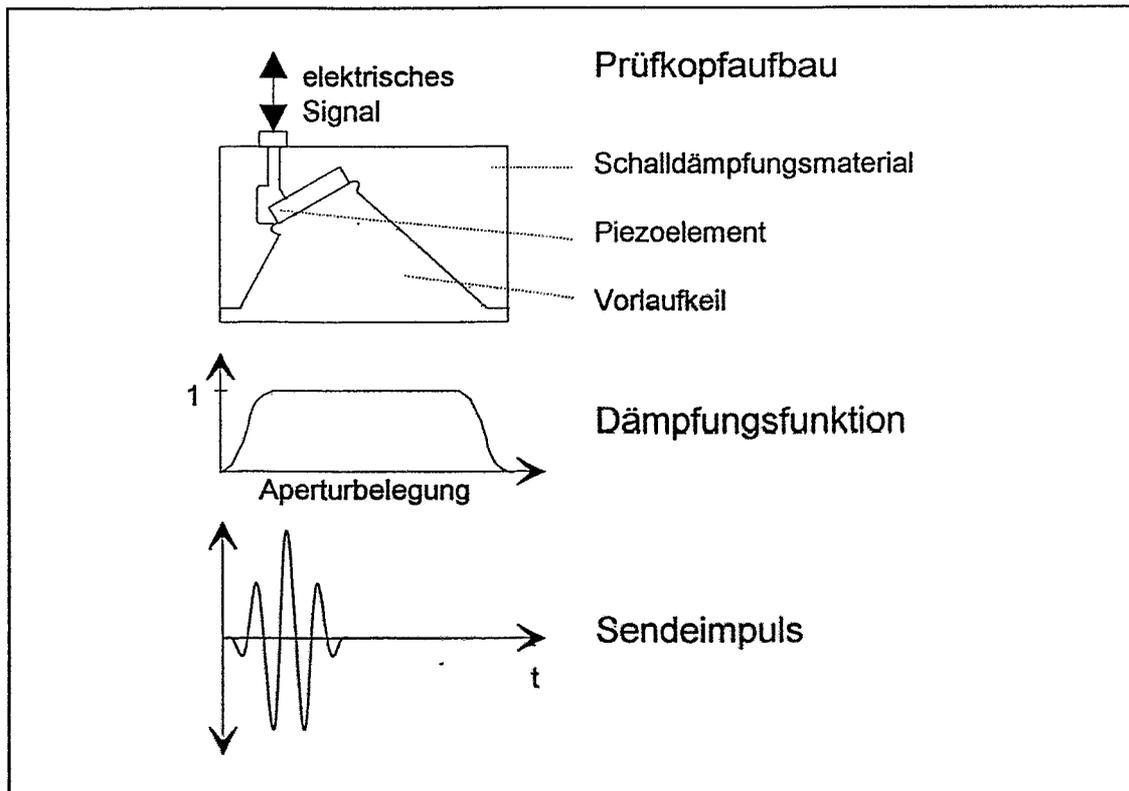


Abb.6 Prüfkopfparameter

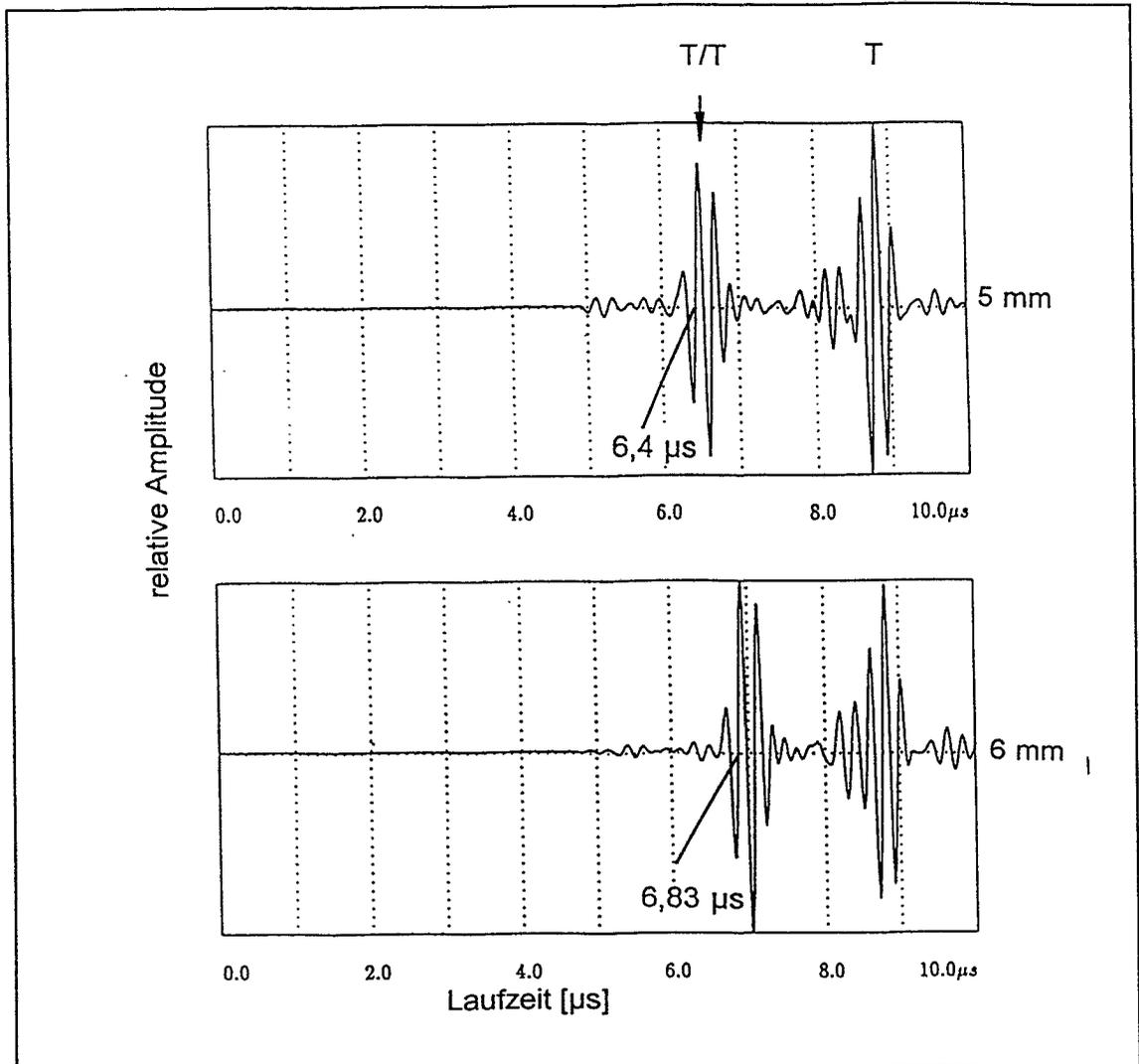


Abb. 7 Gegenüberstellung simulierter Echofolgen bei Rißverlängerung, Beispiele mit einer Rißlänge von 5 und 6 mm

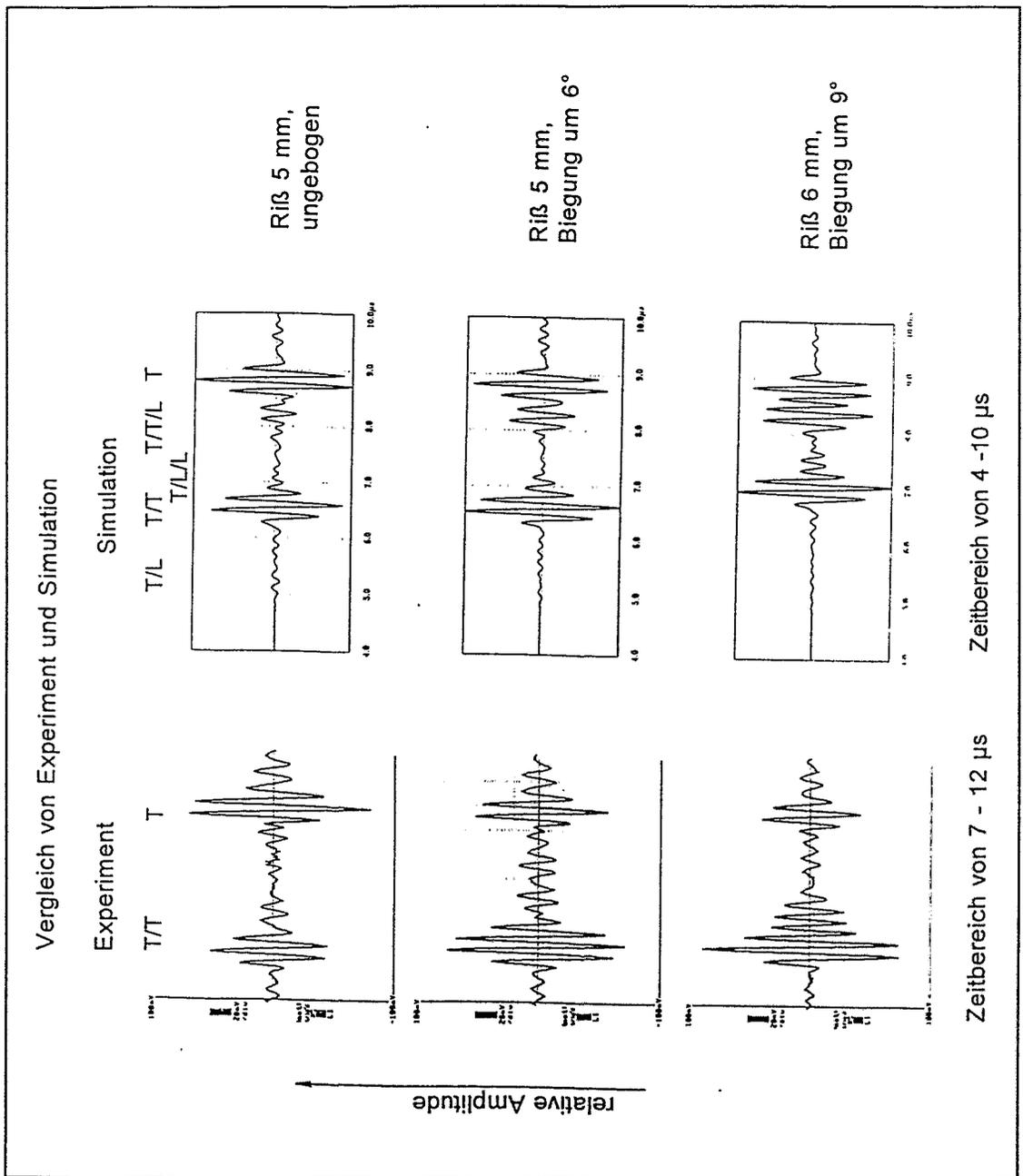


Abb. 8 Gegenüberstellung der Simulations- und Meßergebnisse bei Überlagerung von Rißausbreitungs- und Biegeprozeß

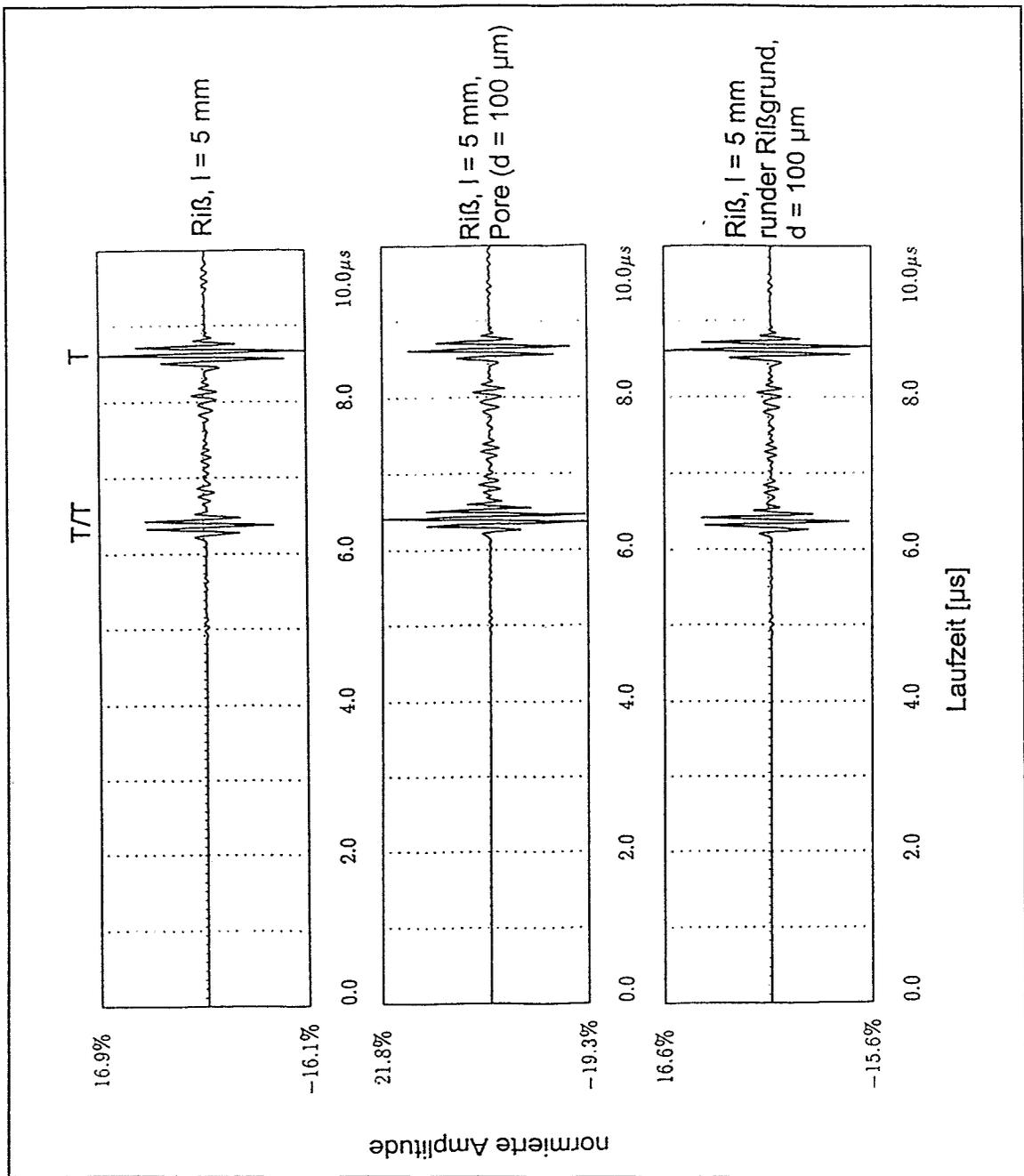


Abb. 9 Simulation von Rißformveränderungen, Prüffrequenz 10 MHz, (Amplitudenmaßstab jeweils der Bildhöhe angepaßt)

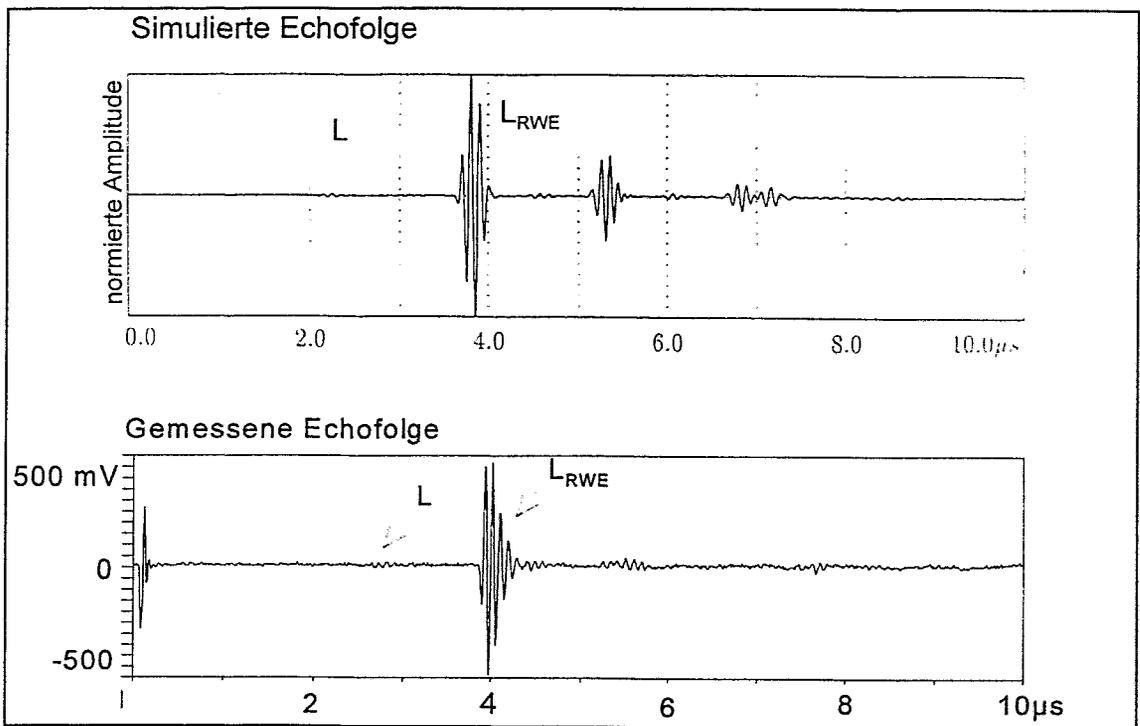


Abb. 10 Geneigt eingeschaltete Longitudinalwelle, Prüffrequenz 10 MHz, Gegenüberstellung simulierter und gemessener Echofolgen

L einfallende L-Welle wird an der Rißspitze zur L-Welle gebeugt
 L_{RWE} einfallende, an der Rückwand reflektierte L-Welle

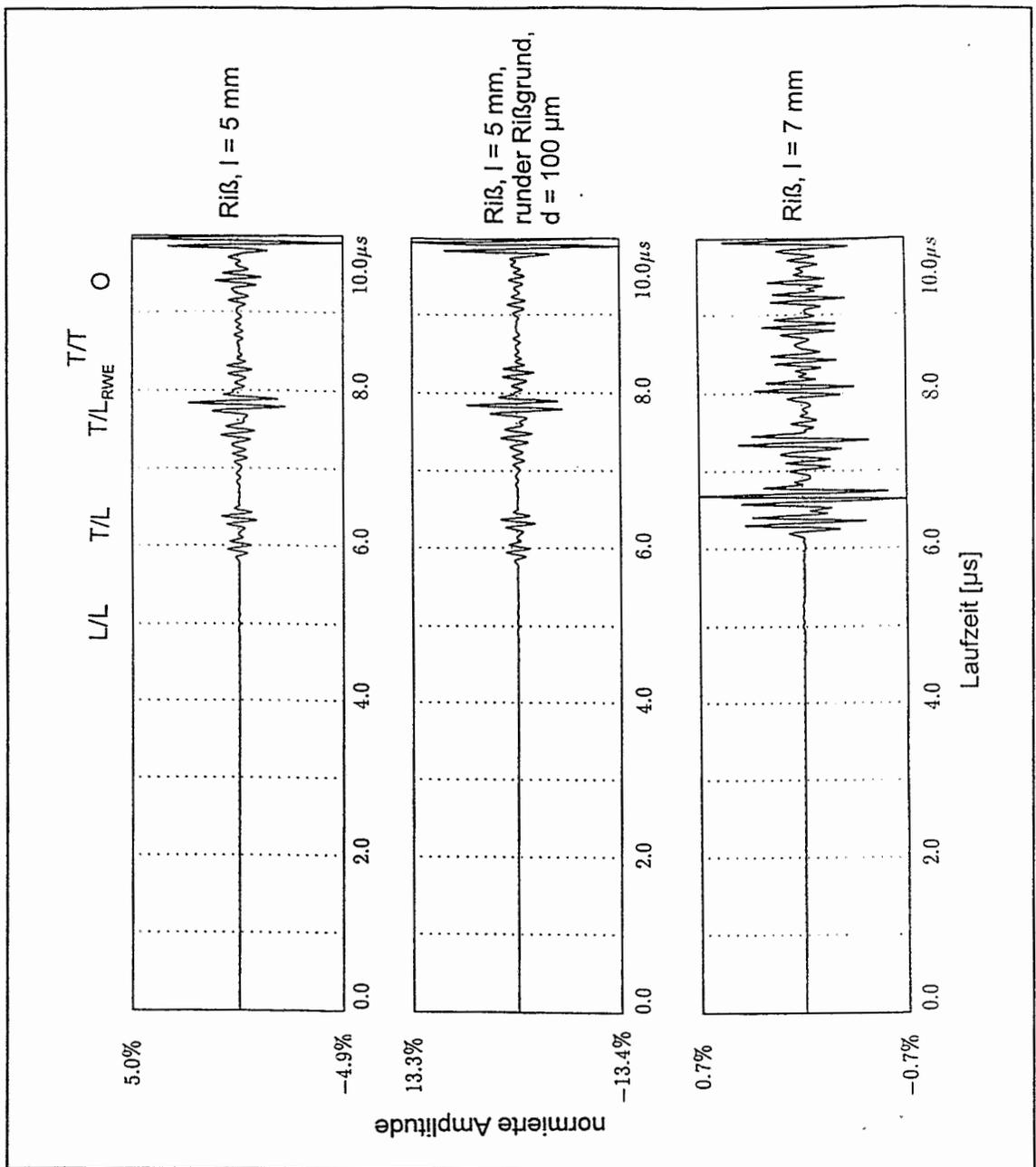


Abb. 11 Simulation von Kerbgrundveränderungen und Rißfortschritt, rückseitige Empfängeranordnung, (Amplitudenmaßstab jeweils der Bildhöhe angepaßt)

- L/L Bezeichnung nach Abb. 4
- T/L "
- T/T "
- T/L_{RWE} einfallende T-Welle wird an der Rückwand teilweise zur L-Welle reflektiert
- O einfallende Oberflächenwellen