

Institut für Werkstoff- und Verarbeitungswissenschaften

Forschungsgruppe Schmitt-Thomas

**Ultraschallaminographie – Ein neues Verfahren zur Früherkennung  
von Zeitstandschäden an Rohrbögen**

Dipl.-Ing. Univ. Erwin Kellerer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Igenbergs

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kh. G. Schmitt-Thomas, em
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Hein
3. Hon.-Prof. Dr.-Ing. E. Tolksdorf

Die Dissertation wurde am 22.11.2000 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.03.2001  
angenommen.

## **Vorwort**

Für die Betreuung der Arbeit bedanke ich mich im besonderen bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Schmitt-Thomas, der stets als Ansprechpartner mit hohem Wissen und großer Erfahrung zur Seite stand.

Die Durchführung der Arbeiten war nur möglich aufgrund der finanziellen Förderung durch die VGB-Forschungsstiftung, wofür ich an dieser Stelle meinen Dank ausspreche. Von Seiten der VGB wurde die Arbeit durch Herrn Professor Tolksdorf betreut. Die Unterstützung durch seine fachliche Kompetenz und seine Kontakte zu Forschungsinstituten und der Industrie haben einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit geleistet. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Schließlich gilt mein Dank allen früheren Mitarbeitern und Kollegen, mit denen ich während meiner Zeit an der Technischen Universität München zusammenarbeiten durfte.

1. Einleitung .....	1
1.1 Problemstellung.....	4
1.2 Zielsetzung .....	6
2. Werkstoffkundliche Grundlagen .....	7
2.1 Zeitstandbeanspruchung und Kriechen.....	7
2.2 Einfluß von Zeitstandbeanspruchung auf die Werkstoffeigenschaften .....	11
2.2.1 Technologische Eigenschaften .....	12
2.2.2 Physikalische Eigenschaften .....	14
2.3 Werkstoffentwicklung in der Kraftwerkstechnik .....	17
3. Grundlagen der Ultraschalltechnik .....	21
3.1 Schallgeschwindigkeit in festen Körpern .....	22
3.2 Rayleigh- und Lambwellen .....	25
3.2.1 Rayleighwellen.....	25
3.2.2 Lambwellen.....	28
3.3 Ultraschall in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung .....	30
4. Nachweis von Zeitstandschädigung.....	33
4.1 Konventionelle Methoden .....	33
4.2 Verfahren im Entwicklungsstadium .....	34
4.3 Nachweis von Zeitstandschädigung durch Schallgeschwindigkeitsmessungen ...	37
4.3.1 Beispiele experimenteller Ergebnissen aus der Literatur .....	38
5. Aufgabenstellung und Organigramm .....	43
6. Entwicklung der Ultraschall-Laminographie .....	45
6.1 Grundlagen.....	45
6.2 Meßprinzip.....	46
6.3 Meßvorgang .....	50
7. Ergebnisse von Messungen mit der Ultraschall-Laminographie .....	54
7.1 Untersuchte Rohrbögen .....	54
7.2 Integrale Geschwindigkeitsprofile der untersuchten Rohrbögen .....	56
7.2.1 Neue Rohrbögen .....	58
7.2.2 Betriebsbeanspruchte Rohrbögen .....	63

7.3 Betrachtungen zum Absolutwert der Schallgeschwindigkeit.....	70
8. Abschätzung des Schädigungsgradienten aus den Meßkurven .....	75
8.1 Tatsächlicher Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe .....	75
8.2 Verlauf der Schädigung in die Tiefe .....	81
8.3 Anwendungsbeispiel .....	85
8.3.1 Berechnung des tatsächlichen Geschwindigkeitsverlaufs $c(x)$ .....	85
8.3.2 Korrelation mit metallographischen Untersuchungen .....	87
9. Diskussion.....	91
9.1 Ultraschall-Laminographie.....	91
9.2 Integrale Meßkurven der untersuchten Rohrbögen .....	93
9.2.1 Ungeschädigte Rohrbögen .....	93
9.2.2 Geschädigte Rohrbögen .....	94
9.3 Berechnung des tatsächlichen Verlaufs der Schallgeschwindigkeit .....	98
9.4 Abschätzung des Schädigungsverlaufs und Korrelation mit metallographischen Untersuchungen .....	104
9.5 Ausblick.....	105
10. Zusammenfassung .....	107
11. Literatur.....	109

## **Abstract**

Hot steam pipes in power plants and the chemical industry are subjected to very high mechanical and thermal stress. Long time operation under these conditions generates gradually increasing damage of the material. This so called creep damage typically starts at the surface of a component and can therefore be detected by surface metallographic methods. As this metallographic detection is rather time consuming, there is an urgent need for additional nondestructive testing methods.

This work presents a method for detection of creep damage by measurement of sound velocity. Measurement is performed by a new technique, using continuous surface acoustic waves, in contrast to conventional pulse techniques. This technique provides high accuracy of measurement mainly under on site conditions in power stations.

Through variation of frequency the depth of penetration of the wave into the material can be changed, to investigate not only the surface, but even a layer of a few millimeters of depth. The measurements result in a curve of sound velocity vs depth of penetration. In this work it could be shown that the height of velocity and its depth dependent gradient refer to the grade and depth of material damage.

## 1. Einleitung

In der Kraftwerkstechnik werden dampfführende Komponenten, wie Kessel, Rohrleitungen und Armaturen, über einen sehr langen Zeitraum mechanisch und thermisch beansprucht. Eine derartige Zeitstandbeanspruchung führt zu typischen Gefügeveränderungen und Schädigungen, die letztendlich das Versagen des entsprechenden Bauteils einleiten.

Die Auslegung zeitstandbeanspruchter Bauteile erfolgt nach zeit- und temperaturabhängigen Festigkeitskennwerten, die mit Hilfe von Zeitstandversuchen ermittelt werden. Da bei Auslegungszeiten der Anlagen von bis zu 200.000 Stunden sehr lange Versuchszeiten notwendig sind, wurden Extrapolationsverfahren entwickelt, um von Versuchen kürzerer Dauer bei erhöhter Temperatur auf die Lebenszeit der Bauteile bei Betriebstemperatur zu schließen. In diesem Zusammenhang ist vor allem das Extrapolationsverfahren nach Larson und Miller [1] zu nennen. Relativ großen Streuungen der Zeitstandfestigkeitswerte und Unsicherheiten in den Extrapolationsverfahren wird durch eine konservative Auslegung Rechnung getragen.

Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ist jedoch anzustreben, die tatsächliche Lebensdauer von Bauteilen so weit wie möglich auszuschöpfen, ohne dabei ein Sicherheitsrisiko einzugehen. Die Anlagen werden deshalb regelmäßigen Revisionen unterzogen, in denen mit Hilfe vor allem zerstörungsfreier Prüfungen der Werkstoffzustand festgestellt wird.

Die bleibende Dehnung eines Werkstoffs unter einer konstanten Last bei erhöhter Temperatur wird als Kriechen bezeichnet. Der Kriechprozeß äußert sich in einem typischen Verformungsverhalten, das von charakteristischen Gefügeveränderungen begleitet wird. Der Großteil der Lebensdauer einer Probe oder eines Bauteils ist durch einen Bereich konstanter Kriechgeschwindigkeit bestimmt. Aufgrund der Kenntnis dieser stationären Kriechgeschwindigkeit ist eine Auslegung von Bauteilen möglich.

Parallel zur Kriechdehnung finden im Werkstoff zeit- und temperaturabhängige Gefügeveränderungen statt. Diese Veränderungen können grundsätzlich durch eine Wärmebehandlung wieder rückgängig gemacht werden, weshalb sie als reversibel bezeichnet werden. Nach langer Betriebszeit erfährt der Werkstoff allmählich jedoch auch eine irre-

versible Schädigung. In deren Anfangsstadium entstehen zunächst vereinzelt mikroskopisch kleine Poren, bevorzugt entlang der Korngrenzen. Im weiteren Verlauf nimmt die Größe und Anzahl der Poren zu und sie lagern sich zu Porenketten zusammen, um schließlich Risse zu bilden.

Aufgrund langjähriger Erfahrungen ist bekannt, daß gegen Ende der Lebensdauer eines Bauteils die irreversible Schädigung des Werkstoffs deutlich zunimmt. Dem Nachweis dieser Schadensform kommt deshalb eine besondere Bedeutung zu. Als zerstörungsfreie Methode hierfür hat sich heute die sogenannte Bauteilmetallographie [2] durchgesetzt, mit deren Hilfe eine Gefügeuntersuchung der Bauteiloberfläche möglich ist. Damit läßt sich bereits eine beginnende Schädigung in Form einzelner Poren nachweisen. Ein Nachteil der Bauteilmetallographie ist der relativ große Arbeitsaufwand, der mit der Oberflächenvorbereitung verbunden ist. Desweiteren liefert sie nur eine punktuelle Aussage über die Schädigung an der Oberfläche, während Gefügeveränderungen und -schädigungen im Bauteilvolumen unentdeckt bleiben.

Neben der metallographischen Untersuchung wird häufig auch eine Aufweitungsmessung zum Nachweis des Kriechprozesses durchgeführt. Gemäß dem Regelwerk [3] müssen Bauteile nach Erreichen einer kritischen Dehnung ausgewechselt werden. Da jedoch aus der Aufweitung eines Bauteils nicht unbedingt auf dessen Werkstoffzustand geschlossen werden kann, kommt es vor, daß Bauteile lange vor ihrem tatsächlichen Lebensende ausgebaut werden.

Für eine sichere Abschätzung der Restlebensdauer, unter Wahrung wirtschaftlicher Interessen, gewinnt deshalb die Entwicklung neuer zerstörungsfreier Prüfmethoden zunehmende Bedeutung.

Poren und Risse stellen Gefügeinhomogenitäten dar. Zu deren Nachweis gibt es in der konventionellen Werkstoffprüfung abbildende Verfahren, die mit Hilfe von Ultraschall, Röntgen- oder Isotopenstrahlung arbeiten. Eine Durchstrahlungsprüfung ist an realen Bauteilen nicht praktikabel, da diese in der Regel nur einseitig zugänglich sind. Mit Hilfe der Ultraschallprüfung können zwar makroskopische Risse auch noch in großer Tiefe aufgefunden werden, jedoch reicht das Auflösungsvermögen nicht aus, um Mikroporen nachzuweisen.

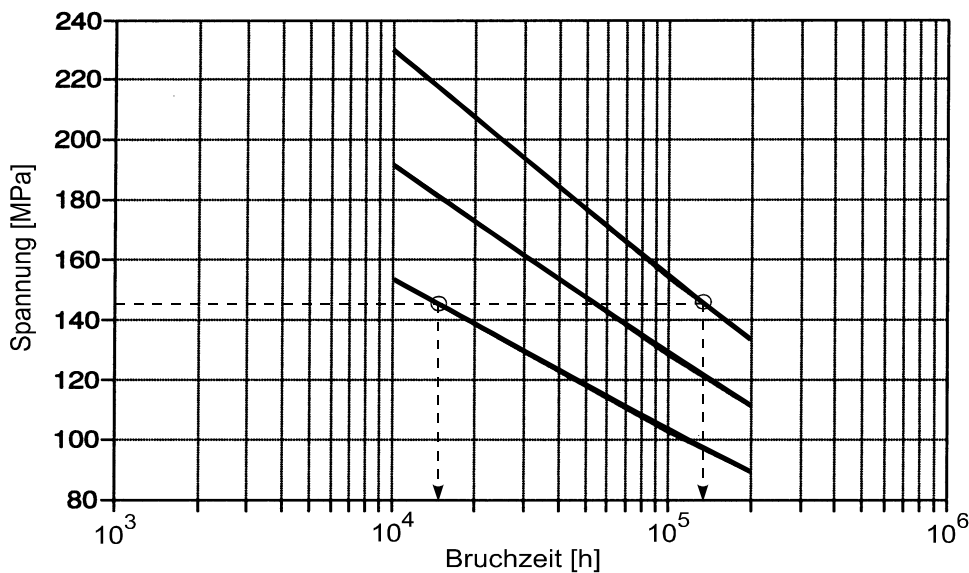
Anstatt die Schädigung durch abbildende Verfahren nachzuweisen, gibt es auch die Möglichkeit, bestimmte Werkstoffeigenschaften zu messen, die in einer Korrelation zum Gefügestand oder zur Schädigung stehen. In Laborversuchen wurden an zeitstandgeschädigtem Material Veränderungen der elektrischen, thermischen, magnetischen und mechanischen Eigenschaften nachgewiesen. Da strukturbedingte Änderungen physikalischer Eigenschaften meist nur von geringem Ausmaß sind, ist eine hohe Meßgenauigkeit erforderlich.

Die verschiedenen Prüfmethode konnten sich bisher vor allem deswegen nicht in der Praxis durchsetzen, weil sie mit der nötigen Genauigkeit nur auf Proben, nicht jedoch auf reale Bauteile anwendbar sind.



## 1.1 Problemstellung

Der Auslegung kriechbeanspruchter Bauteile werden Zeitstandfestigkeitswerte zugrunde gelegt, die einer großen Streuung unterliegen [81]. In den Zeitstanddiagrammen des Normenwerks wird an die Mittelwertkurve ein Streuband von  $\pm 20\%$  angelegt. Die Berechnung erfolgt konservativ, womit gemeint ist, daß die Kennwerte der unteren Streubandgrenze herangezogen werden. Diese Vorgehensweise führt dazu, daß sich die zu erwartende Lebensdauer eines Bauteils innerhalb einer Bandbreite von mehreren hundert Prozent bewegt. Dies ist in Bild 1.1 am Beispiel einer Zeitstandkurve des Werkstoffs X20 CrMoV 12-1 dargestellt.



*Bild 1.1: Streuband der Zeitstandfestigkeit und daraus resultierende Unsicherheit der Lebensdauerprognose am Beispiel des Werkstoffs X20 CrMoV 12 1.*

Neben Gründen der Betriebssicherheit gibt es deshalb auch eine wirtschaftliche Motivation, die Möglichkeiten der Restlebensdauerbeurteilung zu verbessern, um die tatsächlich vorhandene Lebensdauerreserve der Bauteile unter Wahrung der Sicherheit so weit wie möglich auszuschöpfen.

Da das Auftreten von Zeitstandporen für viele Werkstoffe einen mittleren bis hohen Erschöpfungsgrad anzeigt, ist die Früherkennung von Zeitstandschädigung eine wesentliche Voraussetzung dafür. Als beste Methode zum Nachweis der Schädigung hat sich die Oberflächenmetallographie (Replika-Technik) bewährt, sofern die Entnahme und Beurteilung der Gefügeabdrücke durch erfahrenes Personal erfolgt. Da Zeitstandschädigung erfahrungsgemäß an der Außenoberfläche zuerst auftritt, befindet man sich mit dieser Prüfmethode im Regelfall auf der sicheren Seite. Trotzdem hat man auch Einschränkungen in Kauf zu nehmen. Zum einen erhält man nur eine punktuelle Aussage über den Gefügezustand an wenigen Stellen der Bauteiloberfläche. An einem Rohrbogen einer Frischdampfleitung z.B. werden bei einer Standardprüfung nicht mehr als 3 bis 5 Gefügeabdrücke entnommen. Es bleibt somit ein gewisses Risiko, den maximal geschädigten Bereich zu übersehen. Zum anderen erhält man keine Information darüber, wie weit die Schädigung in die Tiefe fortgeschritten ist. Findet man an einem Bauteil eine starke Schädigung an der Oberfläche, so wird dieses unter Annahme des schlimmsten Falles ausgetauscht, obwohl die Schädigung möglicherweise nur wenig in die Tiefe reicht.

Ein Ansatz zur Verbesserung der Restlebensdauerberechnung besteht darin, zerstörungsfrei meßbare Werkstoffkenngrößen in die Berechnung einfließen zu lassen [4, 82]. Dies kommt auch darin zum Ausdruck, daß in der VGB-Richtlinie R 509 L [5], die derzeit überarbeitet wird, der Einbeziehung alternativer zerstörungsfreier Prüfmethoden ein höherer Stellenwert eingeräumt wird.

Aus diesen Gründen werden seit langem große Anstrengungen unternommen, um das Spektrum zerstörungsfreier Prüfmethoden an zeitstandbeanspruchten Komponenten zu erweitern.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur Lösung dieser Aufgabenstellung leisten.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens zum Nachweis von Zeitstandschädigung. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Anwendbarkeit auf reale Bauteile, wobei vor allem die Komponenten des heißdampf führenden Rohrleitungssystems im Mittelpunkt des Interesses stehen.

Der Nachweis der Schädigung erfolgt durch Messung der Ultraschallgeschwindigkeit, da bereits aus verschiedenen anderen Untersuchungen [z.B. 6, 7, 8] bekannt ist, daß Zeitstandschädigung zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit führt.

Es wird ein neues Verfahren zur Messung der Schallgeschwindigkeit an Bauteilen vorgeschlagen. Bestehende Arbeiten auf diesem Gebiet werden in mindestens zwei Punkten erweitert. Zum einen erfolgt die Messung nicht, wie in der konventionellen Ultraschallprüfung üblich, mit Schallimpulsen, sondern mit einer kontinuierlichen Rayleigh-Oberflächenwelle. Dieses Meßprinzip ermöglicht es, die Schallgeschwindigkeit an einem Bauteil vor Ort mit hoher Genauigkeit zu messen. Zum anderen kann durch Variation der Prüffrequenz die Eindringtiefe der Oberflächenwelle verändert werden. Dadurch wird der Werkstoff von der Oberfläche in die Tiefe sozusagen schichtweise abgetastet, um tiefenabhängige Änderungen der Schallgeschwindigkeit nachzuweisen.

Aufgrund dieser Besonderheit wurde für das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Meßverfahren die Bezeichnung *Ultraschall-Laminographie* gewählt.

## 2. Werkstoffkundliche Grundlagen

### 2.1 Zeitstandbeanspruchung und Kriechen

Unter einer hohen Temperatur ändert sich das Verformungsverhalten eines Werkstoffs. Der Verfestigung durch Verformung überlagert sich eine diffusionsabhängige Entfestigung und die Festigkeitskennwerte werden zeitabhängig. Die dadurch hervorgerufene zeitabhängige plastische Dehnung bei einer konstanten Spannung unterhalb der Warmstreckgrenze wird als Kriechen bezeichnet [9].

Für den Werkstoff Stahl beginnt der sogenannte Zeitstandbereich, in dem bei der Auslegung Kriechvorgänge berücksichtigt werden müssen, oberhalb ca. 400 °C. Bild 2.1 zeigt für die wichtigsten warmfesten Stähle die Temperaturgrenze, die den Übergang von der Warmstreckgrenze zur Zeitstandfestigkeit als auslegungsrelevanter Kenngröße markiert.

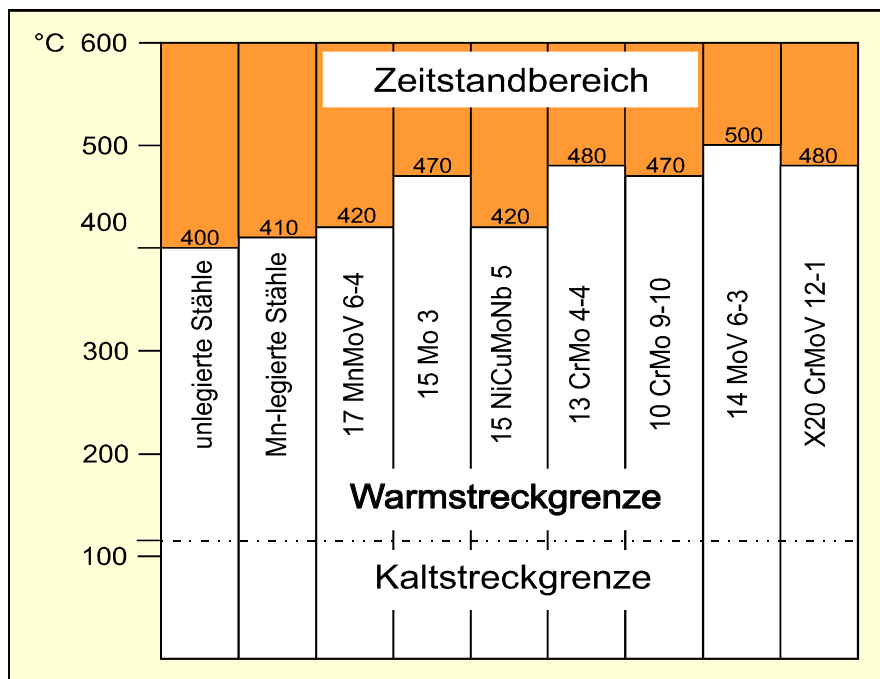


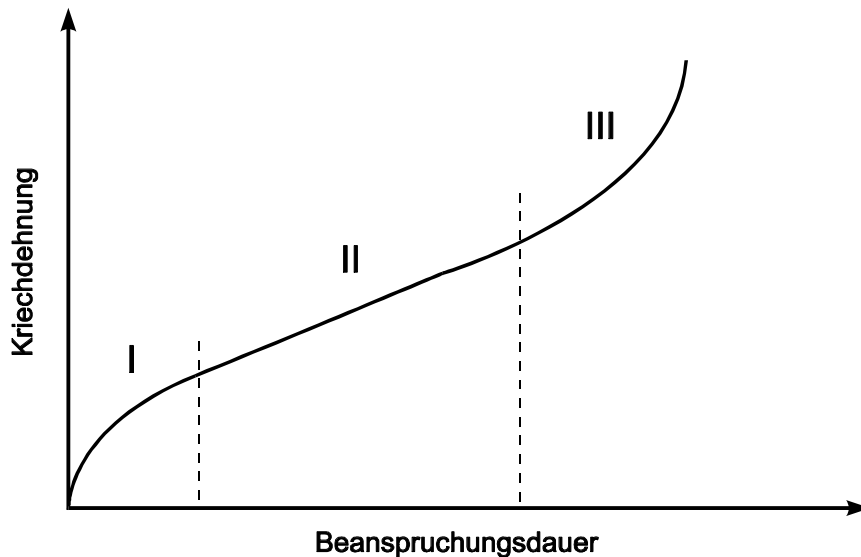
Bild 2.1: Beginn des Zeitstandbereichs für die wichtigsten warmfesten Stähle [11].

Bei hohen Temperaturen wirken der durch die plastische Verformung erzeugten Verfestigung thermisch aktivierte Erholungsvorgänge entgegen. Der makroskopisch meßbare Kriechprozeß läuft auf atomarer Ebene über Diffusions- und Versetzungsreaktionen ab. Bei niedriger Spannung und hoher Temperatur überwiegen Diffusionsvorgänge [1]. Unter einer mechanischen Spannung wandern Leerstellen in druckbelastete und Fremd-atome in zugbelastete Zonen. Da bei hohen Temperaturen die Diffusion entlang der Korngrenzen leichter abläuft als im Korninneren, findet dieser Vorgang bevorzugt im korngrenznahen Bereich statt. Ein weiterer diffusionsgesteuerter Vorgang, der zur Kriechverformung beiträgt, ist das Korngrenzengleiten. Unter der Wirkung einer hohen Temperatur kann durch die hohe Unordnung der Korngrenzen eine vorauseilende Erweichung der Korngrenzen erfolgen, wodurch das Abgleiten von Körnern gegeneinander erleichtert wird [13].

Ein wesentlicher Unterschied in der Verformung bei Raumtemperatur und bei hoher Temperatur liegt in der Wirkung der Korngrenzen. Korngrenzen sind Orte mit einer erhöhten Fehlstellendichte. Bei niedriger Temperatur begrenzen sie die Versetzungslaufwege und wirken dadurch festigkeitssteigernd. Mit zunehmender Temperatur erweichen die Korngrenzen aufgrund ihres hohen Unordnungsgrads früher als das restliche Korn. Oberhalb einer bestimmten Übergangstemperatur, der Äquikohäsivtemperatur [9], wird die Festigkeit eines Werkstoffs entlang der Korngrenzen geringer als im Korninneren. Bei Raumtemperatur wird deshalb zur Erhöhung der Festigkeit ein möglichst feinkörniges Gefüge angestrebt, während bei einer Hochtemperaturbeanspruchung ein grobes Korn günstiger ist. Die Steigerung der Korngröße hat jedoch ihre Grenzen, da mit zunehmender Kornvergrößerung die Grenzdehnung und Ermüdungsfestigkeit abnimmt [14].

Das Kriechverhalten eines Werkstoffs kann z.B. in einem Zeitstandversuch [15] ermittelt werden, bei dem eine Probe bei erhöhter Temperatur mit einer konstanten mechanischen Spannung belastet wird. Unter diesen Versuchsbedingungen beginnt der Werkstoff, sich zeitabhängig bleibend zu verformen. Trägt man die bleibende Dehnung über der Beanspruchungszeit auf, so erhält man die sogenannte Kriechkurve. Diese zeigt für viele

Werkstoffe einen typischen Verlauf, der eine Unterteilung in drei Bereiche erkennen lässt (Bild 2.2).



*Bild 2.2: Typischer Verlauf einer Kriechkurve.*

Im ersten oder primären Kriechbereich nimmt die anfangs hohe Verformungsgeschwindigkeit durch Verfestigung des Werkstoffs rasch ab. Im zweiten oder stationären Kriechbereich stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Verfestigungs- und Erholungsvorgängen ein. Als Folge bleibt die Kriechgeschwindigkeit über einen langen Zeitraum konstant. Im dritten Kriechbereich, dem sogenannten Beschleunigungskriechen, nimmt die Kriechgeschwindigkeit wieder zu. Die Ursache dafür liegt in einer beginnenden Schädigung in Form von mikroskopisch kleinen Hohlräumen und Rissen.

Im sekundären Bereich ist die Kriechgeschwindigkeit konstant und minimal. Unter typischen Kriechbedingungen erstreckt sich dieser Bereich über den weitaus größten Teil der Versuchsdauer. Das Verhalten einer Probe im Kriechversuch kann qualitativ auf das Verhalten eines Bauteils unter Zeitstandbeanspruchung übertragen werden. Für die Auslegung von Bauteilen ist daher die Kenntnis der minimalen Kriechrate  $\dot{\epsilon}$  unter der jeweils vorherrschenden Beanspruchung von Interesse. Zu deren Beschreibung wird

häufig das sogenannte Norton'sche Kriechgesetz (Gl. 2.1) herangezogen, das eine Potenzabhängigkeit der Kriechrate von der Spannung angibt [12].

$$\dot{\epsilon} = B f(T) \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^n \quad (2.1)$$

mit:

- $\dot{\epsilon}$  : stationäre Kriechgeschwindigkeit
- $\sigma$  : Spannung
- $\sigma_0$  : Referenzspannung
- $n$  : Spannungsexponent
- $B$  : Konstante, unabhängig von  $n$
- $f(T)$  : temperaturabhängige Funktion (Arrheniusbeziehung)

Der Kriechprozeß führt zu einer Erschöpfung des werkstoffeigenen Verformungsvermögens und begrenzt letztendlich die Lebensdauer eines Bauteils. Der Begriff Erschöpfungsgrad, der in diesem Zusammenhang häufig verwendet wird, bezeichnet die relative Dehnung, bezogen auf die Bruchdehnung [16]. Beim Bruch beträgt er also 100%. Der Erschöpfungsgrad eines Werkstoffs ist zwar nicht direkt meßbar, es ist jedoch bekannt, daß das Auftreten einer irreversiblen Schädigung meist ein Anzeichen für einen hohen Erschöpfungsgrad ist. Der rechtzeitige Nachweis von Zeitstandschädigung spielt deshalb eine entscheidende Rolle bei der Überwachung von Komponenten.

Aus langjährigen Erfahrungen im Betrieb von Kraftwerken sind insbesondere Schweißverbindungen, Formstücke, Armaturen und Rohrbögen als kritische Komponenten bekannt. Schäden in Formstücken und Schweißverbindungen sind meist die Folge lokaler Spannungsspitzen. Das Gefährdungspotential bei derartigen Schäden ist jedoch relativ gering, da in der Regel vor dem Bruch des Bauteils ein Leck auftritt. Schäden an Rohrbögen sind zwar seltener, allerdings kann ihr Ausmaß umso gravierender sein. An Rohrbögen können schwer kalkulierbare Zusatzbeanspruchungen zu einer Spannungsverteilung führen, die eine großflächige und gleichmäßige Schädigung zur Folge hat. Ein Rohrbogen kann daher spontan versagen, ohne daß dem Bruch ein Leck vorausgeht [17].

Das Bruchverhalten warmfester Werkstoffe unter Zeitstandbeanspruchung ist von den Beanspruchungsbedingungen abhängig. Da in der Kraftwerkstechnik Bauteile typischerweise für sehr lange Betriebszeiten unter hoher Temperatur ausgelegt werden, sind die zulässigen mechanischen Spannungen relativ gering. In einem solchen Belastungsfall erfolgt der Bruch in der Regel interkristallin und die Bruchfläche liegt senkrecht zur Hauptspannungsrichtung. In der näheren Umgebung der Bruchfläche sind zahlreiche Mikroporen und Risse nachzuweisen [18].

Neben der Bildung von Poren und Rissen führt eine Zeitstandbeanspruchung auch zu sogenannten reversiblen Gefügeveränderungen, welche durch eine Wärmebehandlung wieder rückgängig gemacht werden können. Darunter versteht man vor allem Ausscheidungs- und Umwandlungsvorgänge, die Vergrößerung von Teilchen und die Neuordnung der Versetzungsstruktur.

Für den Betreiber einer Anlage ist die Kenntnis des Schädigungszustands eines Bauteils wichtig. Dieser wird z.B. durch eine Gefügeuntersuchung der Bauteiloberfläche bestimmt. Wird ein Bauteil als geschädigt identifiziert, stellt sich weiterhin die Frage, ob und wie lange ein weiterer Betrieb zulässig ist. Dies ist vor allem eine Frage der Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften des geschädigten Werkstoffs. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie sich Zeitstandschädigung auf diese Eigenschaften auswirkt.

## **2.2 Einfluß von Zeitstandbeanspruchung auf die Werkstoffeigenschaften**

Die Werkstoffe zeichnen sich durch eine Vielzahl von Eigenschaften aus, nach denen sie eingeteilt und für verschiedene Anwendungszwecke ausgewählt werden. Man kann zwischen technologischen und physikalischen Eigenschaften unterscheiden. Die ersten sind ingenieurmäßig definierte Größen, wie Härte, Festigkeit und Duktilität, die festgelegt wurden, um eine schnelle Auswahl und Auslegung von Werkstoffen für häufig vorkommende Anwendungsfälle zu ermöglichen. Die Bestimmung technologischer Werkstoffkennwerte erfolgt meist zerstörend [19].

Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften können in mechanische, elektrische, thermische und magnetische Eigenschaften unterteilt werden. Diese Einteilung im „klas-



sischen“ Sinn umfaßt diejenigen Eigenschaften, die mit vertretbarem technischen Aufwand an Proben oder Bauteilen meßbar sind. Beispiele dafür sind unter anderem Elastizität, elektrische Leitfähigkeit, magnetische Permeabilität und Wärmeleitfähigkeit. Neben diesen existieren weitere physikalische Effekte, die wegen eines höheren meßtechnischen Aufwands für eine breite technische Anwendung in der zerstörungsfreien Prüfung nur bedingt in Frage kommen.

### **2.2.1 Technologische Eigenschaften**

Für die Auslegung von heißgehenden Bauteilen im Kraftwerk ist die Zeitstandfestigkeit die maßgebende Eigenschaft. Diese ist wesentlich vom Gefüge abhängig. Gefügeveränderungen aufgrund der thermomechanischen Beanspruchung im Betrieb führen folglich auch zu einer Veränderung der Langzeiteigenschaften eines Werkstoffs. Die Festigkeit sowohl bei Raumtemperatur als auch bei hoher Temperatur nimmt im Lauf des Betriebs ab [20, 21]. Dies gilt nicht zwangsläufig auch für die Zähigkeit, welche abhängig von Werkstoff und Ausgangszustand nach einer reversiblen Gefügeschädigung sowohl zu- als auch abnehmen kann. So wurde an niedriglegierten ferritischen Werkstoffen im betriebsbeanspruchten Zustand ohne Zeitstandporen mehrfach eine nahezu dem Ausgangszustand entsprechende Zähigkeit im Kerbschlagbiegeversuch festgestellt [21, 22, 23]. Irreversible Schädigung hingegen führt eindeutig zu einer Abnahme der Zähigkeit. Der Einfluß der Gefügebildung auf die Zeitstandfestigkeit geht aus Untersuchungen hervor, in denen Zeitstandversuche an betriebsbeanspruchtem Material mit metallographisch dokumentiertem Gefüge durchgeführt wurden. Ein Ergebnis solcher Arbeiten ist in Bild 2.3 nach [22] dargestellt.

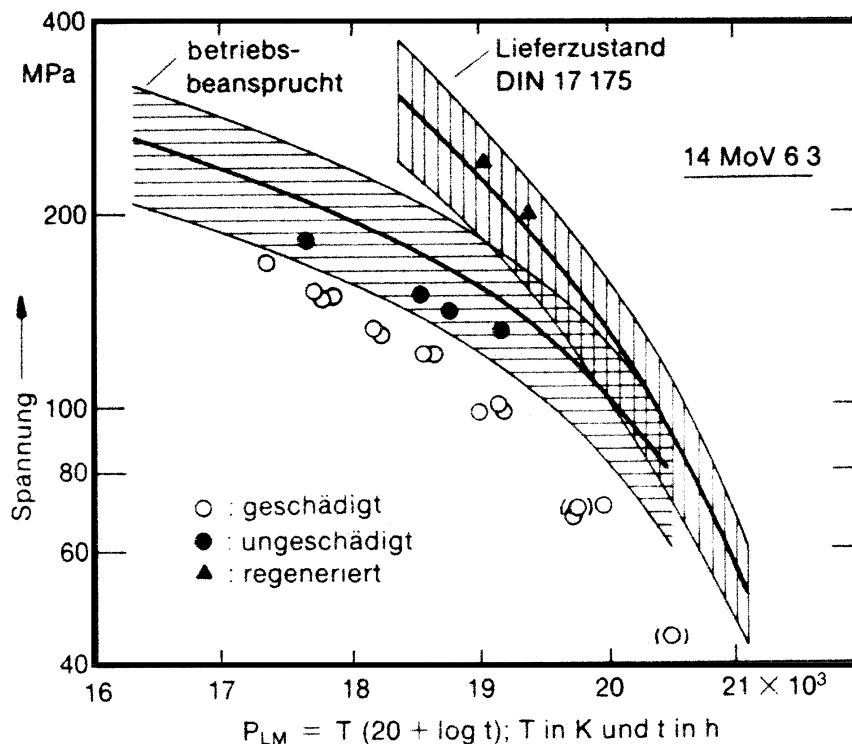


Bild 2.3: Abnahme der Zeitstandfestigkeit durch Betriebsbeanspruchung und Zeitstandschädigung nach [22].

Es geht daraus hervor, daß die Zeitstandfestigkeit des betriebsbeanspruchten, aber noch nicht irreversibel geschädigten Werkstoffs unter dem Streuband des Neuzustands liegt und bei niedriger Spannung in dieses einmündet. Das Auftreten von irreversibler Schädigung führt zu einer weiteren Erniedrigung der Zeitstandfestigkeit. Vor allem aber zeigt die Darstellung in Bild 2.3, daß die Zeitstandfestigkeit betriebsbeanspruchten Materials, das noch nicht irreversibel geschädigt ist, durch eine regenerierende Wärmebehandlung wieder auf das Niveau des Neuzustandes angehoben werden kann. Dies macht den dominanten Einfluß der Gefügeausbildung auf die Zeitstandfestigkeit deutlich.

Irreversible Schädigung drückt die Zeitstandfestigkeitskurve unter das Streuband des Neuzustands. Das gleiche Verhalten kann an ungeschädigtem Material beobachtet werden, welches im Neuzustand einer nicht ordnungsgemäßen Wärmebehandlung unterzogen wurde. Im Fall des irreversibel geschädigten Materials ist eine Wiederherstellung

der Ausgangseigenschaften auch durch eine regenerierende Wärmebehandlung nicht mehr möglich.

### **2.2.2 Physikalische Eigenschaften**

Die physikalischen Eigenschaften der Festkörper sind mehr oder weniger stark vom Gefügestand (z.B.: Korngröße, Art und Größe von Ausscheidungen, Versetzungsstruktur) abhängig. Die Messung physikalischer Festkörpereigenschaften ist deshalb die Grundlage vieler zerstörungsfreier Prüfverfahren. Durch sie ist eine indirekte Schlußfolgerung auf das Gefüge möglich, die oft einfacher durchzuführen ist als eine metallographische Untersuchung.

Betrachtet man einen zeitstandgeschädigten Werkstoff vereinfachend als zweiphasiges Gefüge aus Matrix mit eingelagerten Poren, so wird verständlich, daß ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen physikalischen Eigenschaften und dem Grad der Schädigung vorhanden sein muß. Dieser Zusammenhang wurde in Laboruntersuchungen mehrfach bestätigt. So wird z.B. in [22] an Proben aus einem geschädigten Rohrbogen eine kontinuierliche Veränderung der Dichte, des elektrischen Widerstands, des E-Moduls und der Koerzitivfeldstärke in Abhängigkeit von der Schädigung nachgewiesen. Nachfolgend werden die wichtigsten Werkstoffeigenschaften betrachtet, die für den Nachweis von Zeitstandschädigung von Bedeutung sind.

#### Dichte

Die Dichte steht in einer unmittelbaren Beziehung zur Porosität eines Werkstoffs. Durch eine genaue Dichtemessung ist auch eine Schädigung nachweisbar, die unter Umständen lichtmikroskopisch noch nicht sichtbar ist. Dieser Zusammenhang wurde schon frühzeitig erkannt [81] und mehrfach an geschädigten Bauteilen bestätigt [22].

Die Dichteabnahme bei Stählen liegt erfahrungsgemäß in der Größenordnung von einigen Zehntel Prozent und erreicht erst bei mittlerer bis starker Schädigung die Prozentmarke. Sie kann als ein direktes Maß zur Beurteilung der irreversiblen Schädigung herangezogen werden. Von einer erneuten Wärmebehandlung bleibt die schädigungsbedingte Änderung der Dichte im wesentlichen unberührt.

## Schallgeschwindigkeit und Schalldämpfung

Die Ausbreitung von Ultraschall in einem Material ist wesentlich von dessen elastischen und anelastischen Eigenschaften abhängig.

Ein Material wird als elastisch bezeichnet, wenn es dem Hooke'schen Gesetz gehorcht. Dieses bezieht sich auf den einachsigen Zugversuch. Es besagt, daß die Zugspannung der Dehnung proportional ist, wobei die Proportionalitätskonstante als E-Modul bezeichnet wird. Die Elastizitätstheorie überträgt dieses einachsige Verhalten auf eine mehrachsige Beanspruchung und liefert elastische Konstanten, mit denen die Verformung eines Körpers unter einer beliebigen äußeren Last berechnet werden kann. Die Anzahl der elastischen Konstanten ist von der Kristallstruktur abhängig und reduziert sich für den Fall eines isotropen Werkstoffs auf zwei voneinander unabhängige Größen, die sogenannten Lamé'schen Konstanten  $\mu$  und  $\lambda$ . Durch diese beiden Größen sind sämtliche in der Technik üblichen elastischen Moduln definiert.

Eine in der Forschung häufig angewandte Methode zur Bestimmung der elastischen Konstanten ist die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit. Da die elastischen Konstanten auch von Gefüge und Struktur abhängig sind [77], können bei einer ausreichend hohen Meßgenauigkeit Ultraschallmessungen Rückschlüsse auf Gefügeveränderungen zulassen.

Typische Beispiele metallphysikalischer Prozesse, die mit Hilfe von Ultraschallmessungen nachgewiesen werden können, sind unter anderem Ausscheidungsvorgänge, Erholung, Rekristallisation, Textur und der Ordnungszustand von Legierungen [19, 74, 75, 76].

Auf den Nachweis von Zeitstandschädigung durch Messung der Schallgeschwindigkeit wird später in dieser Arbeit eingegangen (Kap. 4.3).

Neben der Schallgeschwindigkeit ist die Schalldämpfung eine charakteristische Kenngröße, die Informationen über eine Vielzahl struktur- und gefügebedingter Eigenschaften liefert [27]. Die Messung der Schalldämpfung wurde auch im Zusammenhang mit dem Nachweis von Zeitstandschädigung durchgeführt [28, 29, 30].

### Elektrische Leitfähigkeit

Eine charakteristische Eigenschaft der Metalle ist ihre gute elektrische Leitfähigkeit. Dafür ist ihre spezielle Elektronenkonfiguration verantwortlich, die durch eine geringe Anzahl von Valenzelektronen gekennzeichnet ist. Diese können leicht aus dem Atomverband herausgelöst werden und als freie Elektronen Ladung transportieren. Die Elektronen können sich im Kristall jedoch nicht ungestört fortbewegen, sondern werden am Gitter gestreut, woraus ein elektrischer Widerstand resultiert.

Der spezifische elektrische Widerstand, dessen Kehrwert als elektrische Leitfähigkeit bezeichnet wird, ist eine Eigenschaft, die stark von der Struktur abhängig ist. Die Messung der elektrischen Leitfähigkeit ist deshalb in der metallkundlichen Analytik eine häufig angewandte Methode, um z.B. den Reinheitsgrad und Ausscheidungszustand von Legierungen zu bestimmen oder um innere und äußere Spannungen zu messen.

In Untersuchungen an Proben wurde nachgewiesen, daß Zeitstandschädigung zu einer Abnahme der elektrischen Leitfähigkeit führt [30, 22].

### Thermische und magnetische Eigenschaften

Der elektrischen und der Wärmeleitfähigkeit liegen vergleichbare metallphysikalische Vorgänge zugrunde. Dies kommt im Gesetz von Wiedemann und Franz zum Ausdruck, welches besagt, daß ein fester Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen besteht. Die Messung der thermischen Eigenschaften eines Materials führte zur Entwicklung eines sogenannten „Wärmemikroskops“ [31], mit dem Gefügebestandteile aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften detektiert werden. Dieses Verfahren wurde auch zum Nachweis von Zeitstandschädigung verwendet, fand jedoch keine praktische Anwendung [32].

Als Beispiel für den Nachweis von Zeitstandschädigung anhand magnetischer Eigenschaften sei abschließend die Messung der Koerzitivfeldstärke [22] und des Barkhausenrauschens [32] genannt.

## 2.3 Werkstoffentwicklung in der Kraftwerkstechnik

Da die Hochtemperaturverformung vorwiegend über Diffusion und Versetzungsumordnung abläuft, sind zur Erhöhung der Hochtemperaturfestigkeit alle diejenigen Maßnahmen geeignet, die die Diffusion erschweren und die Bewegung von Versetzungen behindern. Speziell bei den warmfesten Stählen wird das durch Zugabe von Legierungselementen erreicht, die mischkristall- und karbidbildend wirken.

Typische Legierungselemente der warmfesten Stähle sind die Karbidbildner Molybdän, Chrom und Vanadium. In fossil befeuerten Kraftwerken älterer Bauart sind vorwiegend niedrig legierte ferritische Stähle im Einsatz. Der einfachste Vertreter dieser Gruppe ist der 15 Mo 3. Molybdän ist ein starker Karbidbildner und verbessert die Hochtemperaturfestigkeit dieses Stahls. Eine weitere Steigerung des Molybdängehalts über 0,5 % bringt jedoch keine wesentliche Verbesserung mehr. Hier hat es sich als günstig erwiesen, Chrom hinzuzulegieren [14]. Mit der Entwicklung der Stähle 13 CrMo 44 und 10 CrMo 9 10 gelang es, die Warmfestigkeit weiter zu erhöhen bei gleichzeitiger Verbesserung der Duktilität. Anstelle von Chrom kann auch Vanadium zulegiert werden. Ein typisches Beispiel dafür ist der 14 MoV 63.

Zu höheren mechanisch-thermischen Beanspruchungen hin folgt die Gruppe der hochlegierten ferritischen Stähle, deren typische Vertreter die 12 % Cr-Stähle sind. Diese enthalten neben Chrom weitere Karbidbildner, vor allem Molybdän und Vanadium. Ihr Gefüge ist martensitisch mit geringen Anteilen an  $\delta$ -Ferrit. Neben einer hohen Zeitstandfestigkeit zeichnen sie sich durch eine gute Oxidationsbeständigkeit aus. Ein Vertreter dieser Gruppe, der sich im Kraftwerksbereich bewährt hat, ist der X20 CrMoV 12 1. Dieser Stahl wird im Temperaturbereich um 540 °C seit vielen Jahren eingesetzt. Unter der Voraussetzung, daß die Wärmebehandlung im Ausgangszustand ordnungsgemäß durchgeführt wurde, erbringt der X20 CrMoV 12 1 ausgezeichnete Langzeiteigenschaften [36].

Die höchste Temperaturbeständigkeit innerhalb der Stähle haben die hochwarmfesten austenitischen Stähle. Das ist primär auf den niedrigen Diffusionskoeffizienten des dichteren kubisch-flächenzentrierten Gitters zurückzuführen [9, 10, 33]. Stabilisatoren, die

zur Vermeidung von interkristalliner Korrosion hinzu gegeben werden, bewirken eine zusätzliche Erhöhung der Warmfestigkeit durch die Bildung fein verteilter Karbide.

Gegen eine breite Anwendung austenitischer Stähle in der Kraftwerkstechnik sprechen vor allem wirtschaftliche Gründe. Aus technischer Sicht erweist sich die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Austenite als ungünstig. Diese führt bei dickwandigen Bauteilen zu einem großen Temperaturgradienten über die Wand. Um übermäßige Wärmespannungen zu vermeiden, müssen daher An- und Abfahrvorgänge wesentlich langsamer erfolgen als bei ferritischen Werkstoffen. Dadurch wird die Flexibilität einer Anlage stark eingeschränkt [34]. Ein weiterer Nachteil der austenitischen Werkstoffe ist deren geringe LCF-Festigkeit. Probleme mit austenitischen Werkstoffen traten deshalb vor allem dort auf, wo Kraftwerke unter häufig wechselnden Beanspruchungen betrieben wurden. Dies führte zum Versagen von austenitischen Dampfleitungen durch Ermüdung und Langzeitversprödung [37].

Eine effiziente Maßnahme zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Produktion ist die Erhöhung der Wirkungsgrade durch Steigerung der Dampfdrücke und –temperaturen [35]. Dies ist jedoch nur möglich, wenn entsprechend leistungsfähige Werkstoffe zur Verfügung stehen [36, 72, 78]. Aufgrund der positiven Erfahrungen mit dem Werkstoff X20 CrMoV 12 1 wird derzeit international die Weiterentwicklung der ferritisch-martensitischen Werkstoffe mit Cr-Gehalten zwischen 9 und 12% forciert [56].

Eine amerikanische Entwicklung innerhalb dieser Werkstoffgruppe ist der X10 CrMoVNb 9 1 (P91), der neben 9% Chrom und 1% Molybdän geringe Mengen an Vanadium, Niob und Stickstoff enthält. Dieser Stahl ist insbesondere bei höheren Temperaturen dem X20 CrMoV 12 1 deutlich überlegen [35, 36, 37, 73], was nicht nur für den Grundwerkstoff, sondern auch für die Schweißnähte gilt [80]. Aufgrund des niedrigeren Cr-Gehalts ist jedoch eine geringe Verschlechterung der Korrosionsbeständigkeit in Kauf zu nehmen [79]. Der P91 wird seit Ende der 80er Jahre als Konstruktionswerkstoff in konventionellen Kraftwerken eingesetzt. Mit ihm werden Dampftemperaturen von 580 bis 600 °C realisierbar.

Auf japanischer Seite ging die Entwicklung hin zu wolframlegierten ferritisch-martensitischen Stählen. Ein typischer Vertreter dieser Gruppe ist der NF 616. Er enthält 9% Chrom, 0,5% Molybdän und 2% Wolfram, sowie geringe Mengen an Vanadium, Ni-

ob und Stickstoff. Die Wirkung des Wolframs beruht auf einer Mischkristallverfestigung. Bisherige Schätzungen gehen davon aus, daß mit den wolframlegierten Stählen eine weitere Steigerung der Zeitstandfestigkeit gegenüber dem P91 erreichbar ist. Da jedoch aufgrund des hohen W-Gehalts eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber der Bildung von Laves-Phase besteht, können genauere Aussagen erst dann getroffen werden, wenn Ergebnisse von Zeitstandversuchen ausreichend langer Dauer vorliegen [35].

Das europäische Gegenstück zum NF 616 ist der Stahl E911 mit 9% Chrom und jeweils einem Prozent Molybdän und Wolfram, von dem ähnlich gute Eigenschaften erwartet werden.

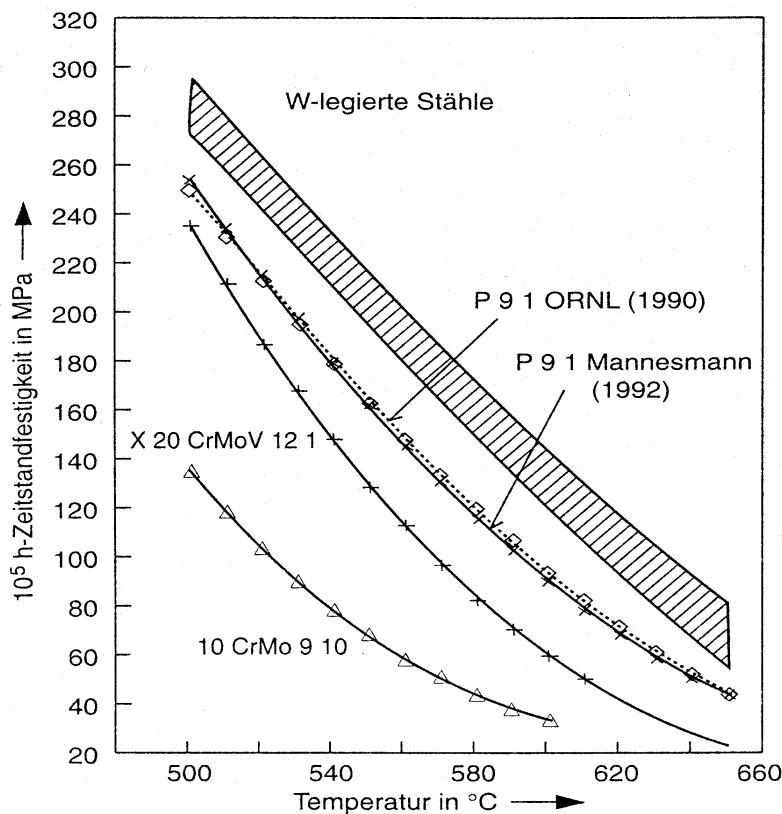


Bild 2.4: Vergleich der Zeitstandfestigkeit von neuen und konventionellen Werkstoffen [37].



Bild 2.4 zeigt einen Vergleich der Zeitstandfestigkeiten der neuen Werkstoffe mit dem 10 CrMo 9-10 und dem X20 CrMoV 12-1. Von den W-legierten Stählen liegen noch nicht genügend Langzeitdaten vor. Das eingezeichnete Streuband dieser Werkstoffgruppe stellt eine Schätzung dar, der die gegenwärtig vorhandenen Daten zugrunde liegen. Dieses Diagramm macht deutlich, welche signifikante Steigerung der Zeitstandfestigkeit durch die aktuelle Werkstoffentwicklung bereits erreicht wurde.

### 3. Grundlagen der Ultraschalltechnik

Unter einer Schallwelle versteht man eine mechanische, elastische Schwingung, die durch einen periodischen Wechsel von Druck, Dichte, Temperatur, Ort und Geschwindigkeit der Materieteilchen im Schallfeld gekennzeichnet ist. Die Ausbreitung des Schalls ist deshalb an ein Medium gebunden und kann im Gegensatz zur elektromagnetischen Welle nicht im Vakuum erfolgen. Es findet dabei jedoch kein Materietransport statt, sondern lediglich ein Transport von Energie durch periodischen Wechsel zwischen potentieller und kinetischer Energie [38, 39].

Ausgehend von dem Bereich des Schalls, der durch das menschliche Gehör wahrgenommen werden kann, teilt man den Frequenzbereich der Akustik folgendermaßen ein:

Infraschall:	$< 20 \text{ Hz}$
hörbarer Schall:	$20 \text{ Hz} - 2 \cdot 10^4 \text{ Hz}$
Ultraschall:	$2 \cdot 10^4 \text{ Hz} - 10^9 \text{ Hz}$
Hyperschall:	$10^9 \text{ Hz} - 5 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$
Phononen:	$> 5 \cdot 10^8 \text{ Hz}$

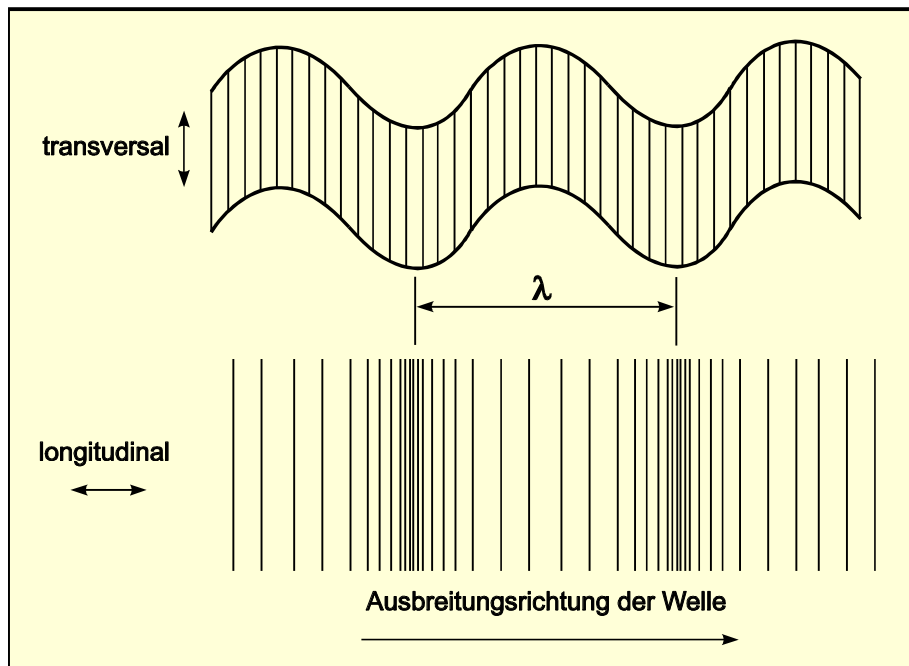
Das Schallfeld ist der Raum, der von der Energie der Schallwelle erfaßt wird. Die Eigenschaften des Schallfeldes werden durch Schallfeldgrößen wie die Schallgeschwindigkeit, die Schallschnelle und die Schallintensität beschrieben. Von diesen Größen ist insbesondere die Schallgeschwindigkeit für die vorliegende Arbeit von Bedeutung.

### 3.1 Schallgeschwindigkeit in festen Körpern

Ein elastischer Festkörper kann durch ein Feder-Masse-Modell beschrieben werden, in dem die Massenpunkte die Atome und die Federn die zwischen ihnen wirksamen Bindungskräfte darstellen.

Wird ein solcher Festkörper an einer Stelle mechanisch angeregt, so überträgt sich die Störung auf die benachbarten Bereiche und pflanzt sich auf diese Weise im gesamten Volumen fort. Die Übertragung der mechanischen Energie von einem Massenpunkt auf den nächsten kann aufgrund von deren Trägheit (Masse) und Nachgiebigkeit nicht beliebig schnell erfolgen. Die Geschwindigkeit, mit der sich eine mechanische Störung in einem Medium ausbreitet, wird als Schallgeschwindigkeit bezeichnet. Sie ist identisch mit der Phasengeschwindigkeit. Die gelegentlich erwähnte Gruppengeschwindigkeit ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Schallimpulses, der in der Regel nicht monofrequenz ist, sondern ein Wellenpaket mit unterschiedlichen Frequenzbestandteilen darstellt. Die Schallgeschwindigkeit in einem elastischen Medium ist also von dessen Masse (bzw. Dichte) und Steifigkeit abhängig. Benutzt man zur Charakterisierung der Steifigkeit den Elastizitätsmodul, so gilt allgemein, daß die Schallgeschwindigkeit umso größer ist, je größer der E-Modul ist und je geringer die Dichte.

In einem unendlich ausgedehnten Körper ohne Grenzflächen gibt es zwei Arten von Wellen, nämlich Longitudinal- und Transversalwellen. Erstere breiten sich durch abwechselnde Kompression und Dilatation des Mediums aus, weshalb sie auch als Druck- oder Dichtewellen bezeichnet werden. Die Bewegungsrichtung der Mediumsteilchen liegt dabei parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Transversalwellen entstehen, wenn das Medium auf Scherung beansprucht wird (Scher- oder Schubwellen). Die Bewegungsrichtung der Teilchen liegt dann senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (Bild 3.1). Gasförmige und flüssige Stoffe können keine Scherkräfte übertragen, weshalb in ihnen auch keine Transversalwellen existieren.



*Bild 3.1: Longitudinal- und Transversalwelle.*

Treten in einem Festkörper Grenzflächen auf, so können weitere Wellenarten hinzukommen, von denen jede ihre charakteristische Schallgeschwindigkeit besitzt, die unter Umständen nicht nur von der Dichte und den elastischen Eigenschaften abhängig ist, sondern auch vom Verhältnis der Wellenlänge zu den geometrischen Abmessungen des Körpers. In Körpern mit freien Oberflächen existieren neben den transversalen und longitudinalen Volumenwellen auch Wellenarten, die sich entlang von Oberflächen ausbreiten und die nur begrenzt in den Werkstoff eindringen. Sie werden deshalb als Oberflächenwellen bezeichnet. Im einfachsten Fall mit nur einer freien Oberfläche spricht man von einem halbunendlichen Körper. Eine wichtige Art von Oberflächenwelle auf einem halbunendlichen Körper ist die nach ihrem Entdecker Lord Rayleigh [40] bezeichnete Rayleighwelle.

Unendlich ausgedehnte Platten mit begrenzter Dicke haben zwei Oberflächen. Auf ihnen werden die sogenannten Lamb-Wellen [41] beobachtet, deren Schallenergie ähnlich den Rayleighwellen in die Tiefe relativ schnell abnimmt.

Desweiteren gibt es auf stab- und plattenförmigen Körpern mit rundem oder rechteckigem Querschnitt sogenannte Biege- und Dehnwellen mit jeweils charakteristischer Schallgeschwindigkeit. Tabelle 3.1 gibt eine Zusammenstellung der Schallgeschwindigkeiten einiger wichtiger Wellenarten.

Wellenart	Schallgeschwindigkeit
Longitudinalwelle	$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$
Transversalwelle	$c_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$
Rayleighwelle	$c_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$
Dehnwelle, stabförmiger Körper	$c_{D,St} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$
Dehnwelle, plattenförmiger Körper	$c_{D,Pl} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$
Biegewelle, stabförmiger Körper	$c_{B,St} = \sqrt[4]{\frac{E r^2}{4\rho}} \sqrt{\omega}$
Biegewelle, plattenförmiger Körper	$c_{B,Pl} = \sqrt[4]{\frac{E h^2}{12\rho(1-\nu^2)}} \sqrt{\omega}$
E: Elastizitätsmodul                      r: Stabradius ρ: Dichte                                      h: Plattendicke ν: Querkontraktionszahl                ω: Kreisfrequenz	

Tab. 3.1: Schallgeschwindigkeiten verschiedener Wellenarten in Festkörpern, ausgedrückt durch die elastischen Konstanten  $E$  und  $\nu$ .

Wie die Gleichungen in Tabelle 3.1 zeigen, sind die Schallgeschwindigkeiten der verschiedenen Wellen, mit Ausnahme der Biegewelle, unabhängig von der Frequenz. Die Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit wird als Dispersion bezeichnet.

## 3.2 Rayleigh- und Lambwellen

### 3.2.1 Rayleighwellen

Rayleighwellen breiten sich auf der Oberfläche von Körpern aus und folgen dabei nahezu beliebigen Konturen. Sie dringen nur begrenzt in den Werkstoff ein, so daß sich der Großteil der Schallenergie auf eine Schicht von etwa der Dicke einer Wellenlänge beschränkt. Ihre Eindringtiefe steht deshalb in einem festen Zusammenhang zur Wellenlänge bzw. Frequenz.

Die Energie einer Rayleighwelle nimmt in die Tiefe rasch ab. Bild 3.2 zeigt schematisch die relative Bewegungsamplitude der Teilchen in Abhängigkeit von der auf die Wellenlänge normierten Eindringtiefe. Der dargestellte Verlauf unterliegt geringen Abweichungen in Abhängigkeit von der Querkontraktionszahl des jeweiligen Materials.

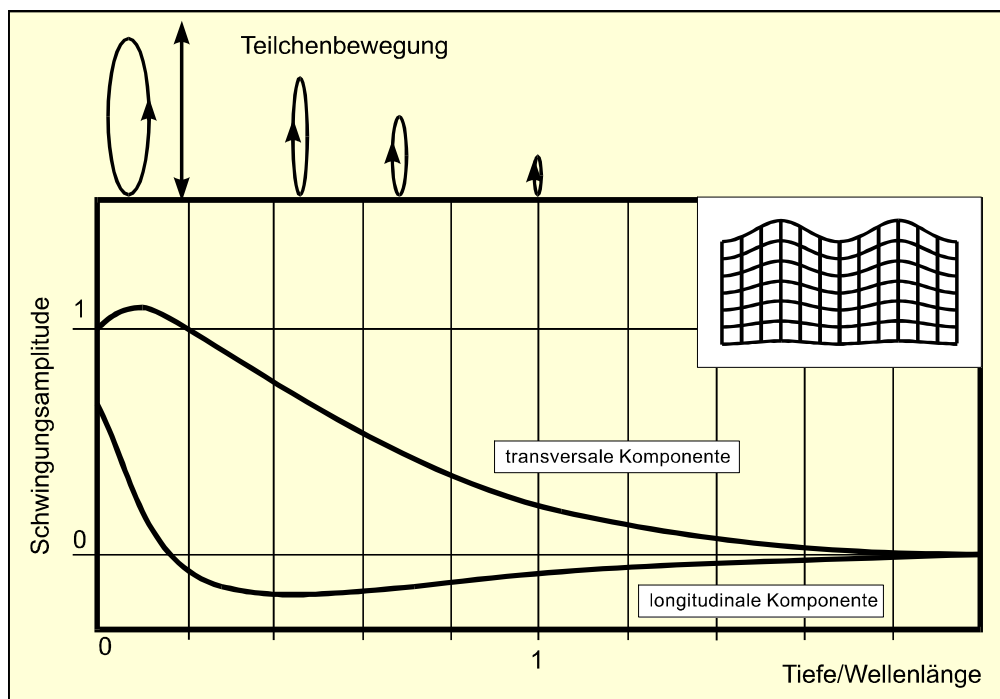


Bild 3.2: Abnahme der Schwingungsamplitude einer Rayleighwelle in die Tiefe.

Die Teilchenbewegung setzt sich aus einer longitudinalen (parallel zur Ausbreitungsrichtung) und einer transversalen Komponente (senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, in die Tiefe) zusammen. In der Summe ergibt sich eine elliptische Bahnbewegung der Teilchen. In einer Tiefe von etwa  $0,18 \lambda$ , dort wo die longitudinale Komponente in den negativen Bereich übergeht, kehrt sich die Rotationsrichtung der Ellipse um.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle (vgl. Tab. 3.1) ist etwas geringer als die der Transversalwelle. Je nach Werkstoff und Querkontraktionszahl liegt ihre Geschwindigkeit zwischen  $0,87$  und  $0,96 \cdot c_T$  [42]. Da die Ausbreitung der Rayleighwellen mehr oder weniger zweidimensional erfolgt, werden sie weniger stark gedämpft als Volumenwellen und können relativ weite Entfernungen zurücklegen.

Streng genommen existieren Rayleighwellen nur auf einem halbumendlichen Körper. Tatsächlich können sie jedoch auch auf räumlich begrenzten Körpern erzeugt werden, solange deren Abmessungen groß im Vergleich zur Rayleigh-Wellenlänge sind.

Zur Erzeugung von Rayleighwellen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Eine ausführliche Zusammenstellung darüber liegt in [43] vor. An dieser Stelle soll nur eine Methode angesprochen werden, die in der Literatur häufig beschrieben wird, und die auch in dieser Arbeit angewendet wird. Bei dieser Methode wird ein normaler Senkrecht-Prüfkopf mit einer keilförmigen Vorlaufstrecke versehen, um den Schall in einem bestimmten Winkel auf die Bauteiloberfläche zu leiten (Bild 3.3).

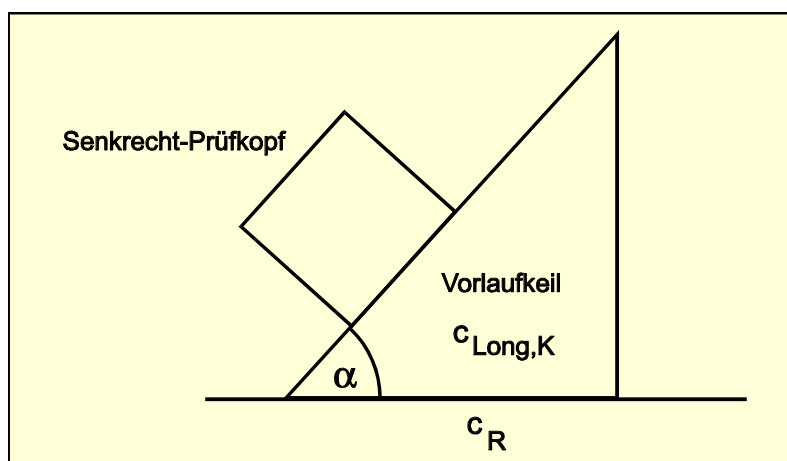


Bild 3.3: Erzeugung von Rayleighwellen mit Hilfe der „Keilmethode“.

Der Keilwinkel  $\alpha$  ist nach Gleichung (3.1) auf das Material des Keils und des zu untersuchenden Werkstoffs abzustimmen.

$$\sin \alpha = \frac{c_{Long,K}}{c_R} \quad \text{Gl. (3.1)}$$

mit:

$c_{Long,K}$  : longitudinale Schallgeschwindigkeit des Keilmaterials

$c_R$  : Rayleighwellengeschwindigkeit des zu untersuchenden Materials

Da die longitudinale Schallgeschwindigkeit des Keilmaterials kleiner sein muß als die Rayleighwellengeschwindigkeit des zu untersuchenden Materials, ist die Werkstoffwahl eingeschränkt. Für die Erzeugung von Rayleighwellen auf Stahl werden meist Vorlaufkeile aus Plexiglas verwendet.

In der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden Rayleighwellen vor allem zum Nachweis von oberflächennahen Fehlern eingesetzt, da sie auch komplex geformten Konturen folgen können [44]. Weitere Anwendungsbeispiele sind der Nachweis von inneren Spannungen [41, 45] und die Bestimmung von Oberflächeneigenschaften, wie z.B. der Einhärtetiefe randschichtgehärteter Bauteile [46, 47].

Für die Anwendung in der Ultraschall-Laminographie eignen sich die Rayleighwellen insbesondere aufgrund der folgenden drei Eigenschaften.

Zum einen können sie auf einfache Weise erzeugt und bei entsprechender Zugänglichkeit an nahezu beliebigen Stellen der Oberfläche abgegriffen werden. Damit wird eine wichtige Forderung für die Anwendung an realen Bauteilen erfüllt, nämlich die Prüfung bei nur einseitiger Zugänglichkeit. Desweiteren erfaßt die Rayleighwelle nur den oberflächennahen Bereich. Da Zeitstandschädigung bevorzugt an der Außenoberfläche der betreffenden Bauteile auftritt, kann damit selektiv der am stärksten gefährdete Werkstoffbereich untersucht werden. Als dritte und wichtigste Eigenschaft ist die Abhängigkeit der Eindringtiefe von der Wellenlänge zu nennen. Im typischen Fall ist ein Bauteil an der Außenoberfläche am stärksten geschädigt, so daß in die Tiefe ein Gradient abnehmender Schädigung vorliegt. Bei der Ultraschall-Laminographie macht man sich diesen Umstand dadurch zunutze, daß der Werkstoff ausgehend von der Oberfläche mit Wellen



zunehmender Eindringtiefe abgetastet wird. Durch diese Vorgehensweise kann man feststellen, ob eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit vorhanden ist und wie deren Verlauf in die Tiefe aussieht. Setzt man voraus, daß eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit als ein Maß für Zeitstandschädigung genommen werden kann, so ist damit das Auffinden von geschädigten Bereichen und eine Aussage über die effektive Dicke der geschädigten Schicht möglich.

### 3.2.2 Lambwellen

Lambwellen sind die charakteristische Wellenart auf unendlich ausgedehnten Platten endlicher Dicke. Ihre Teilchenbewegung erfolgt ähnlich der Rayleighwelle sowohl in Ausbreitungsrichtung der Welle als auch senkrecht zur Plattenebene. Die Schallgeschwindigkeit der Lambwelle ist neben den elastischen Eigenschaften und der Dichte auch vom Verhältnis der Plattendicke zur Wellenlänge und somit von der Frequenz abhängig (Dispersion).

Es gibt eine unbegrenzte Anzahl von Moden der Lambwellen, die in zwei Typen eingeteilt werden können, in symmetrische und asymmetrische Moden. Diese Einteilung orientiert sich an der Symmetrie der Teilchenauslenkung auf beiden Oberflächen der Platte bezogen auf ihre Mittelebene (Bild 3.4).

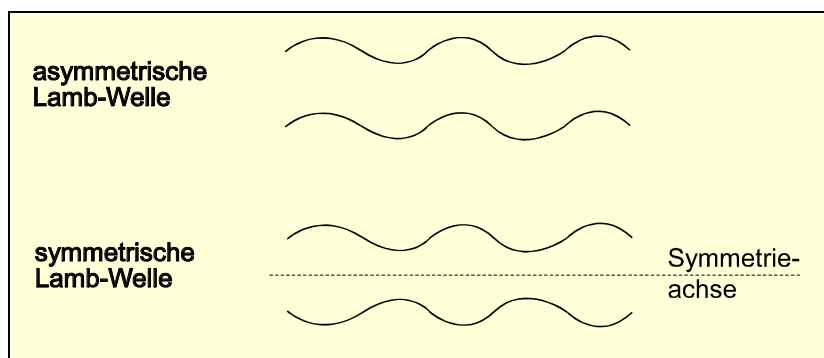


Bild 3.4: Symmetrische und asymmetrische Lambwelle.

Bild 3.5 zeigt die Dispersionskurven der ersten Lamb-Moden. Bei den symmetrischen Lambwellen ist die longitudinale Komponente der Teilchenbewegung (in Ausbreitungsrichtung der Welle) auf beiden Seiten der Platte gleichgerichtet. Sie werden auch als longitudinale Moden bezeichnet. Für die erste symmetrische Lambwelle ( $s_0$  in Bild 3.5) wird auch häufig die Bezeichnung Dehnwelle (Dehnungswelle) benutzt.

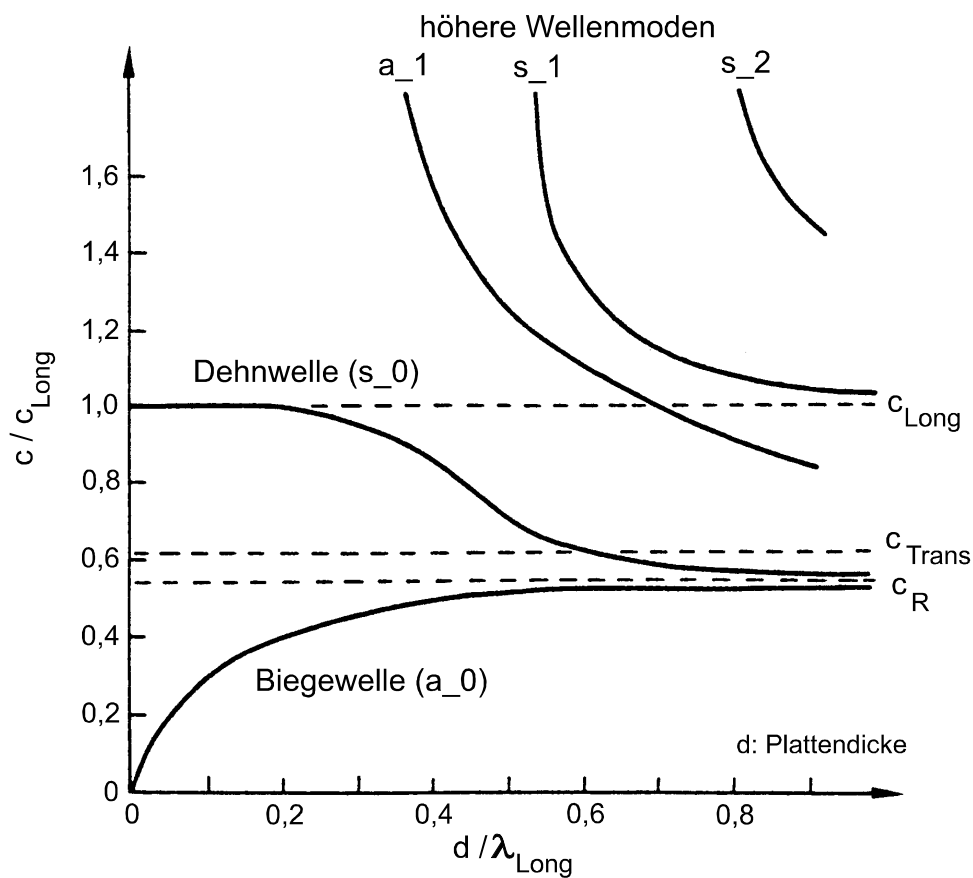


Bild 3.5: Erste Wellenmoden der Lambwelle.

Die asymmetrischen Moden mit auf beiden Seiten gleichgerichteter transversaler Komponente werden als Biegemoden („flexural modes“) bezeichnet. Für die erste asymmetrische Lambwelle ( $a_0$  in Bild 3.5) ist auch der Begriff Biegewelle üblich.

Die Schallgeschwindigkeiten der ersten symmetrischen und asymmetrischen Lambwelle ( $a_0$ ,  $s_0$ ) nähern sich mit zunehmendem Verhältnis von Plattendicke zu Wellenlänge

asymptotisch der Geschwindigkeit der Rayleighwelle an. Dies kann so gedeutet werden, daß die Platte mit zunehmender Dicke der Idealisierung des halbumendlichen Körpers gleichkommt und die Lambwelle in zwei Rayleighwellen auf beiden Oberflächen der Platte aufspaltet.

### **3.3 Ultraschall in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung**

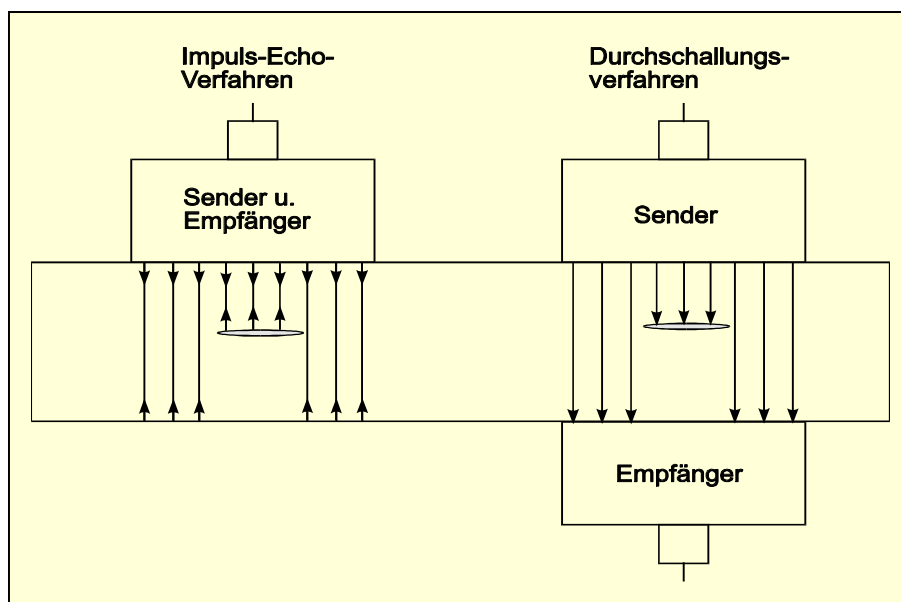
Der größte Vorteil von Ultraschall gegenüber hörbarem Schall liegt in seiner Kurzwelligkeit, die zu einer wellenlängenabhängigen Bündelung führt. Dadurch kann Ultraschall gezielt in eine Richtung geleitet werden. Durch Bündelung ist es möglich, auch noch in relativ großer Entfernung vom Schallerzeuger ausreichend hohe Schallintensitäten zu erreichen, um den Schallstrahl entweder zur Verrichtung von Arbeit oder zur Übertragung von Information zu benutzen.

Neben vielen anderen Bereichen der Technik wird Ultraschall insbesondere in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung angewendet. Der Hauptanwendungszweck liegt hierbei im Auffinden und Beurteilen von verschiedenartigen Ungängen in geschmiedetem, gegossenem oder gewalztem Material. Die Nachweisbarkeit von Ungängen ist nicht nur von deren Größe und Lage abhängig, sondern in besonderem Maße auch von den akustischen Eigenschaften. Je mehr sich eine Ungänge in ihren akustischen Eigenschaften vom umgebenden Material unterscheidet, umso mehr Schallenergie wird an ihrer Grenzfläche zum Grundmaterial reflektiert.

Daneben kann Ultraschall auch zur Bestimmung von mechanischen Kennwerten und zur Wanddickenmessung verwendet werden.

Man unterscheidet im wesentlichen zwei Verfahren, das Durchschallungs- oder Schatten-Verfahren und das Impuls-Echo-Verfahren (Bild 3.6). Im Laufe der historischen Entwicklung entstand zuerst das Durchschallungsverfahren, bei dem ein von einem Sender erzeugtes Signal das zu prüfende Medium durchläuft und auf der anderen Seite von einem zweiten Prüfkopf empfangen wird. Befinden sich Fehlstellen in der durchschallten Strecke, so wird ein Teil der Schallwellen reflektiert, was sich in einer Abnahme der empfangenen Schallintensität bemerkbar macht.

Beim Impuls-Echo-Verfahren, das heute überwiegend in Gebrauch ist, wird ein Schallimpuls durch das Werkstück geschickt und nach einmaliger oder mehrfacher Reflexion an der Rückwand vom selben oder einem anderen Prüfkopf wieder empfangen. Das ausgesandte Signal und die empfangenen Rückwandechos werden auf einer Kathodenstrahlröhre sichtbar gemacht. Ist ein Werkstück fehlerfrei, so werden nur die von der Rückwand erzeugten Echos empfangen. Trifft die Schallwelle dagegen auf eine genügend große Fehlstelle, so wird ein Teil von ihr vorzeitig reflektiert und erzeugt auf der Kathodenstrahlröhre ein vor dem Rückwandecho liegendes Fehlerecho. Aus der Lage des Fehlerechos auf dem Bildschirm kann die Tiefe des Fehlers bestimmt werden.



*Bild 3.6: Prinzip des Impuls-Echo- und des Durchschallungsverfahrens.*

Das Auffinden eines Fehlers ist jedoch in der Regel nicht ausreichend, sondern es gilt auch, dessen Größe und Form zu bestimmen, um zu beurteilen, ob der aufgefundene Fehler zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit des betreffenden Bauteils führt. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, daß die Fehlstelle von verschiedenen Positionen aus und mit verschiedenen Einschallwinkeln angepeilt wird [48]. Dadurch wird sie sozusagen geometrisch vermessen.

In der modernen Ultraschall-Diagnostik wird heute versucht, nicht nur das Vorhandensein von Fehlerechos zu registrieren, sondern auch zusätzliche Größen, wie z.B. die Echoform und -dynamik oder die Schallschwächung zu berücksichtigen. In Kombination mit modernen Datenerfassungs- und verarbeitungssystemen führt dies zu einer weiteren Verbesserung der Aussagefähigkeit von Ultraschalluntersuchungen.

## **4. Nachweis von Zeitstandschädigung**

### **4.1 Konventionelle Methoden**

An zeitstandbeanspruchten Bauteilen werden in regelmäßigen Abständen zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt. Art und Umfang der Maßnahmen sind in TRD 508 [3] festgelegt. Die Prüfung erfolgt im wesentlichen durch konventionelle zerstörungsfreie Prüfmethoden.

Als erste und wichtigste Prüfmethode ist die Sichtprüfung der Außen- und Innenoberfläche anzusehen. Sie ermöglicht den Nachweis makroskopischer Fehlstellen, wozu in erster Linie Risse und Angriffe durch Korrosion und Erosion zählen. Zur Prüfung der Rohrippenseite stehen geeignete Innenbesichtigungsgeräte und Endoskope zur Verfügung. Zeitstandschädigung tritt erfahrungsgemäß zuerst an der Außenoberfläche auf. Dort bietet sich als optimale Ergänzung zur Sichtprüfung die Oberflächenrißprüfung an. Man unterscheidet im wesentlichen zwei Verfahren, die Eindringprüfung und die Magnetpulverprüfung. Beide eignen sich gut zum Nachweis feiner Risse, die mit dem bloßen Auge nicht mehr erkennbar sind.

Mit dem Eindringverfahren werden nur Risse entdeckt, die bis an die Oberfläche reichen. Probleme können auftreten, wenn Risse z.B. durch Schmutz und Korrosionsprodukte zugeschmiert sind. Mit dem Magnetpulververfahren können auch Risse nachgewiesen werden, die nicht bis an die Oberfläche reichen oder die von außen verschlossen sind. Da es nur auf ferromagnetische Werkstoffe anwendbar ist, können damit keine Bauteile aus austenitischen Werkstoffen geprüft werden.

Während einer langandauernden Zeitstandbeanspruchung erfährt der Werkstoff durch den Prozeß des Kriechens eine zeitabhängige bleibende Dehnung. Das Ausmaß dieser bleibenden Verformung läßt in gewissem Maße Rückschlüsse auf die Erschöpfung eines Bauteils zu. Aus diesem Grund werden an ausgesuchten Stellen in bestimmter zeitlicher Aufeinanderfolge Aufweitungsmessungen durchgeführt. Da die Kriechdehnungen sehr gering sind, ist eine möglichst hohe Meßgenauigkeit notwendig. Um diese zu erreichen, ist es erforderlich, stets an exakt den selben Stellen unter den selben Bedingun-

gen (gleiches Meßgerät, gleiche Bauteiltemperatur) zu messen. Die Aufweitungsmessung kann sowohl über den Rohrumfang als auch den Rohrdurchmesser erfolgen. Die Bestimmung des Rohrdurchmessers an verschiedenen Positionen über den Umfang erlaubt die Feststellung der Rohrunrundheit und deren zeitlicher Veränderung. Mit der Messung des Rohrumfangs kann die Kriechdehnung unabhängig von der Ovalität bestimmt werden.

Das derzeit einzige Verfahren zum Nachweis von Zeitstandschädigung in einem frühzeitigen Stadium ist die Bauteilmetallographie [2]. Hierbei wird die Bauteiloberfläche an einer lokal begrenzten Stelle geschliffen, mechanisch oder elektrolytisch poliert und anschließend geätzt. Auf die so vorbereitete Oberfläche wird eine spezielle Folie aufgedrückt, auf der sich ein Negativabdruck des Gefüges einprägt. Dieser kann unter dem Licht- oder Rasterelektronenmikroskop betrachtet werden. Auf dem Abdruck ist das Gefüge des Werkstoffs erkennbar, und es können selbst einzelne Mikroporen nachgewiesen werden. Da Zeitstandschädigung fast immer an der äußeren Oberfläche beginnt, hat sich dieses Verfahren zum Nachweis etabliert. Es ist jedoch auch mit einigen Nachteilen behaftet. Die Entnahme der Gefügeabdrücke ist mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden und liefert nur eine Information über den Gefügezustand an einer kleinen Stelle. Hinzu kommt, daß keine Aussage über den Verlauf der Schädigung in die Tiefe möglich ist.

Die Ultraschallprüfung im konventionellen Sinn ist nur zum Nachweis von makroskopischen Fehlstellen geeignet. Mit einer maximalen Auflösung in der Größenordnung von ca. 0,1 mm ist nur eine fortgeschrittene Schädigung in Form von Rissen erkennbar. Der Nachweis einzelner Mikroporen ist damit nicht möglich.

## **4.2 Verfahren im Entwicklungsstadium**

Weil die bisherigen Verfahren alle mit gewissen Nachteilen behaftet sind, wird nach weiteren zerstörungsfreien Prüfmethode n gesucht. Derzeit sind mehrere Methoden in Erprobung. Ein Ansatz ist die kontinuierliche Messung der Kriechdehnung mit Hilfe von temperaturkompensierten, kapazitiven Dehnmeßstreifen. Bei diesem Verfahren werden

an ausgesuchten, kritischen Stellen Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen mit hoher Langzeitstabilität angebracht, mit denen die Kriechdehnung während des Betriebs registriert werden kann [49, 50]. Die bisher durchgeführten Untersuchungen haben positive Ergebnisse erbracht, wobei die Kriechdehnungsmessung dann besonders aussagekräftig ist, wenn sie von Betriebsbeginn an durchgeführt wird.

Eine kostengünstige Alternative zu den Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen ist die sogenannte TCR- (TÜV-Creep-Replica-) Methode [51, 52]. Hierbei werden zwei Meßmarken in einem festen Abstand zueinander durch Punktschweißung auf dem Bauteil fixiert. Die Registrierung der Abstandsänderung der Meßmarken erfolgt im Rahmen von Revisionen mit Hilfe eines Gefügeabdruckes.

Andere Prüfmethode basieren auf der Messung physikalischer Kenngrößen, die sich in Abhängigkeit von der Zeitstandsbeschädigung ändern.

Eine gängige Methode zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften eines Materials ist die Messung der Ausbreitungseigenschaften von Ultraschall. Die Schallausbreitung in einem Festkörper kann durch die Schallgeschwindigkeit und die Schalldämpfung charakterisiert werden. Die Schallgeschwindigkeit ist von der Dichte und den elastischen Eigenschaften eines Materials abhängig. Für die Dämpfung sind Wechselwirkungen der Schallwelle mit Gefügebestandteilen des Werkstoffs verantwortlich [27]. Ultraschallmessungen sind deshalb gut geeignet, um Veränderungen der elastischen und anelastischen Eigenschaften nachzuweisen.

Die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit ist heute im Labor mit hoher Genauigkeit möglich und wird auch zum Nachweis von Zeitstandsbeschädigung angewendet (Kap. 4.3). Dämpfungsmessungen wurden ebenso mit Erfolg durchgeführt [30]. Die Untersuchungen zeigen, daß die Bildung von Zeitstandsporen im Werkstoff zu einer Zunahme der Dämpfung führt. Die Ursache dafür ist die Streuung der Schallwelle an den Poren.

Als Beispiel eines mikromagnetischen Verfahrens ist die Messung des Barkhausenrauschens zu nennen [32, 53]. Bei der Magnetisierung findet ein sprunghaftes Umklappen von Blochwänden statt. Dieses Umklappen erzeugt akustische Signale, die als Barkhausenrauschen bezeichnet werden. Die Beweglichkeit der Blochwände ist stark strukturabhängig und wird von Gefügeinhomogenitäten wie Ausscheidungen und Poren behindert. Die Untersuchungen an zeitstandsgeschädigtem Material sind derzeit noch nicht



eindeutig, da dieses Verfahren nicht nur auf Poren, sondern auch auf rein thermisch bedingte Gefügeveränderungen sensibel reagiert.

Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit als Folge von Zeitstandschädigung sind ebenfalls Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Der elektrische Widerstand entsteht durch Streuung der Elektronenbewegung am Kristallgitter und an Inhomogenitäten des Gitters. Die Zunahme des elektrischen Widerstands infolge von Porosität ist sowohl theoretisch als auch experimentell eingehend untersucht worden [30, 53, 54, 55]. An Proben ist eine hohe Meßgenauigkeit erreichbar, so daß sich hier die Messung der elektrischen Leitfähigkeit grundsätzlich zum Nachweis von Zeitstandschädigung eignet. Für die Messung der elektrischen Leitfähigkeit an Bauteilen, insbesondere solchen aus ferromagnetischen Werkstoffen, stehen jedoch keine geeigneten Geräte zur Verfügung, mit denen die zum Nachweis von Zeitstandschädigung notwendige Meßgenauigkeit erreicht wird.

Veränderungen der Wärmeleitfähigkeit als Folge von Zeitstandschädigung finden Anwendung in einem sogenannten Wärmemikroskop, das auch zum Nachweis von Zeitstandschädigung erprobt wurde [31]. Die von diesem Gerät aufgezeichneten Wärmebilder erreichen Auflösungen, die denen metallographischer Schlißbilder nahe kommen. Beim Nachweis von Zeitstandschädigung hat sich vor allem die Unterscheidung zwischen Poren und anderen Gefügebestandteilen als schwierig erwiesen.

Schließlich sei noch die Messung der Neutronen-Kleinwinkelstreuung [57, 71] erwähnt. Bei diesem Verfahren werden Proben mit Hilfe von Neutronen durchstrahlt, wobei eine hohe Auflösung erreicht wird. Probleme bereitet jedoch die Unterscheidung der einzelnen Gefügeinhomogenitäten.

### 4.3 Nachweis von Zeitstandschädigung durch Schallgeschwindigkeitsmessungen

Die Messung der Ultraschallgeschwindigkeit ist eine gebräuchliche Methode zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften eines Werkstoffs. Dem liegt die in Gleichung (4.1) angegebene Beziehung zugrunde.

$$\text{Schallgeschwindigkeit} \sim \sqrt{\frac{\text{elastische Größe}}{\text{Dichte}}} \quad \text{Gl. (4.1)}$$

Die Schallgeschwindigkeit ist demnach nur von den elastischen Konstanten und der Dichte abhängig. Für den Nachweis von Zeitstandschädigung gilt es somit zu klären, welchen Einfluß die Schädigung auf diese Größen ausübt, wobei hier das Augenmerk insbesondere auf die irreversible Schädigung gerichtet werden soll. In der Literatur wird im wesentlichen von zwei Ansätzen ausgegangen, der Streutheorie und der Elastizitätstheorie.

In der Streutheorie werden die Poren als Inhomogenitäten betrachtet, die durch Streuung der Schallwelle zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit führen. Es gibt mehrere Arbeiten [58, 59, 60, 61], in denen der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Porosität eingehend untersucht wird. Unter Berücksichtigung der für die vorliegende Arbeit relevanten Randbedingungen - geringe Porosität, kleine Porengröße und niedrige Frequenz - können die wesentlichen Aussagen dieser Arbeiten qualitativ folgendermaßen zusammengefaßt werden:

- 1) Die Schallgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Porosität ab.
- 2) Die Abnahme ist bei kugelförmigen Poren am geringsten und wird größer, je mehr die Poren von der Kugelform abweichen.
- 3) Die Abnahme der transversalen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Porosität ist geringer als die der longitudinalen.
- 4) Bei geringer Porosität (< ca. 5 Vol%) ist die Abnahme annähernd linear.

Betrachtet man das Phänomen der Streuung, so ist auch zu klären, wie groß der Einfluß der Poren im Vergleich zu anderen Gefügeinhomogenitäten, insbesondere zu nichtmetallischen Einschlüssen und Korngrenzen, ist. Der Grad der Streuung an der Grenzfläche zwischen zwei Medien hängt vom Unterschied in deren akustischer Impedanz  $Z$  ( $Z = \rho c$ ,  $\rho$ : Dichte,  $c$ : Schallgeschwindigkeit) ab. Dieser ist für die Grenzfläche Metall/Pore wesentlich größer als für die Grenzfläche zwischen Metall und Einschuß. Deshalb tragen Poren deutlich stärker zur Streuung bei als nichtmetallische Einschlüsse [61]. Die Streuung an den Korngrenzen ist gering, solange die Wellenlänge deutlich größer ist als die Korngröße [61], was in dieser Arbeit uneingeschränkt zutrifft.

Ein zweiter Ansatz ist die Anwendung der linear elastischen Theorie auf ein zweiphasiges Gefüge aus homogener, metallischer Matrix mit eingelagerter Fremdphase. Für den Spezialfall von Poren als Einlagerungsphase zeigt sich in ähnlicher Weise, daß die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Porosität abnimmt [77]. Aktuelle Arbeiten auf diesem Gebiet [62] liefern Gleichungen zur Bestimmung der Porositätsabhängigkeit der elastischen Konstanten, die auch die Form und Verteilung der Poren berücksichtigen. In der vorliegenden Arbeit wird von diesen Gleichungen Gebrauch gemacht.

#### **4.3.1 Beispiele experimenteller Ergebnisse aus der Literatur**

Die Schallgeschwindigkeit gilt makroskopisch betrachtet als Werkstoffkonstante. Gefügeabhängige Änderungen der Schallgeschwindigkeit bewegen sich nur innerhalb einer schmalen Bandbreite. Zur Abschätzung der zu erwartenden Meßeffekte und zu deren Beurteilung wird nachfolgend ein repräsentativer Ausschnitt aus in der Literatur verfügbaren experimentellen Daten zusammengestellt. Es werden vor allem solche Arbeiten betrachtet, die hinsichtlich Werkstoff und Versuchsbedingungen einen bedingten Vergleich mit den Messungen dieser Arbeit zulassen.

In [63] und [64] wird die Änderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Schädigung an einem ferritischen Stahl mit 0.5% Cr, 0.5% Mo und 0.25% V untersucht. Die Messungen wurden an einer bei 600 °C und 70 MPa bis zum Bruch gefahrenen

Zeitstandprobe durchgeführt, die in 11 Bereiche unterteilt wurde. Zone 11 liegt unmittelbar neben der Bruchfläche und Zone 1 ist ungeschädigt. Entsprechend dieser Einteilung werden 11 Schädigungsgrade unterschieden.

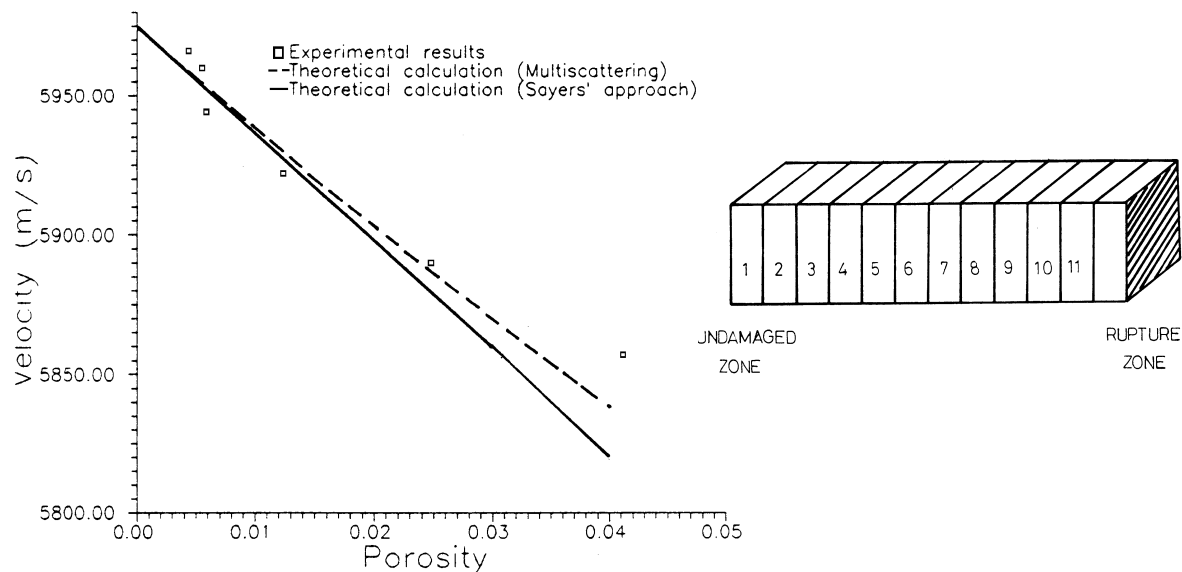
In [63] wird sowohl die Schallgeschwindigkeit gemessen, als auch die Porosität der verschiedenen Schädigungsgrade metallographisch bestimmt. Die entsprechenden Daten sowie eine Auftragung der Schallgeschwindigkeit über der Porosität sind in Bild 4.1 zusammengestellt. Die maximale Abnahme der Schallgeschwindigkeit beträgt etwa 2% bei einer maximalen Porosität von 4 Vol.%.

**Table 1** Velocity values for different damage degrees

Zone	Velocity (m s <sup>-1</sup> )
5	5970 ± 40
6	5960 ± 40
7	5940 ± 42
8	5920 ± 45
9	5890 ± 35
10	5850 ± 45

**Table 2** Metallographic porosity values

Zone	Porosity × 10 <sup>3</sup>
5	4.5 ± 0.3
6	5.5 ± 0.3
7	5.8 ± 0.3
8	12.5 ± 0.6
9	24.6 ± 0.8
10	41.0 ± 1.3



**Bild 4.1:** Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zeitstandporosität nach [63].

In [65] wird an einem ferritischen 2.25% Cr- 1% Mo-Stahl im Kriechversuch bei 620 °C und 100 MPa eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit um ca. 0.8% nach einer Versuchsdauer von 90% der Bruchzeit gemessen.

In [66] werden Proben aus einem zeitstandgeschädigten Rohrbogen aus 14 MoV 6-3 untersucht, an dem nach 130.000 Betriebsstunden bei 535 °C ein Leck auftrat. Die Abnahme der Schallgeschwindigkeit an Material der Schädigungsstufe 4 beträgt ca. 2.5% für die longitudinale und ca. 1.2% für die transversale und die Rayleigh-Schallgeschwindigkeit (Bild 4.2).

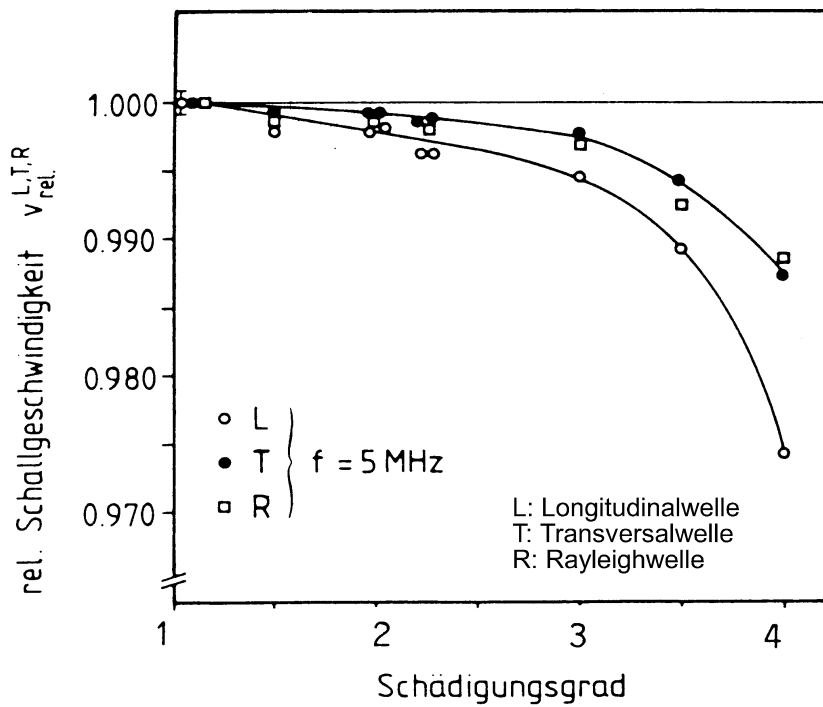
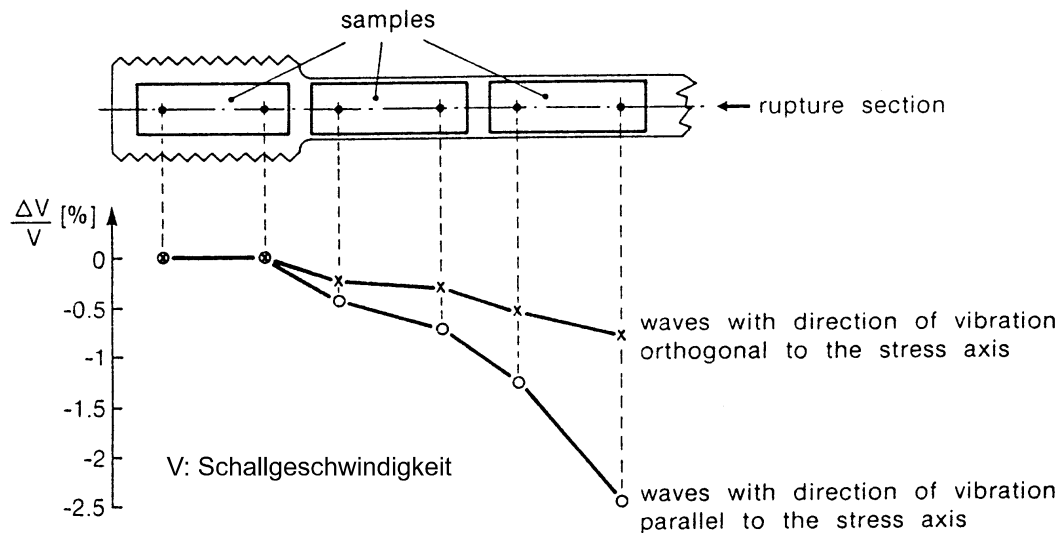


Bild 4.2: Relative Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad nach [66].

An austenitischem Stahl wurde ein vergleichbarer Zusammenhang nachgewiesen. In [8] und [6] wurde an Zeitstandproben aus austenitischem Stahl eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit in der Größenordnung zwischen ca. 1 und 4% gemessen. Ein repräsentatives Beispiel der Messungen aus [8] ist in Bild 4.3 dargestellt.



*Bild 4.3: Abnahme der Schallgeschwindigkeit an einer zeitstandgeschädigten Probe aus austenitischem Stahl nach [8].*

Daneben gibt es auch Arbeiten, die über eine deutlich stärkere Abnahme der Schallgeschwindigkeit berichten wie z.B. 15% bei Reinkupfer im Zeitstandversuch oder 8% bei austenitischem Stahl [67].

Die verschiedenen Arbeiten können nur bedingt miteinander verglichen werden, da sie sich sowohl im Untersuchungsmaterial, als auch in den experimentellen Randbedingungen (Meßmethode, Frequenz, Wellenart, Polarisierung) und der Klassifikation der Schädigung unterscheiden. Sie sollen nur eine Vorstellung von der Größenordnung der Meßeffekte geben.

Aus dem Studium der Literatur und den in dieser Arbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen kann folgendes Fazit gezogen werden:

Zeitstandschädigung führt zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit, die bei geringer bis mittlerer Schädigung in der Größenordnung unter oder um ein Prozent liegt und bei starker Schädigung mehrere Prozent erreichen kann. Insbesondere für den Nachweis einer beginnenden Schädigung ist daher eine hohe Meßgenauigkeit nötig. Im Rahmen dieser Meßgenauigkeit wirken sich auch herstellungs- und betriebsbedingte Änderungen der Gefügestruktur auf die Höhe der Schallgeschwindigkeit aus. Es ist deshalb auch bei einer ausreichend hohen absoluten Meßgenauigkeit nicht einfach, für einen Werkstoff Schallgeschwindigkeitswerte anzugeben, denen unmittelbar ein Schädigungsgrad zugeordnet werden kann. Vielmehr ist eine vergleichende Messung zwischen geschädigten und ungeschädigten Stellen mit sonst gleichem Gefügezustand durchzuführen. Dies ist z.B. dann der Fall, wenn Messungen von verschiedenen Stellen des selben Bauteils miteinander verglichen werden.

Die Ultraschall-Laminographie wird diesem Umstand in besonderem Maße gerecht, indem sie die Schallgeschwindigkeit unterschiedlicher Tiefenschichten an ein und derselben Stelle vergleicht. Damit ist es bei einer oberflächennah vorliegenden Schädigung möglich, selektiv die schädigungsinduzierte Änderung der Schallgeschwindigkeit unabhängig vom Einfluß herstellungs- und betriebsbedingter Gefügeänderungen zu bestimmen.

## 5. Aufgabenstellung und Organigramm

Der zerstörungsfreie Nachweis von Zeitstandschädigung ist von zentraler Bedeutung für die Überwachung von Anlagen der Kraftwerksindustrie.

Obwohl in Laborversuchen mehrere Prüfmethode positive Ergebnisse lieferten, hat sich neben der Replika-Technik und der Kriechdehnungsmessung noch kein weiteres Verfahren in die Praxis durchgesetzt.

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit bestand darin, ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Erfassung von Zeitstandschädigung zu entwickeln, wobei der Schwerpunkt insbesondere auf die Anwendbarkeit an realen Bauteilen vor Ort gelegt werden sollte.

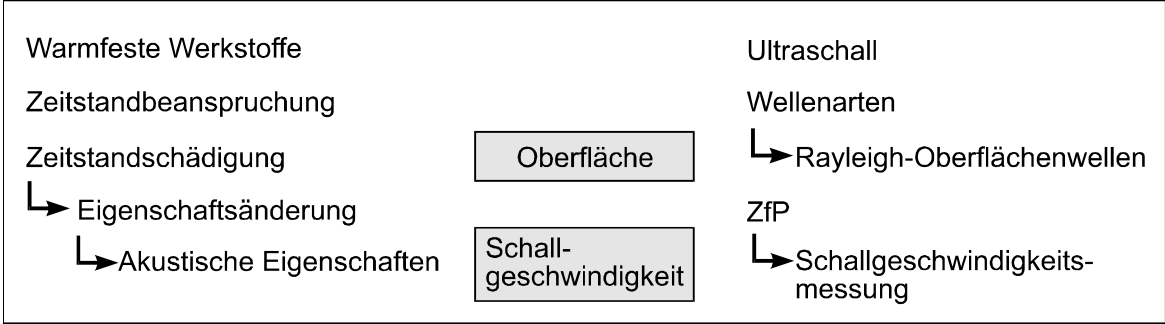
Die speziellen Gegebenheiten an den relevanten Rohrbiegungen des dampfführenden Leitungssystems führten zur Entwicklung einer neuen Methode der Schallgeschwindigkeitsmessung unter Anwendung von Ultraschall-Oberflächenwellen. Zunächst wurde ein Laboraufbau entwickelt, an dem im Laufe der Arbeiten Modifikationen vorgenommen wurden, um die Handhabbarkeit vor Ort zu verbessern. Mit diesem Prototyp wurden erste Messungen an Rohrbögen im Labor und in Kraftwerken durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen eine Korrelation zwischen Zeitstandschädigung und absoluten sowie tiefenabhängigen Änderungen der Schallgeschwindigkeit.

Zur Beurteilung des Schädigungsverlaufs in die Tiefe wird eine Abschätzung vorgeschlagen, die einen Zusammenhang zwischen dem tiefenabhängigen Verlauf der Schallgeschwindigkeit und der Zeitstandporosität herstellt.



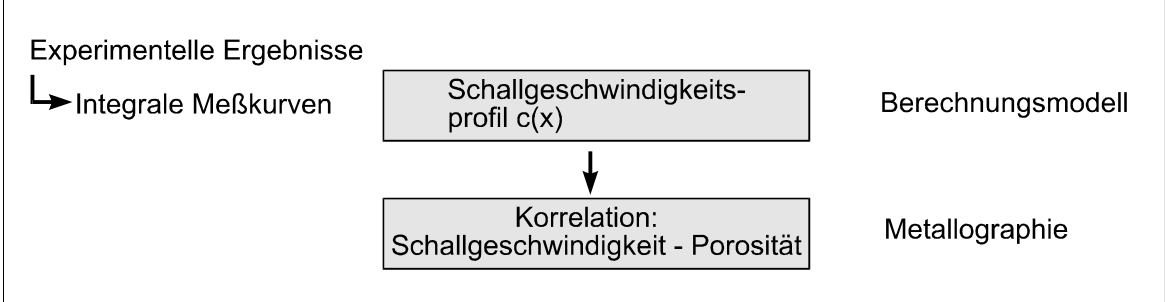
**Ziel:** Nachweis und Beurteilung von Zeitstandschädigung

**Grundlagen**



**Ultraschall-Laminographie:** Nachweis von Zeitstandschädigung durch tiefenabhängige Messung der Schallgeschwindigkeit

**Messungen**



Abschätzung des Schädigungsgradienten über die Wand

Bild 5.1: Organigramm

## 6. Entwicklung der Ultraschall-Laminographie

### 6.1 Grundlagen

Von den in den vorangegangenen Kapiteln besprochenen Grundlagen können die folgenden Punkte als wesentliche Aussagen zusammengefaßt werden:

- 1) Zeitstandschädigung wird in einen reversiblen und einen irreversiblen Anteil unterschieden. Unter irreversibler Schädigung versteht man die Bildung von Mikroporen und -rissen.
- 2) Bei den meisten Werkstoffen nimmt die irreversible Schädigung am Übergang vom sekundären zum tertiären Kriechbereich deutlich zu.
- 3) Aus langjähriger Erfahrung ist bekannt, daß Zeitstandschädigung im typischen Fall an der Außenoberfläche beginnt und in Richtung Innenwand abnimmt.
- 4) Der Nachweis von Zeitstandschädigung an Rohrbögen ist von besonderer Bedeutung, da bei diesen die Gefahr besteht, daß sich die Schädigung großflächig entwickelt und es zu einem katastrophalen Versagen kommt.
- 5) Theoretische Modelle und experimentelle Befunde belegen, daß Zeitstandschädigung zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit führt.

Aus dieser Kenntnis läßt sich ableiten, daß bei einer oberflächennahen Zeitstandschädigung ein Gradient der Schallgeschwindigkeit über die Wand vorliegen muß. An der Oberfläche ist die Schallgeschwindigkeit schädigungsbedingt am niedrigsten und nimmt in die Tiefe zu. Mit der Ultraschall-Laminographie wurde eine Methode entwickelt, um diesen Gradienten am Bauteil zu messen.

## 6.2 Meßprinzip

Die Ultraschall-Laminographie unterscheidet sich von der konventionellen Ultraschallprüfung dadurch, daß keine Schallimpulse, sondern eine kontinuierliche Oberflächenwelle benutzt wird. Diese breitet sich auf dem zu prüfenden Bauteil aus, vergleichbar mit einer Wasserwelle auf der Wasseroberfläche. Je nach der gewählten Frequenz bzw. Wellenlänge ist die Eindringtiefe und damit der vom Ultraschall erfaßte Werkstoffbereich unterschiedlich. Durch die Verwendung relativ niedriger Frequenzen erhält man Wellenlängen in der Größenordnung von mehreren Millimetern, die tief genug in den Werkstoff eindringen, um die erfahrungsgemäß unterschiedlich stark geschädigten Bereiche zu erfassen.

Die Messung der Schallgeschwindigkeit erfolgt durch die Bestimmung der mittleren Wellenlänge entlang einer ca. 100 mm langen Meßstrecke. Aus der Wellenlänge und der Frequenz, die in einem weiten Bereich frei gewählt werden kann, wird die Schallgeschwindigkeit berechnet. Zur Bestimmung der Wellenlänge dient eine Anordnung aus zwei Prüfköpfen, einem ortsfesten und einem verschiebbaren, deren Phasenlage zueinander in Abhängigkeit von ihrem Abstand registriert wird.

Der prinzipielle Versuchsaufbau ist in Bild 6.1 dargestellt. Ein breitbandiger piezoelektrischer Prüfkopf erzeugt eine Oberflächenwelle, die sich auf dem zu prüfenden Bauteil ausbreitet. Von einem Empfänger gleicher Bauart wird die Welle aufgenommen und anschließend vorverstärkt.

Die Sender- und Empfängerschwingung werden simultan auf ein Oszilloskop gegeben, das dazu dient, die Phasenlage zwischen den beiden Schwingungen und deren Änderung festzustellen. Verschiebt man einen Prüfkopf relativ zum anderen, so ändert sich die Phasenverschiebung zwischen den beiden Schwingungen.

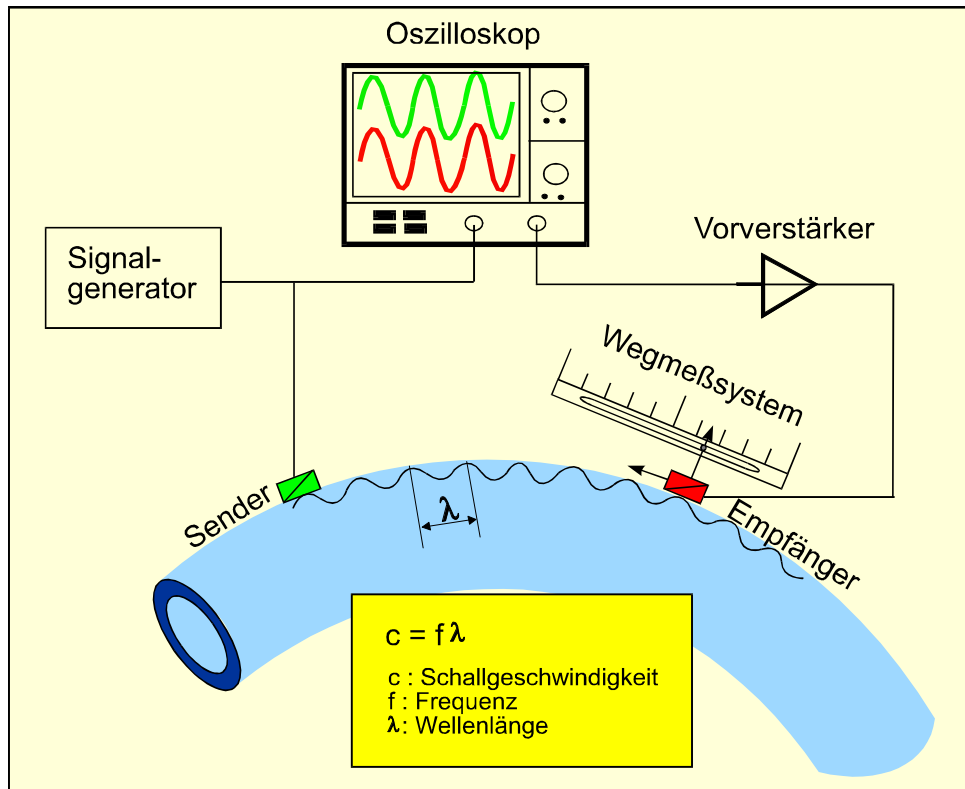


Bild 6.1: Versuchsaufbau, schematisch.

Eine Änderung der Phasenverschiebung um einen Phasenumlauf von  $2\pi$  entspricht einem Verfahrweg von einer Wellenlänge (Bild 6.2). Durch Verfahren des Prüfkopfs über mehrere Wellenlängen und Mittelung ist eine hohe Meßgenauigkeit erreichbar.

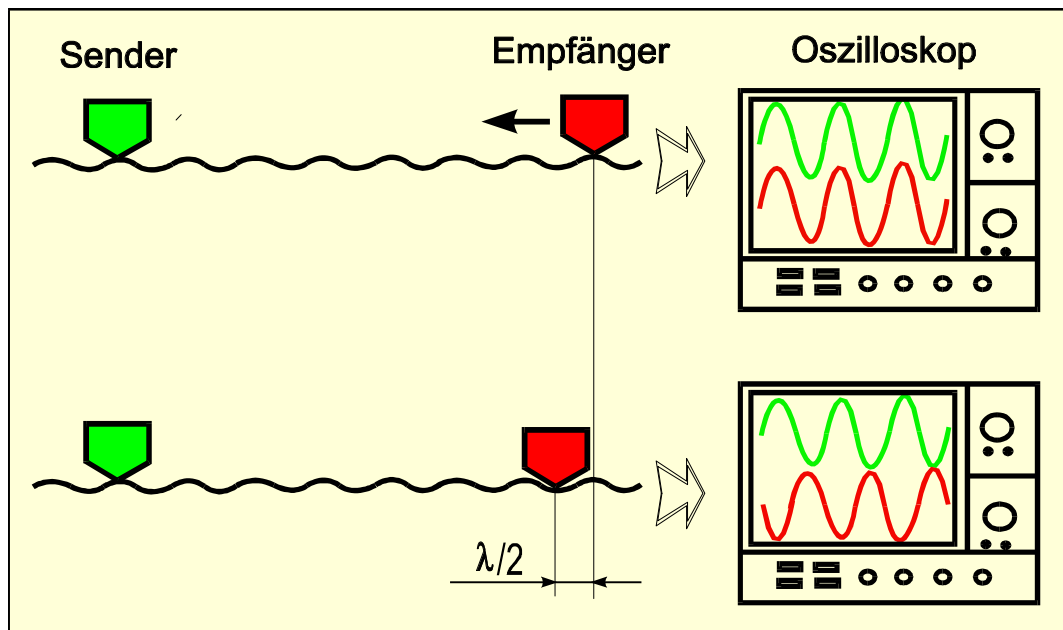


Bild 6.2: Bestimmung der Wellenlänge aufgrund der Phasenlage zwischen Sender und Empfänger.

Aus der Frequenz und der Wellenlänge errechnet sich die Schallgeschwindigkeit nach der Beziehung

$$c = \lambda \cdot f \quad (6.1)$$

mit:

c: Schallgeschwindigkeit

$\lambda$ : Wellenlänge

f: Frequenz

Dieser Meßvorgang wird an ein und derselben Stelle mit schrittweise abnehmender Frequenz, d.h. zunehmender Eindringtiefe, wiederholt. Damit tastet man den Werkstoff von der Oberfläche in die Tiefe ab. Für jeden Meßvorgang wird die mittlere Wellenlänge und daraus die Schallgeschwindigkeit berechnet. Die Auftragung der Schallgeschwindigkeit über der Wellenlänge ergibt eine Meßkurve, die als Geschwindigkeitsprofil bezeichnet wird. Da die Eindringtiefe der Rayleighwelle von der Wellenlänge abhängt,

kann aus dem Geschwindigkeitsprofil eine eventuell vorhandene Veränderung der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe abgelesen werden. In der Literatur wird häufig angegeben, daß die Eindringtiefe der Größe einer Wellenlänge entspricht. Wie später in dieser Arbeit (Kap. 8) noch gezeigt wird, kann jedoch in den Meßdiagrammen die Wellenlänge nicht maßstabsgetreu auf die tatsächliche Tiefe im Werkstoff übertragen werden, da die Schallenergie von der Oberfläche in die Tiefe exponentiell abnimmt.

Bei Vorliegen einer oberflächennahen Zeitstandschädigung durchdringt eine Welle geringer Eindringtiefe nur den Bereich des geschädigten Werkstoffs. Mit größer werdender Eindringtiefe erfaßt die Welle zunehmend den tiefer liegenden ungeschädigten Werkstoff mit (Bild 6.3).

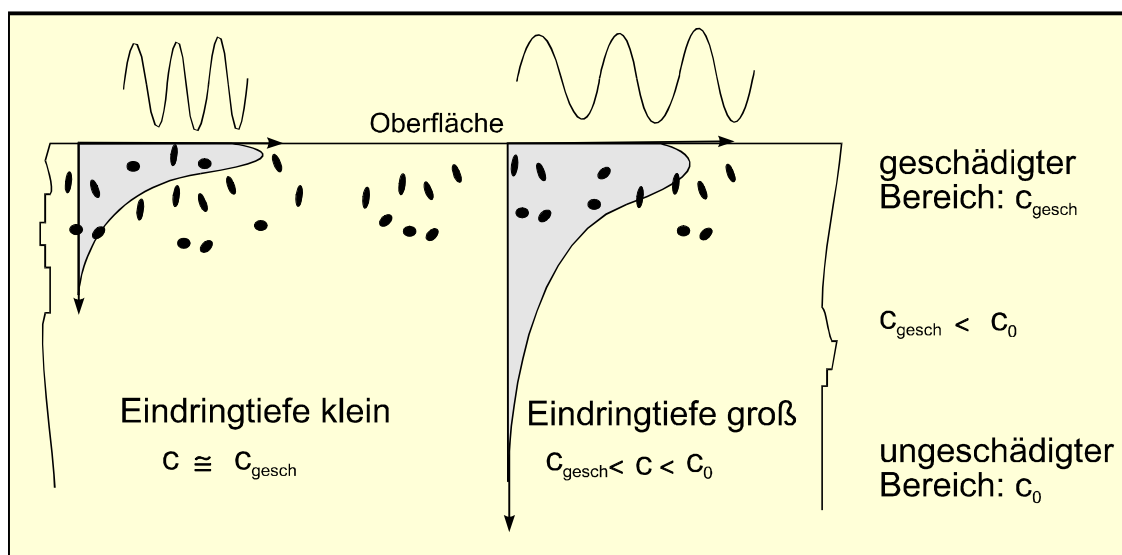
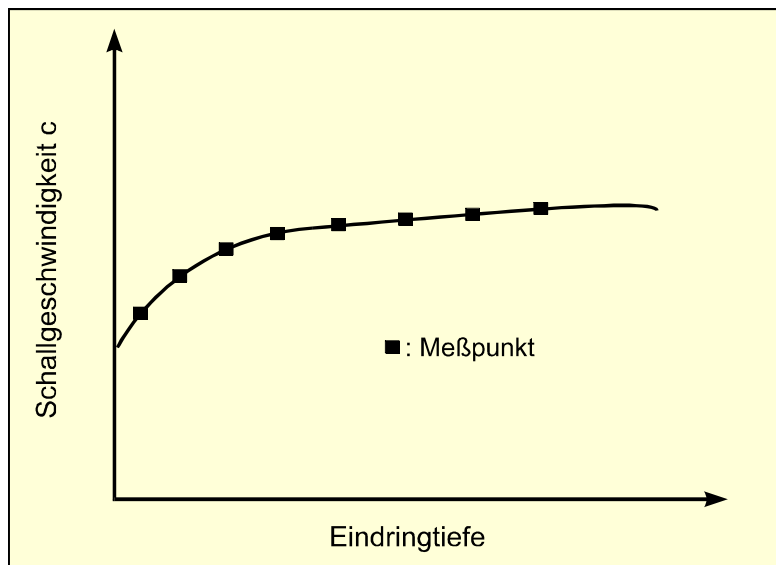


Bild 6.3: Eindringtiefe der Rayleigh-Oberflächenwelle für zwei unterschiedliche Wellenlängen (schematisch).

Im Geschwindigkeitsprofil äußert sich eine Zeitstandschädigung dergestalt, daß die Schallgeschwindigkeit ausgehend von einem niedrigen Wert an der Oberfläche mit zunehmender Eindringtiefe allmählich ansteigt. Es entspricht dies einem vergleichsweise

höheren Schädigungsgrad an der Oberfläche, der mit zunehmender Tiefe unter der Oberfläche abklingt.

In Bild 6.4 ist schematisch der Verlauf einer Meßkurve an einem Bauteil mit oberflächennaher Schädigung dargestellt.



*Bild 6.4: Charakteristischer Verlauf einer Meßkurve bei Vorliegen einer oberflächennahen Schädigung.*

Der Verlauf des Geschwindigkeitsprofils deutet auf eine Schädigung hin und gibt eine Information darüber, wie weit die Schädigung in die Tiefe reicht.

### 6.3 Meßvorgang

Die Messung erfolgt längs der Achse des Rohrbogens, z. B. auf der Zug- oder der neutralen Faser. Entlang der Meßstrecke wird die Zunderschicht durch grobes Schleifen entfernt und anschließend mit feinerer Körnung überschliffen.

Eine Vorrichtung mit den beiden Prüfköpfen wird so auf dem Rohrbogen befestigt, daß der Sender ortsfest und der Empfänger relativ zum Sender verschiebbar ist. Zur akusti-

schen Kopplung wird auf der Kontaktfläche der Prüfköpfe und auf der Meßstrecke ein dünner Ölfilm aufgebracht.

Der Sender wird mit einer sinusförmigen Spannung gespeist und erzeugt auf dem Bauteil eine kontinuierliche Oberflächenwelle, die sich in Richtung zum Empfänger ausbreitet und von diesem aufgenommen wird. Die Sender- und Empfängerschwingung werden jeweils auf einen Kanal eines Oszilloskops gegeben, auf dem die Phasenlage der beiden Schwingungen zueinander abgelesen wird.

Wird ein Prüfkopf relativ zum anderen verschoben, so ändert sich die Phasenlage der beiden Schwingungen. Bei Verschiebung um den Betrag einer Wellenlänge wird ein kompletter Phasenumlauf von  $2\pi$  überstrichen. Der Verfahrensweg wird mit Hilfe eines Wegaufnehmers gemessen und gleichzeitig wird die Anzahl der Phasendurchgänge auf dem Oszilloskop gezählt. Teilt man den Verfahrensweg durch die Anzahl der Phasendurchgänge, so erhält man die mittlere Wellenlänge längs der Meßstrecke. Die Meßstrecke ist der Bereich, der vom Empfänger überstrichen wird. Je länger die Meßstrecke ist, umso genauer wird der Mittelwert der Wellenlänge. Für eine sinnvolle Messung am Bauteil ist ein Kompromiß zu finden zwischen einer Meßstrecke, die lang genug ist, um auch bei den größeren Wellenlängen noch eine ausreichende Meßgenauigkeit zu erhalten, und einer Meßstrecke, die kurz genug ist, um lokale Änderungen der Schallgeschwindigkeit noch festzustellen.

Die Meßgenauigkeit ist abhängig von der Meßtechnik, der Frequenz und der Meßlänge. Mit der gegenwärtig vorliegenden Ausrüstung ist bei einer Meßlänge von 90 bis 120 mm bis herab zu 500 kHz eine Genauigkeit von  $\pm 0,1\%$  oder ca.  $\pm 3$  m/s erreichbar. Ein Bauteil ausreichender Wanddicke wird hierbei vorausgesetzt. Eine höhere Frequenz führt zu einer geringeren Streuung der Meßwerte. In Bild 6.5 ist ein Streuband skizziert, das einen Überblick über die frequenzabhängige Streuung der Meßkurven beim derzeitigen Stand der Arbeiten und einer Meßlänge von 100 mm gibt. Diese Darstellung ist jedoch nicht endgültig, da davon auszugehen ist, daß die Weiterentwicklung des Verfahrens zu einer Einengung des Streubandes führen wird.

Die Festlegung des Streubands beruht auf Erfahrungen mit der Reproduzierbarkeit sehr vieler Messungen. Als wesentliche Ursache für die Streuung der Meßwerte sind die Genauigkeit der Wegmessung, insbesondere auf gekrümmten Oberflächen, sowie Tole-



ranzen bei der Auflage, Ankopplung und Führung der Prüfköpfe zu nennen. Diese Einflußgrößen erlauben nur eine begrenzte Genauigkeit bei der Einstellung eines definierten Phasenabstandes zwischen Sender und Empfänger. Der Fehler beträgt stets einen Bruchteil der Größe einer Wellenlänge und wirkt sich daher auf die Meßgröße umso stärker aus, je kleiner die Meßstrecke bzw. je geringer die Anzahl der erfaßten Wellenlängen ist. Deshalb führt eine höhere Frequenz und eine größere Meßstrecke systembedingt generell zu einer höheren Meßgenauigkeit. Für den Frequenzbereich unterhalb von 500 – 600 kHz ist eine Quantifizierung der Meßgenauigkeit schwierig, da hier zunehmend auch Einflüsse der Rohrwanddicke zu berücksichtigen sind.

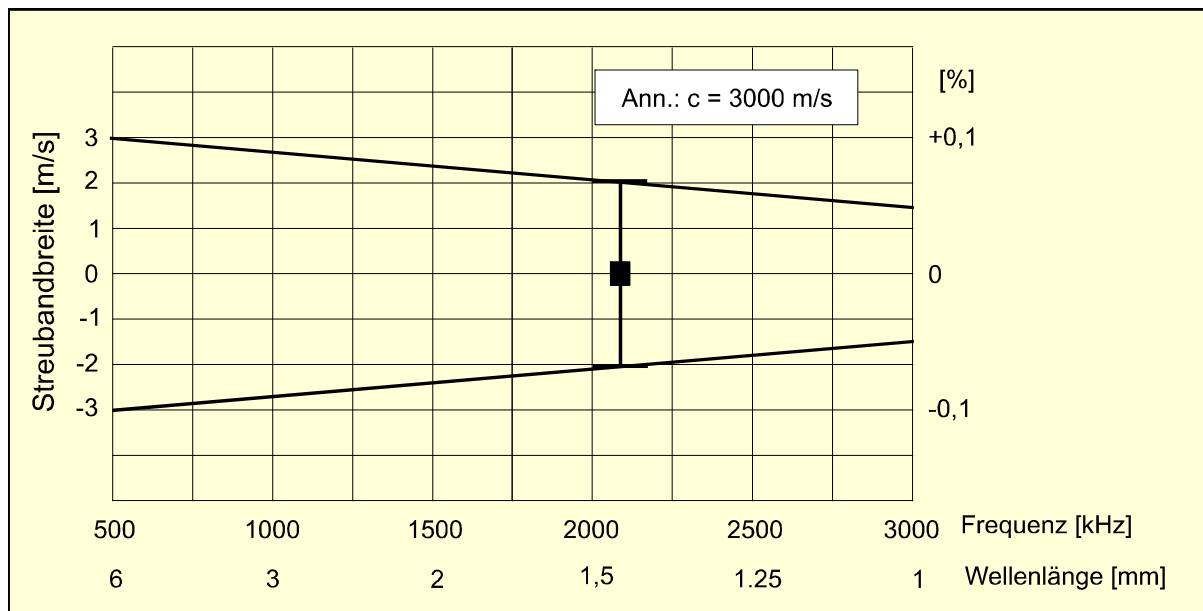


Bild 6.5: Frequenzabhängiges Streuband der Meßpunkte (Meßlänge 100 mm).

Die Messungen im Rahmen dieser Arbeit wurden im Frequenzbereich zwischen 300 kHz und 3 MHz durchgeführt. Bei der oberen Frequenz von 3 MHz beträgt die Wellenlänge etwa 1 mm. Die Welle dringt nur wenig in den Werkstoff ein und erfaßt nur den äußersten oberflächennahen Bereich. Aufgrund der kleinen Wellenlänge wird eine hohe Meßgenauigkeit erreicht. Eine Erhöhung der Frequenz ist grundsätzlich möglich, es ist

jedoch zu beachten, daß mit zunehmender Frequenz auch der Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf das Meßergebnis zunimmt. Im Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 3 MHz hat es sich als günstig erwiesen, die Meßstelle nach Entfernen der Zunderschicht und Grobschleifen mit einer Fächerscheibe der Körnung 120 zu überschleifen. Nach unten wird die Frequenz durch die Wanddicke des Bauteils begrenzt. Die Theorie der Rayleighwelle besagt, daß sich diese Wellenart an der Oberfläche eines halbunendlichen Körpers ausbreitet. Bei einer relativ zur Wanddicke großen Wellenlänge verliert diese Idealisierung ihre Gültigkeit. Die Voraussetzungen für die Existenz einer reinen Rayleighwelle verschlechtern sich zugunsten der Entstehung von Lamb-Moden. Die Rayleighwelle entartet dann zu einer Rayleigh-Lamb-Welle. In den Messungen zeigt sich dies darin, daß mit abnehmender Frequenz unrealistisch hohe oder niedrige Geschwindigkeitswerte gemessen werden. Diese sind einer der ersten symmetrischen oder asymmetrischen Lambmode entsprechenden Welle zuzuordnen (vgl. Kap. 3.2.2, Bild 3.5). Um Fehlinterpretationen auszuschließen werden die Messungen bei Erreichen dieser unteren Frequenzgrenze abgebrochen.

## 7. Ergebnisse von Messungen mit der Ultraschall-Laminographie

### 7.1 Untersuchte Rohrbögen

Die Ultraschall-Laminographie wurde speziell für die Anwendung an realen Bauteilen vor Ort entwickelt und ist für die Messung an kleinen Proben nur bedingt geeignet. Zum einen, weil für die Auflage der Prüfköpfe und den dazwischen liegenden Fahrweg eine freie Länge von mindestens 150 – 200 mm notwendig ist. Zum anderen können bei zu kleinen Probestücken Reflexionen der Schallwelle an den Rändern die Messung beeinflussen.

Alle nachstehend dargestellten Messungen wurden deshalb an kompletten Rohrbögen oder ausreichend großen Teilstücken solcher durchgeführt. Die Untersuchungsobjekte waren zum Teil ausgebaut, zum Teil wurden Messungen auch im Kraftwerk an noch eingebauten Rohrbögen während Revisionen durchgeführt.

Die Angaben zu den Schädigungsklassen der Rohrbögen beziehen sich auf Oberflächengefügeuntersuchungen, welche von erfahrenem Personal entweder des jeweiligen Kraftwerksbetreibers oder einer unabhängigen Stelle (VGB, TÜV) durchgeführt wurden. Obwohl die Gefügeabdrücke aus dem Bereich der Meßstellen oder aus deren unmittelbarer Umgebung entnommen wurden, ist ein Vergleich der Ultraschallergebnisse mit dem metallographisch bestimmten Schädigungsgrad nicht immer uneingeschränkt möglich. Dies liegt zum einen daran, daß die Ultraschallmessung einen integralen Mittelwert über eine größere Meßstrecke liefert, wohingegen sich die Aussage eines Gefügeabdruckes streng genommen nur auf eine kleine, lokal begrenzte Stelle bezieht. Es kann aber nicht immer davon ausgegangen werden, daß der Befund an dieser Stelle repräsentativ für die nähere Umgebung der Abdruckstelle oder gar den ganzen Bogen ist. Zum anderen liegen den beiden Verfahren zwei grundsätzlich verschiedene Betrachtungsweisen der Zeitstandschädigung zugrunde. Beim Gefügeabdruckverfahren werden Gefügeveränderungen und Gefügebestandteile in Gestalt von Poren und Rissen metallographisch nachgewiesen. Bei der Messung der Schallgeschwindigkeit handelt es sich um die Bestimmung einer physikalischen Festkörpereigenschaft. Es werden nicht Poren

als solche nachgewiesen, sondern Änderungen der Werkstoffeigenschaften durch die Zeitstandsbeanspruchung, wobei das Auftreten von Poren nur ein Indiz für die Werkstoffveränderung ist. Auch Poren und deren Vorstufen, die metallographisch noch nicht auflösbar sind, können naturgemäß im Hinblick auf die physikalischen Eigenschaften bereits Auswirkungen haben.

In Tabelle 7.1 sind die untersuchten Rohrbögen sowie deren Betriebsparameter, soweit bekannt, aufgeführt. Die Rohrbögen sind zur Identifikation mit Großbuchstaben gekennzeichnet.

Rohrbogen	Werkstoff	Gefügeklasse	Betriebsparameter	Meßstellen	Bild
A	10 CrMo 9-10	0	neu, vergütet	Zugfaser, neutr. Faser, Geradrohrteil	7.1 7.2
B	X10 CrMoVNb 9-1 (P91)	0	neu, vergütet	Zugfaser, neutr. Faser, Geradrohrteil	7.3 7.4
C	13 CrMo 4-4	2a/2b	180 bar, 530 °C ca. 240.000 h	Zugfaser neutrale Faser	7.5 7.6
D	12 Ch 1 MF (12 CrMoV 12-1)	1 – 3b/4	keine Angabe	Zugfaser, 7 cm neben Zugfaser, neutr. Faser	7.7 7.8
E	X20 CrMoV 12-1	1	166 bar, 540 °C ca. 123.000 h	Zugfaser	7.9
F	X20 CrMoV 12-1	2b/3a	166 bar, 540 °C ca. 123.000 h	Zugfaser	7.9
G	13 CrMo 4-4	3a	ca. 203.000 h	Zugfaser	7.10

Tabelle 7.1: Untersuchte Rohrbögen.

## 7.2 Integrale Geschwindigkeitsprofile der untersuchten Rohrbögen

Nachfolgend werden die Meßkurven der untersuchten Rohrbögen als Darstellung der integralen Schallgeschwindigkeit über der Wellenlänge wiedergegeben. Aus den Meßkurven ist erkennbar, ob eine tiefenabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit vorhanden ist. Der jeweilige reale Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe ist nicht mit der Meßkurve identisch, da in jede Messung mit zunehmender Eindringtiefe der oberflächennahe Bereich stets mit eingeht. Eine Berechnung des realen Verlaufs der Schallgeschwindigkeit aus den Daten einer Meßkurve ist unter Berücksichtigung der Tiefencharakteristik der Oberflächenwelle möglich. In Kapitel 8 wird eine Abschätzung des tatsächlichen Geschwindigkeitsverlaufs aus den Meßkurven vorgestellt. Die Abschätzung ist umso besser, je geringer die Streuung der Meßwerte und je größer der erfaßte Tiefenbereich ist. Für eine Extrapolation der Schallgeschwindigkeit an der Oberfläche sind zudem Meßwerte mit möglichst geringer Eindringtiefe nötig. Da diese Bedingungen insbesondere bei den ersten im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen nicht immer vollständig erfüllt sind, werden nachfolgend nur die Originalmeßkurven dargestellt, wie sie an Rohrbögen gewonnen wurden. Die Abschätzung des tatsächlichen Geschwindigkeitsverlaufs wird in Kapitel 8 exemplarisch an einer jüngeren Meßkurve durchgeführt.

Mit Ausnahme von Rohrbogen D sind die Diagramme so skaliert, daß die Ordinate eine Höhe von 30 m/s hat, was etwa einem Prozent der Schallgeschwindigkeit entspricht. Die mittlere Meßgenauigkeit beträgt  $\pm 0,1\%$ . In jüngeren Messungen wurde die obere Frequenzgrenze von 1 MHz (entsprechend 3 mm Wellenlänge) auf 3 MHz (entsprechend 1 mm Wellenlänge) angehoben. Bei diesen Meßkurven ist insbesondere im Bereich der kleineren Wellenlängen eine erhöhte Meßgenauigkeit anzusetzen (vgl. Bild 5.6).

In die absolute Meßgenauigkeit geht die Genauigkeit der Wegmessung wesentlich ein. Auf der Zugfaser wird der tangential gemessene Verfahrensweg unter Berücksichtigung der Bogenkrümmung auf den Verfahrensweg längs der gekrümmten Oberfläche umgerechnet. Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Bogenkrümmung führen zu einer Parallelver-

schiebung der Meßkurven in vertikaler Richtung, haben jedoch keinen Einfluß auf den Verlauf der Meßkurven. Da bei den anfangs durchgeführten Messungen primär die tiefenabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit bewertet wurde, und weniger das absolute Niveau, wurde der Krümmungseinfluß nicht berücksichtigt. Die dargestellten Meßkurven eines Rohrbogens längs der Zugfaser einerseits und längs der neutralen Faser und dem geraden Schenkel andererseits sind hinsichtlich der absoluten Höhe der Schallgeschwindigkeit nicht vergleichbar und deshalb jeweils auf unterschiedlichen Diagrammen dargestellt.

## 7.2.1 Neue Rohrbögen

### Rohrbogen A

Werkstoff: 10 CrMo 9-10  
Zustand: neu, vergütet  
Gefügekategorie: 0

Rohrbogen A wurde im neuen Zustand untersucht. Die Messungen erfolgten beim Hersteller nach der abschließenden Wärmebehandlung.

Die Meßkurven der neutralen Faser und des geraden Schenkels sind in Bild 7.1 dargestellt.

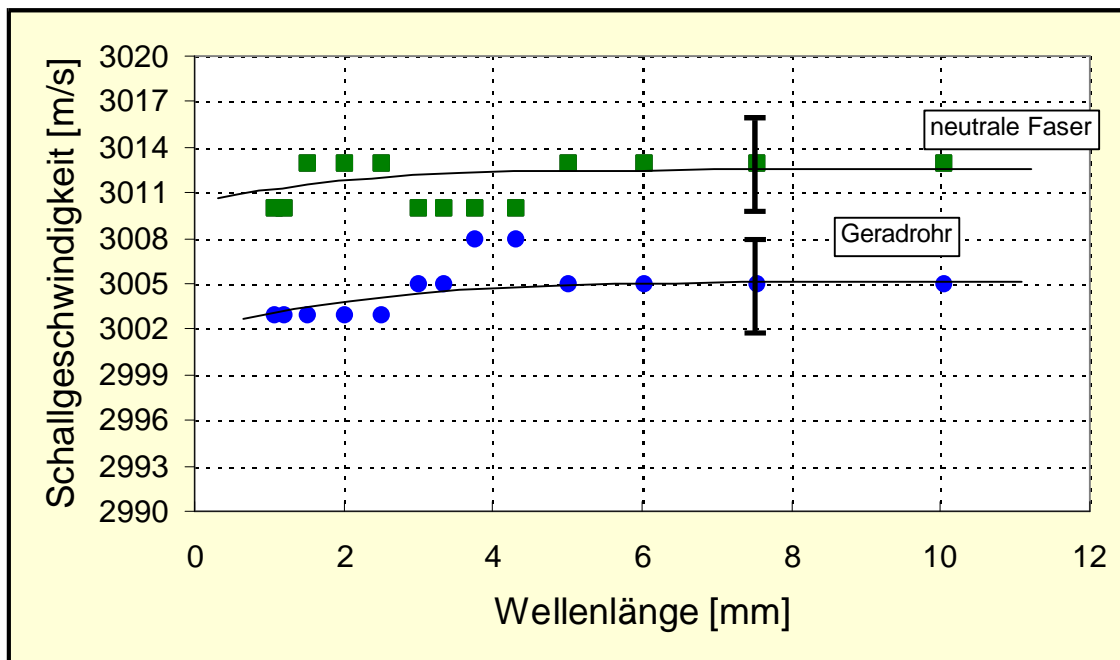


Bild 7.1: Meßkurven eines neuen Rohrbogens aus 10 CrMo 9-10.

Beide Kurven zeigen zwischen 1 und 5 mm Wellenlänge einen sehr geringen Anstieg der Schallgeschwindigkeit. Die Änderung entspricht etwa 0,1 % und liegt damit in der Größenordnung der Meßgenauigkeit. Eine definitive Aussage über die Ursache dieses

schwachen Gradienten ist derzeit noch nicht möglich. Es besteht jedoch die Annahme, daß aufgrund der unterschiedlichen Abkühlverhältnisse an der Oberfläche und in der Tiefe des Materials, die Wärmebehandlung des Rohrbogens einen schwachen Eigenschaftsgradienten im Gefüge erzeugt, der sich in der metallographischen Abbildung nicht darstellen läßt.

Die Absolutwerte der Schallgeschwindigkeit liegen an der neutralen Faser 0.2 - 0.3% über den Werten am geraden Schenkel. Die Ursache dafür ist rein geometrisch bedingt, da auch längs der neutralen Faser und insbesondere bei längerer Meßstrecke der überstrichene Weg nicht krümmungsfrei ist und somit von dem linear gemessenen Weg geringfügig abweicht.

Bild 7.2 zeigt den Verlauf der integralen Schallgeschwindigkeit entlang der Zugfaser. Es ist wiederum zwischen 1 und 5 mm Wellenlänge ein geringer Anstieg der Schallgeschwindigkeit in der Größe der Meßgenauigkeit zu erkennen. Die Absolutwerte der Schallgeschwindigkeit an der Zugfaser sind aufgrund des Krümmungseinflusses mit einer geringen Unsicherheit behaftet, deshalb ist ein Vergleich mit den Werten der neutralen Faser und des geraden Schenkels nicht möglich.

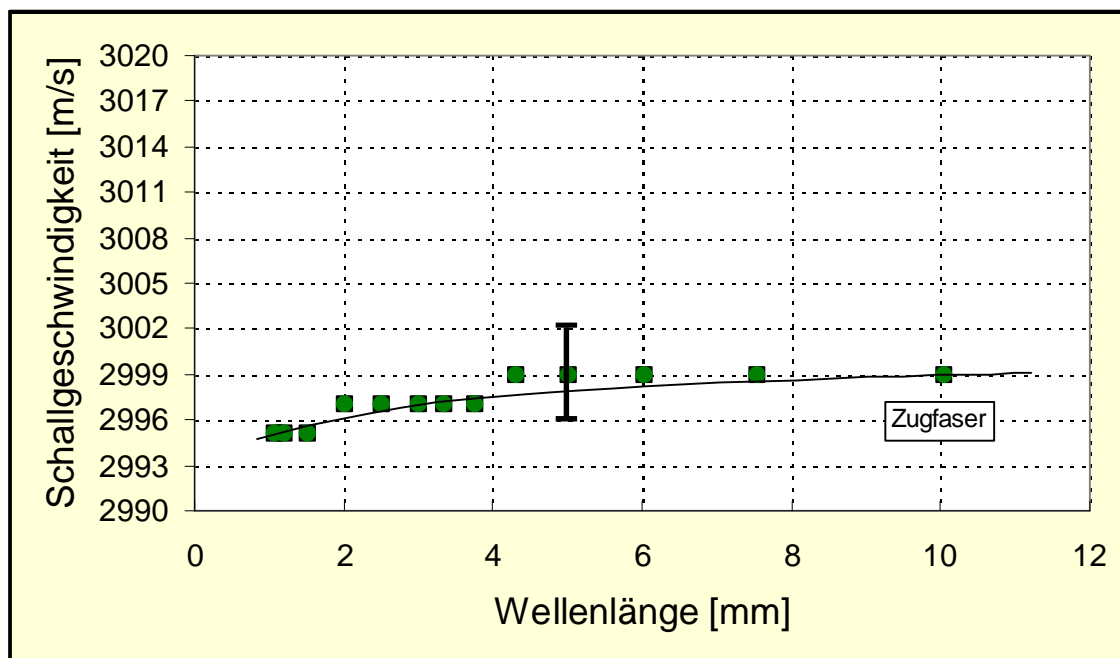


Bild 7.2: Meßkurve eines neuen Rohrbogens aus 10 CrMo 9-10.



## Rohrbogen B

Werkstoff: X10 CrMoVNb 9-1 (P91)  
Zustand: neu, vergütet  
Gefügekategorie: 0

Die Messungen an Rohrbogen B wurden ebenfalls im neuen Zustand nach der abschließenden Wärmebehandlung durchgeführt. Die Meßkurven von der neutralen Faser und vom geraden Schenkel (Bild 7.3) zeigen einen ähnlichen Verlauf wie im Fall des Rohrbogens A. Abgesehen von einem sehr kleinen oberflächennahen Anstieg, kann die Schallgeschwindigkeit im untersuchten Tiefenbereich als nahezu konstant betrachtet werden. Die Absolutwerte der neutralen Faser liegen wiederum ca. 0.2% über denen des geraden Schenkels. Auch in diesem Fall ist davon auszugehen, daß die Ursache für diesen geringen Unterschied in einem geometrisch bedingten Meßfehler bei der Wegmessung längs der neutralen Faser liegt.

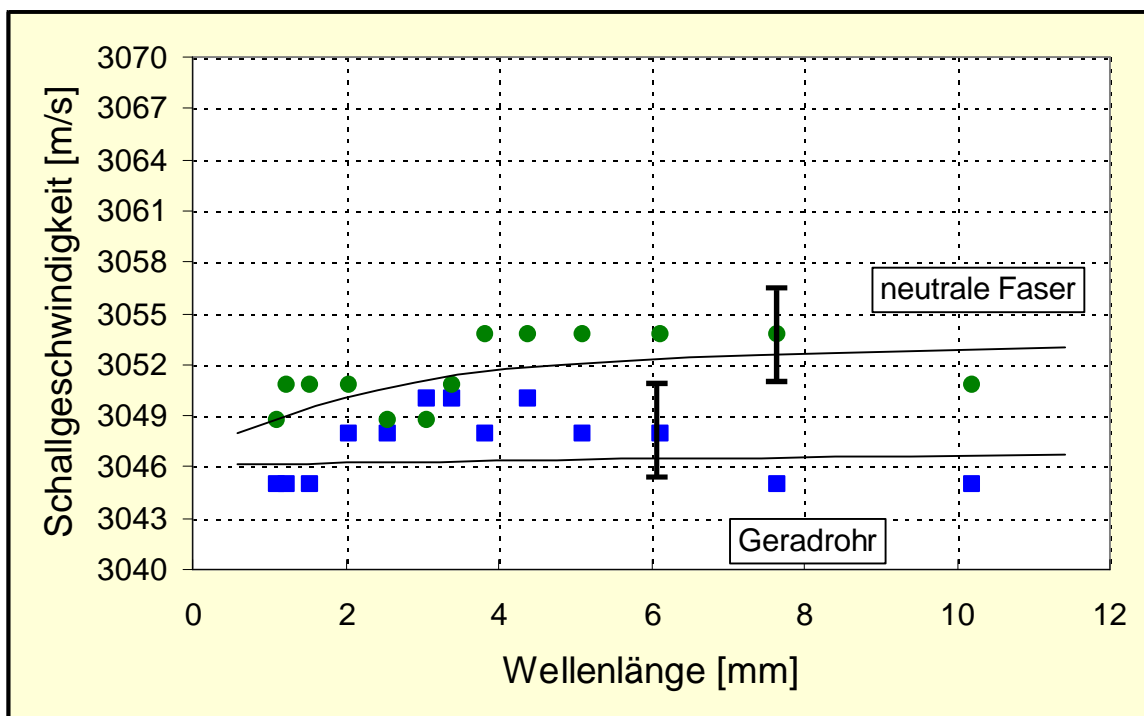


Bild 7.3: Meßkurven eines neuen Rohrbogens aus P91.

Die Meßergebnisse an der Zugfaser sind in Bild 7.4 dargestellt. Im Rahmen der Meßgenauigkeit ist das dargestellte Geschwindigkeitsprofil als konstant zu betrachten.

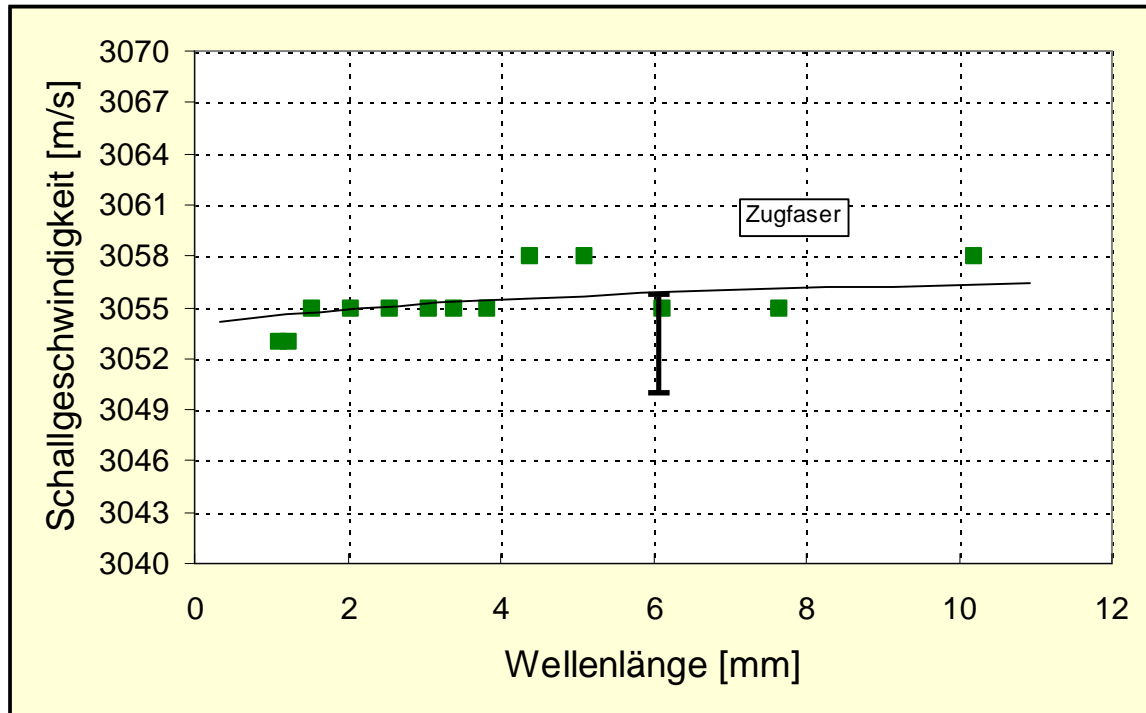


Bild 7.4: Meßkurve eines neuen Rohrbogens aus P91.

Fazit:

Anhand der Messungen an den neuen Rohrbögen war zu untersuchen, ob an diesen eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eindringtiefe vorliegt. Die Berechnung der absoluten Höhe der Schallgeschwindigkeit bei den Messungen längs der Zugfaser erfolgte unter Zugrundelegung des in den Konstruktionszeichnungen angegebenen Krümmungsradius der Bögen. In beiden Fällen unterscheiden sich die Meßkurven längs der Zugfaser von denen längs des Geradrohrs im absoluten Niveau. Für den vorliegenden Unterschied ist eine Abweichung des realen Krümmungsradius vom nominellen um den Faktor 0,997 – 0,999 ausreichend. Es ist daher davon

auszugehen, daß bezüglich der absoluten Höhe die Messungen längs der neutralen Faser und insbesondere längs des Geradrohrs exakt sind, da hier kein Einfluß der Krümmung auf die Wegmessung zu berücksichtigen ist.

Jüngere, nicht in dieser Arbeit enthaltene Messungen [85], bei denen die Krümmung jeweils lokal an der untersuchten Meßstelle bestimmt wurde, zeigen, daß an neuen Rohrbögen nach gleichmäßiger Wärmebehandlung die Höhe der Schallgeschwindigkeit unabhängig von der geometrischen Lage auf dem Bogen sehr konstant ist.

## 7.2.2 Betriebsbeanspruchte Rohrbögen

### Rohrbogen C

Werkstoff: 13 CrMo 4-4  
Zustand: betriebsbeansprucht, ca. 240.000 h  
Gefügekategorie: 2a/2b (Zugfaser)  
1 (neutrale Faser)

Die Bilder 7.5 und 7.6 zeigen die Ergebnisse der Messungen an einem Rohrbogen der Gefügekategorie 2a/2b an der Zugfaser und 1 an der neutralen Faser. Der Rohrbogen war zur Zeit der Messung noch in Betrieb und wurde während einer Revision untersucht. Die Angaben zur Gefügekategorie beziehen sich auf den Befund von Oberflächengefügeuntersuchungen, die unmittelbar im Bereich der Ultraschall-Meßstellen durchgeführt wurden.

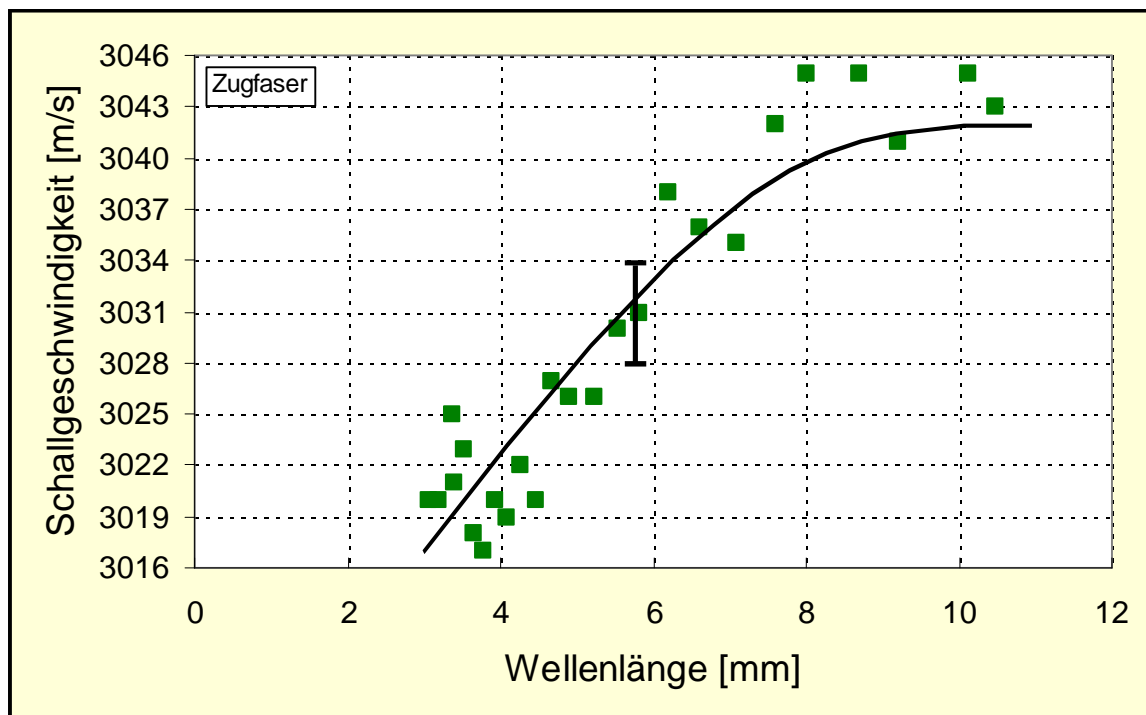


Bild 7.5: Meßkurve eines betriebsbeanspruchten Rohrbogens aus 13 CrMo 4-4.

An der Zugfaser ist ein deutlicher Gradient in der Schallgeschwindigkeit nachzuweisen. Zwischen 3 und 8 mm Wellenlänge steigt die Schallgeschwindigkeit von knapp 3020 m/s auf über 3040 m/s an. Das entspricht einer Zunahme um 0,7 – 0,8 % , welche deutlich über der Meßgenauigkeit liegt (Bild 7.5).

An der neutralen Faser ist ebenfalls ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Eindringtiefe festzustellen (Bild 7.6). Die Änderung ist jedoch geringer als an der Zugfaser. Die Schallgeschwindigkeit steigt von ca. 3006 m/s bei 3 mm Wellenlänge auf 3015 m/s bei 8 mm Wellenlänge an. Das entspricht einem Anstieg um ca. 0.3 %.

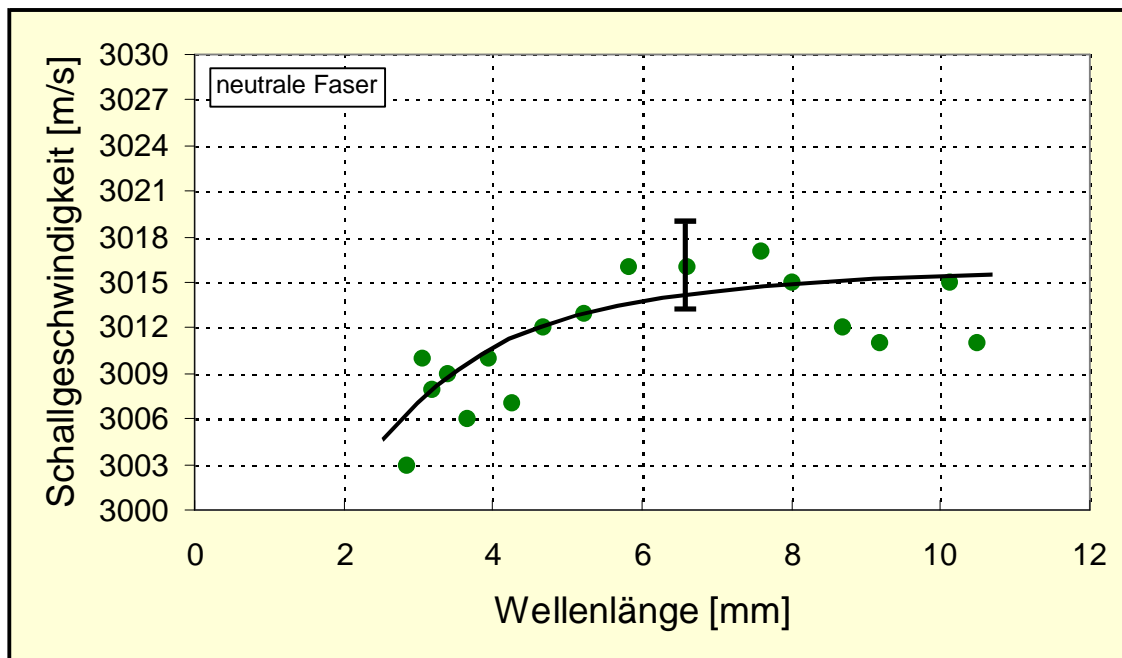


Bild 7.6: Meßkurve eines betriebsbeanspruchten Rohrbogens aus 13 CrMo 4-4.

## Rohrbogen D

Werkstoff: 12 Ch 1 MF (vergleichbar 12 CrMoV 12-1)  
Zustand: betriebsbeansprucht  
Gefügekategorie: 3b/4 (Zugfaser)  
2a/2b (70 mm neben der Zugfaser)  
1 (neutrale Faser)

Mit Rohrbogen D lag ein ausgebautes Rohrbogen mit starker Schädigung vor. Mit Hilfe der Oberflächenmetallographie wurde als maximaler Schädigungsgrad an der Zugfaser die Gefügekategorie 3b/4 festgestellt. Zwischen der Zugfaser und der neutralen Faser lag noch die Gefügekategorie 2a/2b vor. An diesen beiden Stellen sowie zum Vergleich an der neutralen Faser wurden Ultraschallmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Bildern 7.7 und 7.8 dargestellt.

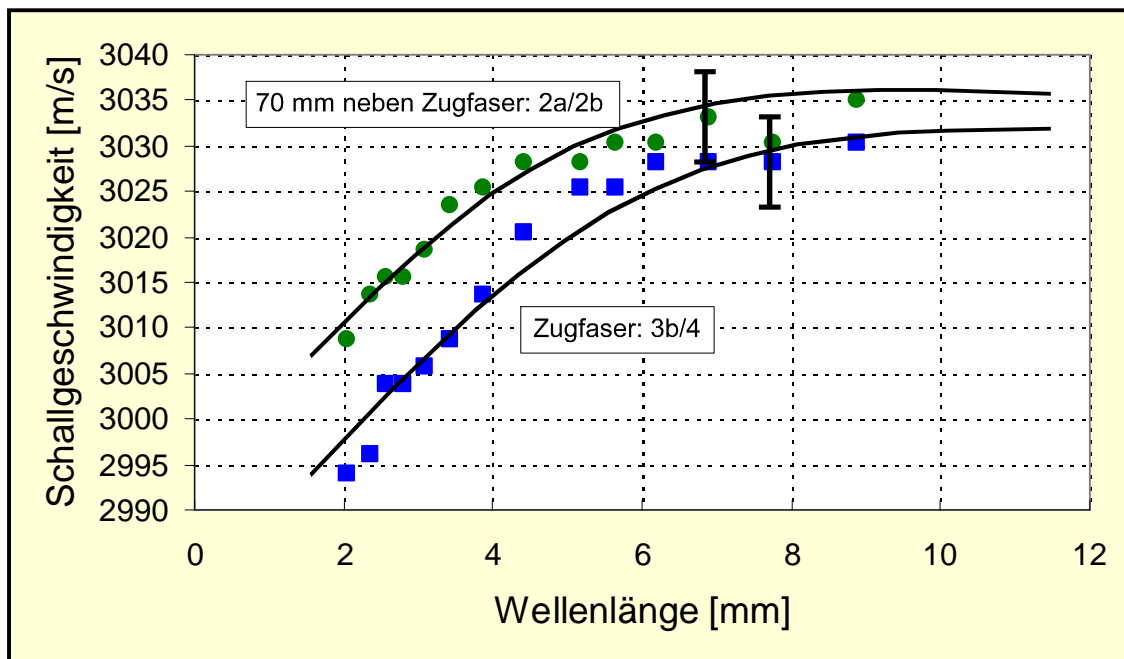


Bild 7.7: Meßkurve eines betriebsbeanspruchten Rohrbogens aus 12 Ch 1 MF.

An der Zugfaser ist entsprechend der starken Schädigung ein deutlicher Gradient in der Schallgeschwindigkeit festzustellen. Zwischen ca. 2 und 8 mm Wellenlänge nimmt die

Schallgeschwindigkeit von 2995 m/s auf 3030 m/s zu, was mehr als einem Prozent entspricht. An der weniger geschädigten Meßstelle zwischen der Zug- und der neutralen Faser, mit der Gefügekategorie 2a/2b ist die Änderung der Schallgeschwindigkeit mit ca. 0,8% geringer, aber immer noch deutlich nachweisbar (Bild 7.7).

An der ungeschädigten neutralen Faser hingegen ist die Schallgeschwindigkeit im untersuchten Tiefenbereich konstant (Bild 7.8).

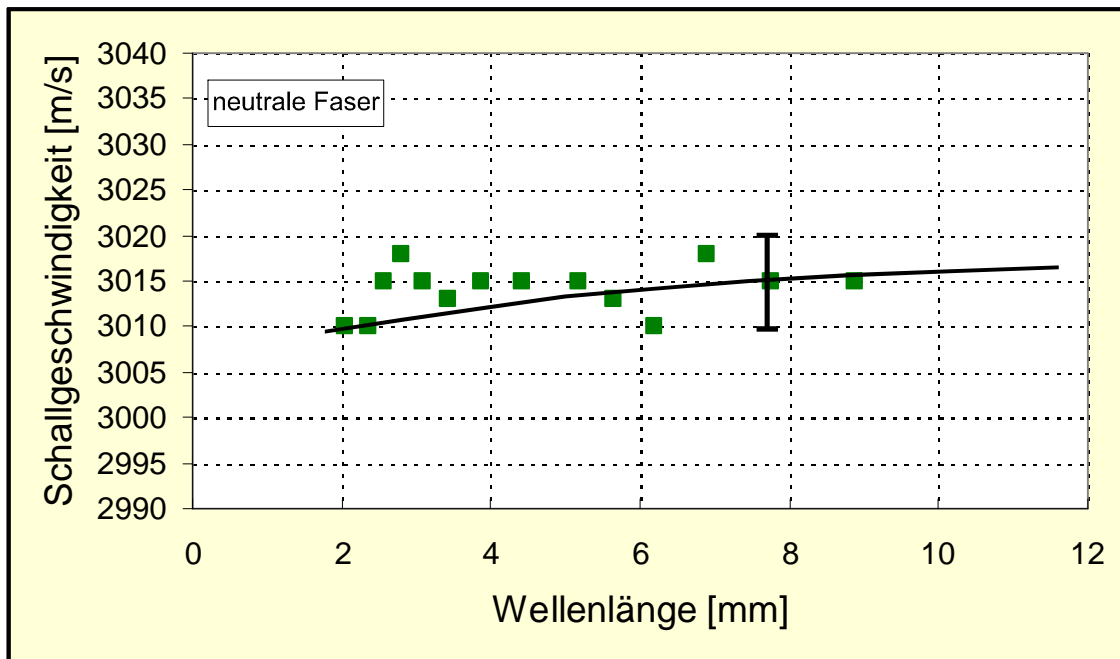


Bild 7.8: Meßkurve eines betriebsbeanspruchten Rohrbogens aus 12 Ch 1 MF.

### Rohrbogen E und F

Werkstoff:	X20 CrMoV 12-1
Zustand:	betriebsbeansprucht, 123.000 h
Gefügekategorie:	1 (Rohrbogen E, Zugfaser) 2b/3a (Rohrbogen F, Zugfaser)

Die Rohrbögen E und F gehören zur selben Frischdampfleitung und sind geometriegleich. Die Messungen der beiden Bögen können deshalb bedingt miteinander vergli-

chen werden. Rohrbogen E ist mit ca 30 Poren/mm<sup>2</sup> schwach geschädigt (Gefügekategorie 1). Rohrbogen F ist stark geschädigt, wobei die metallographischen Untersuchungen darauf hindeuten, daß die Schädigung nicht nur oberflächennah vorliegt, sondern weit in die Tiefe reicht.

Die Ultraschallmessungen zeigen für beide Rohrbögen einen flachen Geschwindigkeitsgradienten, mit einer Zunahme der Schallgeschwindigkeit um 0,3-0,4% zwischen 1 und 6 mm Wellenlänge. Die Absolutwerte der Schallgeschwindigkeit des stärker geschädigten Bogens F liegen um ca. 0,4 - 0,5% unter denen des schwach geschädigten Bogens E (Bild 7.9). Ein Vergleich ist jedoch nur unter der Voraussetzung zulässig, daß beide Rohrbögen im gleichen Gefügezustand in Betrieb gingen.

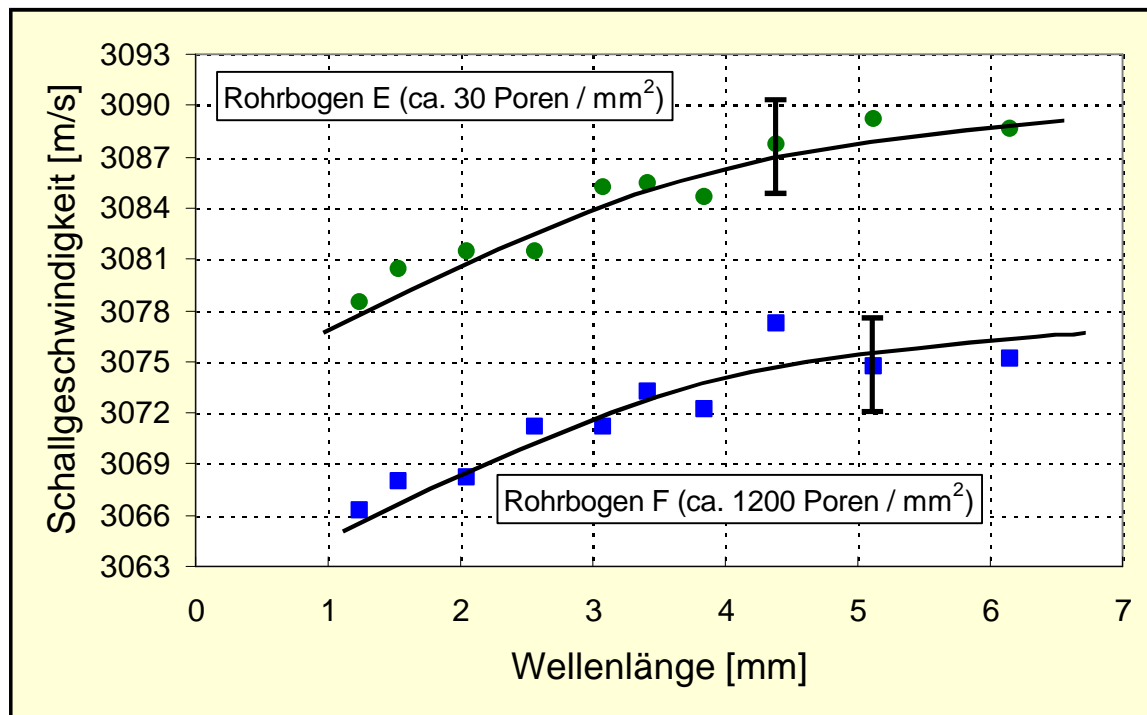


Bild 7.9: Meßkurven zweier betriebsbeanspruchter Rohrbögen aus X20 CrMoV 12-1.



## Rohrbogen G

Werkstoff: 13 CrMo 4-4  
Zustand: betriebsbeansprucht, 203.000 h  
Gefügekategorie: 3a (Zugfaser)

Bei Rohrbogen G handelt es sich um einen Faltenrohrbogen einer HZÜ-Leitung, der im ausgebauten Zustand vorlag. Die Geometrie des Bogens ließ Ultraschallmessungen nur entlang der Zugfaser zu, wo mit Hilfe der Replika-Technik der Schädigungsgrad 3a nachgewiesen wurde.

Die Ultraschallmessung lieferte dort einen Geschwindigkeitsverlauf mit einem deutlichen oberflächennahen Gradienten. Die Meßkurve ist in Bild 7.10 dargestellt.

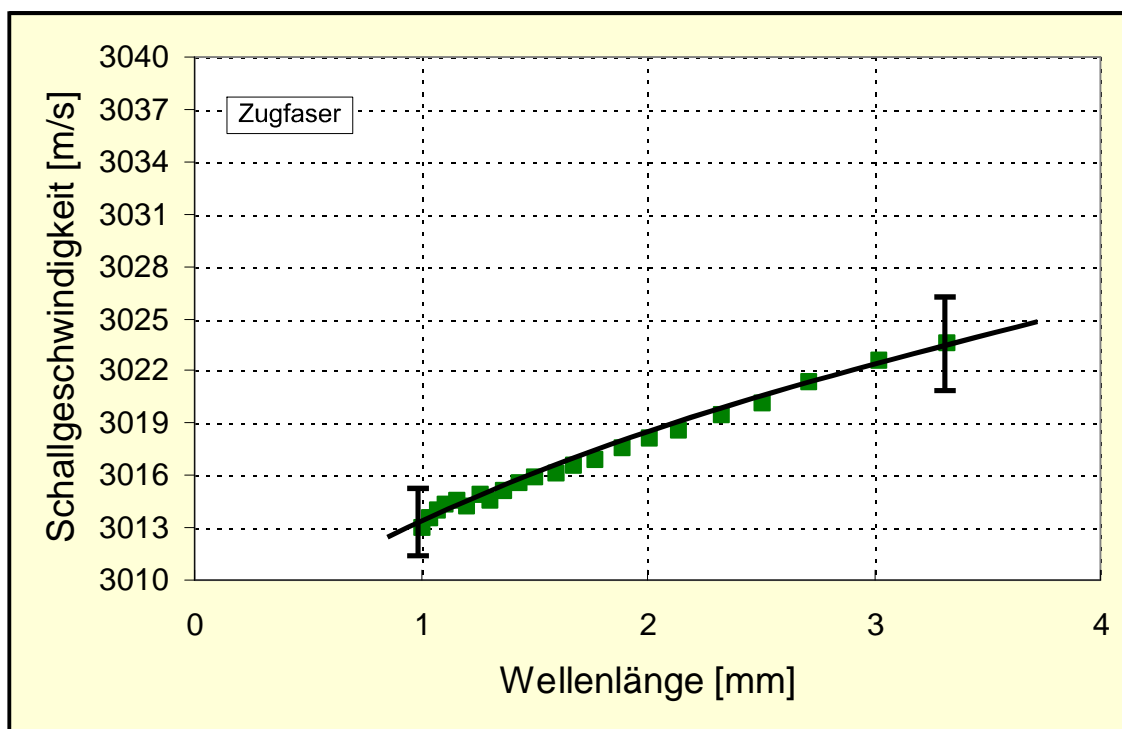


Bild 7.10: Meßkurve eines betriebsbeanspruchten Rohrbogens aus 13 CrMo 4-4.

Da der Rohrbogen für zerstörende Untersuchungen zur Verfügung stand, wurden nach der Ultraschallmessung an der entsprechenden Stelle Materialproben zur metallographischen Bestimmung der Schädigung über den Querschnitt entnommen. Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen sowie die Korrelation mit den Ultraschallmessungen sind in Kapitel 8.3.2 zusammengefaßt. Es läßt sich dort zeigen, daß der Verlauf der Ultraschallgeschwindigkeit in die Tiefe in Korrelation zu bringen ist mit der metallographisch ermittelten Porosität.

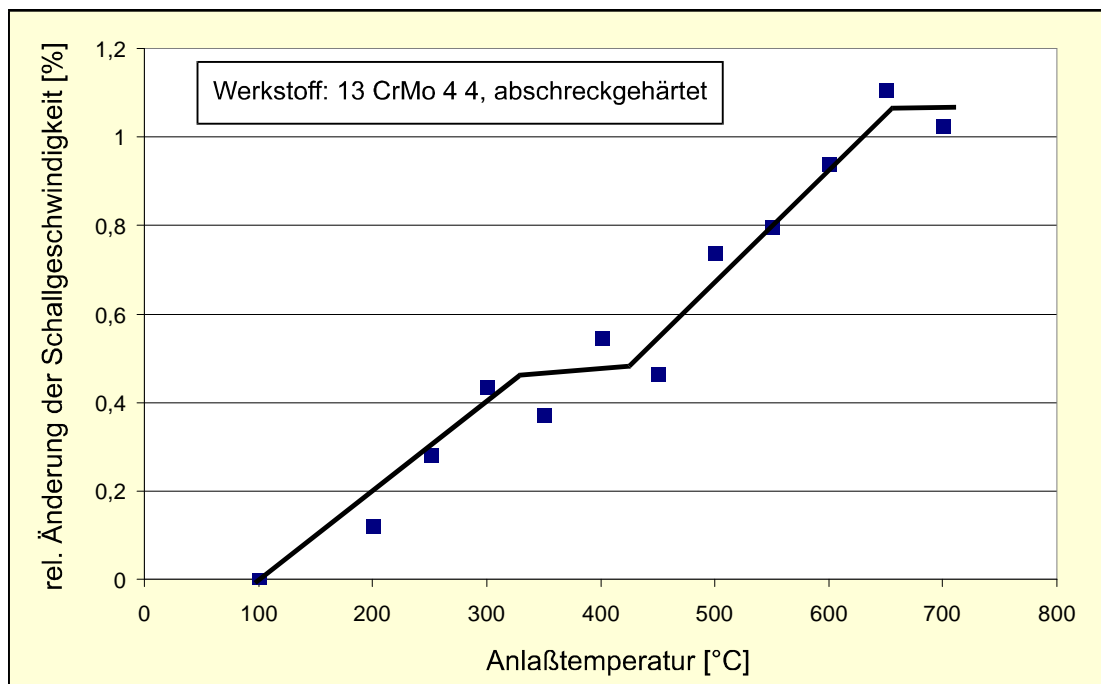
### **7.3 Betrachtungen zum Absolutwert der Schallgeschwindigkeit**

Die Meßkurven der Ultraschall-Laminographie entstehen aus mehreren Messungen der Schallgeschwindigkeit mit jeweils unterschiedlicher Eindringtiefe der Oberflächenwelle. Sie beinhalten eine Information über die Höhe der Schallgeschwindigkeit und deren Änderungen im oberflächennahen Bereich eines Bauteils. Von dieser Information wurde bisher vor allem die tiefenabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit bewertet, da diese in einem Zusammenhang zu oberflächennaher Zeitstandschädigung steht. Durch einen Vergleich der Schallgeschwindigkeit unterschiedlicher Tiefen an ein und der selben Stelle wurde somit selektiv der Einfluß von Zeitstandschädigung unabhängig von möglichen fertigungsbedingten Ausgangsgefügen betrachtet.

In der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von Gefügezuständen, die noch keiner Schädigung im metallographischen Sinn zuzuordnen sind, steckt jedoch auch ein weiteres Entwicklungspotential dieser Meßmethode. Es scheint plausibel, daß bei vergleichbarer Betriebsbeanspruchung die Gefügeänderungen an unterschiedlichen Bauteilen des selben Werkstoffs ähnlich ablaufen. Änderungen im Gefüge des Werkstoffs und seinen physikalischen Eigenschaften führen aber immer auch zu einer Änderung seiner Schallgeschwindigkeit. Durch den Vergleich von Werkstoffen nach unterschiedlicher Betriebsbeanspruchung oder durch betriebsbegleitende Messungen an Bauteilen über einen längeren Zeitraum ist zu erwarten, daß sich eine systematische Veränderung sowohl in der Höhe als auch im tiefenabhängigen Verlauf der Schallgeschwindigkeit nachweisen läßt, die eine Korrelation zum Gefügezustand erlaubt.

Aus Voruntersuchungen an Bauteilproben im Labor und aus bisher vorliegenden Meßkurven von Rohrbögen aus dem Werkstoff X20 CrMoV 12 1 läßt sich eine systematische Veränderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Betriebsbeanspruchung bereits jetzt erkennen. Dieser Zusammenhang wird nachfolgend anhand experimenteller Ergebnisse kurz erläutert. Die Schallgeschwindigkeit von gehärtetem Stahl ist etwas geringer als die von geglühtem Stahl. Dies ist eine Tatsache, auf die Daten aus der Literatur vereinzelt hinweisen [z.B. 84 (Tab. 9.1), 19 (Kap. 7.1)]. In Voruntersuchungen zu der vorliegenden Arbeit wurde dieser Zusammenhang am Werkstoff 13

CrMo 4-4 ebenfalls beobachtet. Proben aus diesem Stahl wurden abschreckgehärtet und anschließend bei stufenweise zunehmender Temperatur angelassen. Die Ultraschallmessungen an den Proben wurden mit einer Meßmethode [30] durchgeführt, bei der die Eigenfrequenzen einer zylindrischen Probe bestimmt werden. Mit dieser Methode sind relative Änderungen der Schallgeschwindigkeit mit hoher Genauigkeit nachweisbar. Ein Ergebnis dieser Messungen ist in Bild 7.11 dargestellt.



*Bild 7.11: Zunahme der Schallgeschwindigkeit eines gehärteten Stahls nach stufenweiser Anlaßglühung.*

Die Auftragung der relativen Änderung der Schallgeschwindigkeit über der Anlaßtemperatur zeigt einen bereichsweise linearen Verlauf, der im Zusammenhang mit den verschiedenen Erholungsstufen zu sehen ist. Die Schallgeschwindigkeit nimmt mit der Intensität der Glühbehandlung zu, während gleichzeitig die Härte abnimmt. Die Bandbreite der Schallgeschwindigkeitsänderung beträgt bei gehärtetem 13 CrMo 4 4 etwa 1%. Einen ähnlichen Verlauf liefern auch Messungen der elektrischen Leitfähigkeit an unterschiedlich hoch angelassenen Proben.

Das Wissen um diese gefügeabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit ist bei der Bewertung der absoluten Höhe der Schallgeschwindigkeit von betriebsbeanspruchtem Material von Bedeutung. Die betrachteten Rohrbögen, insbesondere die aus den hochlegierten 9-12%-Cr-Stählen, gehen im vergüteten Zustand in Betrieb. Die langzeitige thermische Beanspruchung im Betrieb übt auf ein Bauteil eine ähnliche, nur langsamer ablaufende, Wirkung wie eine Anlaßglühung aus. Die hohe Betriebstemperatur führt zu einer Homogenisierung des Gefüges, das sich mit zunehmendem Betrieb einem thermodynamisch stabileren Zustand annähert. Es ist deshalb davon auszugehen, daß - unabhängig von irreversibler Schädigung - in einem neuen Bauteil die Schallgeschwindigkeit zunächst ansteigt. Erste Indizien, die diese Annahme bekräftigen, liegen in den bisher ermittelten Meßkurven des Werkstoffs X20 CrMoV 12-1 vor.

Bild 7.12 zeigt die Geschwindigkeitsniveaus von Bauteilen aus dem Werkstoff X20 CrMoV 12-1 nach unterschiedlicher Betriebsbeanspruchung. Das niedrigste Niveau wurde an neuen Geradrohren im vergüteten Zustand gemessen. Insgesamt wurden Messungen an 12 Stellen dreier Rohre aus einer Charge durchgeführt. Alle 12 Meßkurven liegen in dem skizzierten Streuband der Breite 0.2%. Dem sind die Geschwindigkeitsniveaus ungeschädigter Rohrbögen aus zwei Kraftwerken mit unterschiedlicher Betriebsdauer gegenübergestellt. Das mittlere Niveau repräsentiert die Höhe der Schallgeschwindigkeit eines Rohrbogen nach ca. 69.000 Betriebsstunden. Das obere Niveau wurde an ungeschädigten Rohrbögen mit einer Betriebsdauer von ca. 123.000 Stunden gemessen. Unter der Annahme, daß der Werkstoff der betrachteten Rohre bzw. Rohrbögen in einem vergleichbaren Ausgangszustand vorlag, läßt sich aus diesen Ergebnissen eine Erhöhung im Niveau der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Betriebsdauer ablesen. Diese Tatsache zeigt die Bedeutung der relativen Änderung der Schallgeschwindigkeit, wie sie sich aus dem Vergleich der Randschicht mit tieferen Zonen oder auch unterschiedlich hoch beanspruchten Bereichen der selben Komponente ergibt.

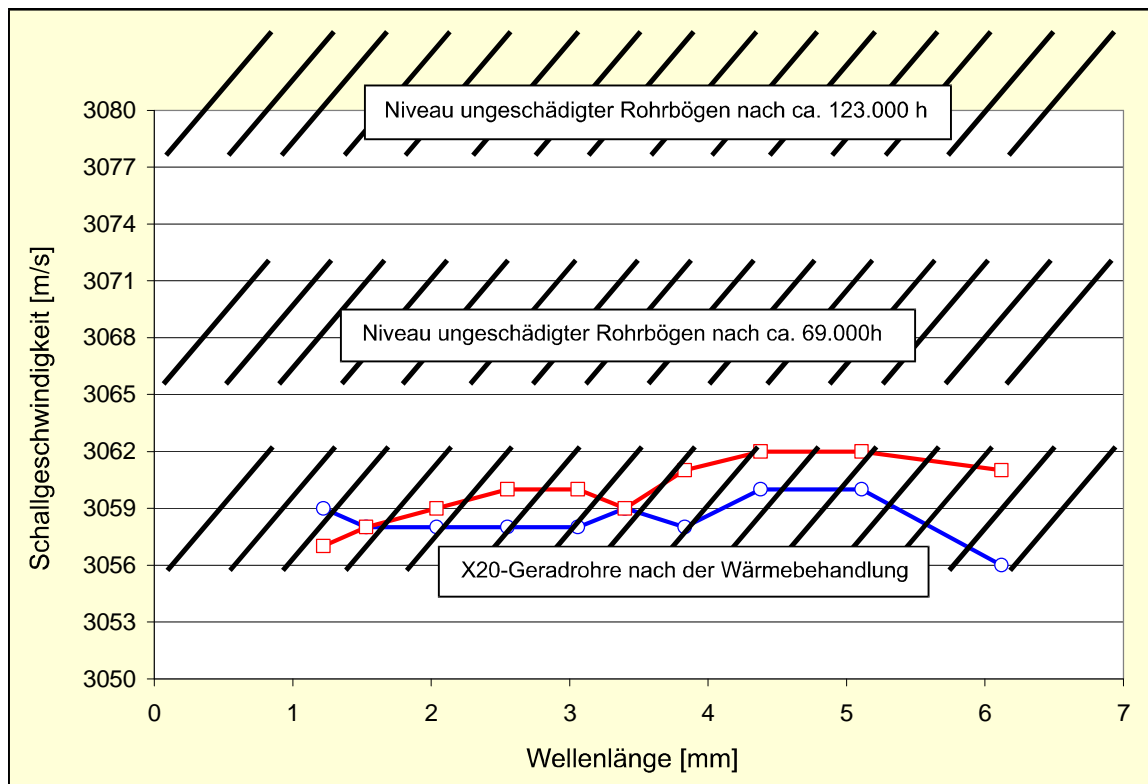


Bild 7.12: Betriebsbedingte, schädigungsunabhängige Änderung des Absolutwerts der Schallgeschwindigkeit am Beispiel des Werkstoffs X20 CrMoV 12-1.

Diese Ergebnisse zeigen, daß allein aufgrund einer niedrigen Schallgeschwindigkeit nicht auf irreversible Zeitstandschädigung geschlossen werden kann. Die Bewertung der absoluten Schallgeschwindigkeit ist insbesondere dann als schwierig zu betrachten, wenn Rohrbögen mit unbekannter Betriebsbeanspruchung und Wärmebehandlung im Ausgangszustand miteinander verglichen werden. Gerade in solchen Fällen sind auch Vergleiche zwischen Randfaser und neutraler Faser am Rohrbogen oder ein Vergleich mit Messungen an einem geraden Schenkel heranzuziehen. Grundsätzlich müssen die Ergebnisse der absoluten Schallgeschwindigkeit mit den tatsächlichen Betriebsdaten korreliert werden.

Auf der anderen Seite sind diese Messungen ein Indiz dafür, daß die betriebsbedingte Änderung der Schallgeschwindigkeit nicht willkürlich ist, sondern einer Gesetzmäßigkeit unterliegt. Eine nähere Untersuchung dieses Zusammenhangs unter besonderer Be-

rücksichtigung der absoluten Höhe der Schallgeschwindigkeit scheint sinnvoll, um zu einer besseren Beurteilung des Gefügezustands anhand von Schallgeschwindigkeitsmessungen zu kommen.

## **8. Abschätzung des Schädigungsgradienten aus den Meßkurven**

Die Abschätzung des Schädigungsprofils in die Tiefe anhand der Meßkurven ist in zwei Schritten vorzunehmen. Zunächst ist aus den Meßkurven der integralen Schallgeschwindigkeit über der Wellenlänge der tatsächliche Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe zu berechnen. In einem weiteren Schritt ist dem Profil der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe ein Schädigungsprofil zuzuordnen.

### **8.1 Tatsächlicher Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe**

Die Schallenergie einer Rayleighwelle beschränkt sich auf eine oberflächennahe Schicht und nimmt in die Tiefe rasch ab (vgl. Kap. 6.2). Dies ist in Bild 8.1a anhand des Verlaufs der longitudinalen und transversalen Schwingungsamplitude dargestellt. Die longitudinale Schwingungskomponente ist in Ausbreitungsrichtung der Welle polarisiert und die transversale Komponente senkrecht dazu in die Tiefe. In der Summe ergibt sich eine elliptische Teilchenbewegung (vgl. Kap. 3.2.1).

Wenn der Werkstoff, auf dem sich eine Rayleighwelle ausbreitet, nicht homogen ist, sondern einen Eigenschaftsgradienten in die Tiefe aufweist, so wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Welle durch Änderungen der Eigenschaften in der Randschicht geprägt.

Um aus einer Meßkurve der integralen Schallgeschwindigkeit über der Wellenlänge den tatsächlichen Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe bei konstanten Werkstoffparametern zu rekonstruieren, ist eine Gewichtung durchzuführen, die diese Eindringcharakteristik der Rayleighwelle berücksichtigt. In dieser Arbeit soll hierfür die Kurve benutzt werden, die sich aus der Vektorsumme der beiden Schwingungsanteile ergibt (vgl. Bild 8.1a).



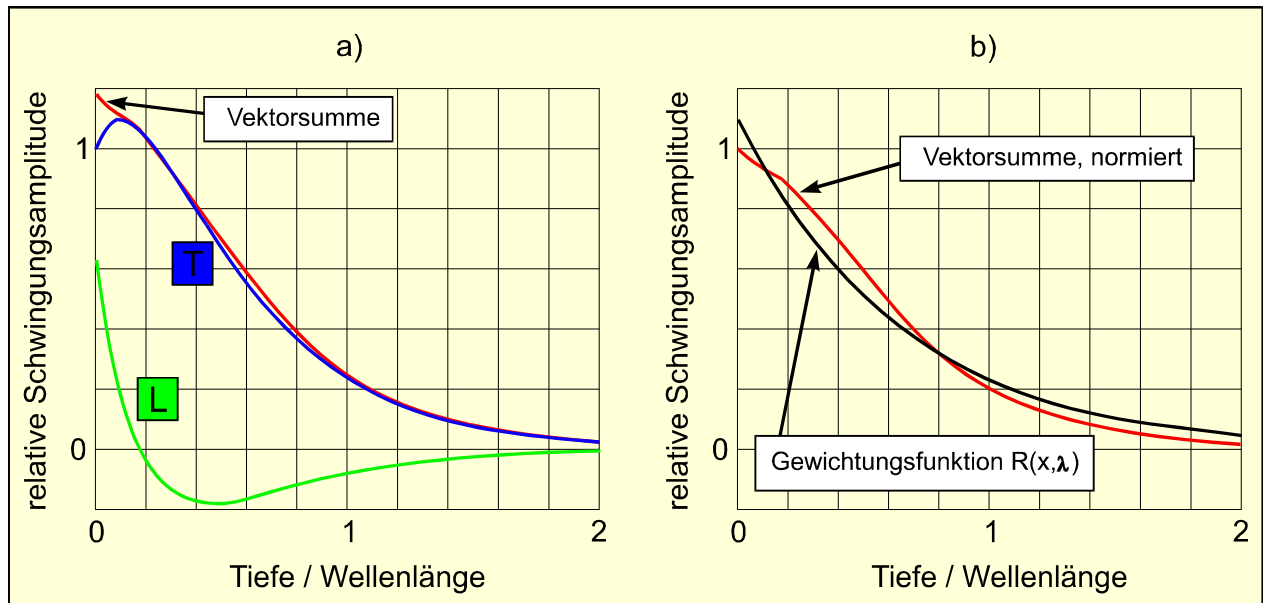


Bild 8.1: Abnahme der Schwingungsamplitude einer Rayleighwelle in die Tiefe.

In Bild 8.1b ist diese Kurve normiert auf den Wert an der Oberfläche dargestellt. Die Kurve entspricht keiner elementar integrierbaren Funktion. Um die Berechnung zu vereinfachen, wird sie durch eine Exponentialfunktion angenähert, welche in Bild 8.1b mit  $R(x, \lambda)$  bezeichnet ist. Hierbei entspricht  $x$  der Tiefe im Werkstoff und  $\lambda$  der Wellenlänge. Die Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{int}}(\lambda)$ , die bei einer gegebenen Wellenlänge  $\lambda$  gemessen wird, kann als integraler Mittelwert über die von der Welle erfaßte Tiefe betrachtet werden, wie dies in Bild 8.2 dargestellt und in Gleichung 8.1 formuliert ist. Die Kurve  $c(x)$  in Bild 8.2 beschreibt den tatsächlich vorliegenden Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe.

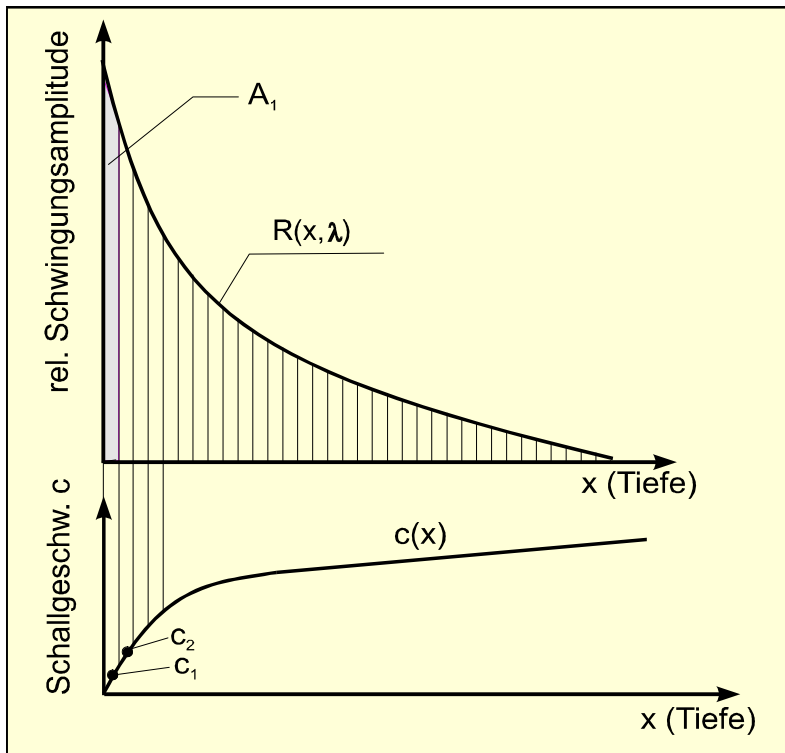


Bild 8.2: Prinzip der integralen Mittelwertbildung.

$$c_{\text{int}}(I) = \frac{\sum_n (A_n(I) \cdot c_n)}{\sum_n (A_n(I))} \quad \text{Gl. (8.1)}$$

Durch Verkleinerung der Flächenelemente  $A_n$  wird aus der Summation nach Gleichung 8.1 die Integration nach Gleichung 8.2:

$$c_{\text{int}}(I) = \frac{\int_0^{2.5I} R(x, I) \cdot c(x) dx}{\int_0^{2.5I} R(x, I) dx} \quad \text{Gl. (8.2)}$$

mit:  $R(x, \lambda)$  nach Gl. (8.3)

$c(x)$  nach Gl. (8.4)

$$R(x, I) = A \cdot e^{\frac{-x}{I \tau}} \quad \text{Gl. (8.3)}$$

mit:

$R(x, \lambda)$  : tiefenabhängige Änderung der relativen Schallamplitude

$x$  : Tiefenkoordinate

$\lambda$  : Wellenlänge

$A = 1.1$  (maximale relative Amplitude an der Oberfläche)

$\tau = 0.65$  („Funktionskonstante“)

Es ist ausreichend genau, die Integration über den Bereich von der Oberfläche ( $x = 0$ ) bis in eine Tiefe von  $x = 2.5 \lambda$  ( $\lambda$ : Wellenlänge) durchzuführen, da in dieser Tiefe die Welle nahezu völlig abgeklungen ist.

Gleichung 8.2 beschreibt einen mathematischen Zusammenhang zwischen der experimentell ermittelten Meßkurve der integralen Schallgeschwindigkeit  $c_{\text{int}}(\lambda)$  und dem tatsächlichen Verlauf  $c(x)$  der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe. Beide Kurven sind ähnlich, jedoch aufgrund der Eindringcharakteristik der Rayleighwelle unterschiedlich skaliert.

Für eine elementare Lösung ist eine Annahme über die Natur der Funktion  $c(x)$  zu machen. Es ist plausibel, für  $c(x)$  eine stetige, in die Tiefe zunehmende Funktion anzunehmen. Die prinzipielle Wahl der Funktion  $c(x)$  ist vom Verlauf der jeweiligen Meßkurve abhängig. Für die meisten der bisher experimentell ermittelten Meßkurven hat sich gezeigt, daß sie durch eine Funktion beschrieben werden können, die eine exponentielle Annäherung von einem Minimalwert an der Oberfläche an einen Sättigungswert in der Tiefe beschreibt. Für die nachfolgende Berechnung werde deshalb angenommen, daß  $c(x)$  durch eine Exponentialfunktion nach Gleichung (8.4) darstellbar sei.

$$c(x) = c_{\min} + (c_0 - c_{\min}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{x}{\varphi}}\right) \quad \text{Gl. (8.4)}$$

mit:

$c_{\min}$  : minimale Schallgeschwindigkeit des geschädigten Bereichs (Oberfläche)

$c_0$  : Schallgeschwindigkeit des ungeschädigten Bereichs (Tiefe)

$x$  : Tiefenkoordinate

$\varphi$  : „Funktionskonstante“

In dieser Funktion entspricht der Wert  $c_{\min}$  der minimalen Schallgeschwindigkeit des geschädigten Werkstoffs an der Oberfläche und  $c_0$  der Schallgeschwindigkeit des ungeschädigten Materials in der Tiefe. Die Steigung der Funktion ist ein Maß für die Zunahme der Schallgeschwindigkeit bzw. die Abnahme der Schädigung in die Tiefe. Wie aus Bild 8.3 hervorgeht, kann die Steigung allein durch die Wahl der „Funktionskonstanten“  $\varphi$  in weiten Grenzen eingestellt werden, von einer sehr oberflächennahen Änderung bis hin zu einem nahezu linearen Verlauf.

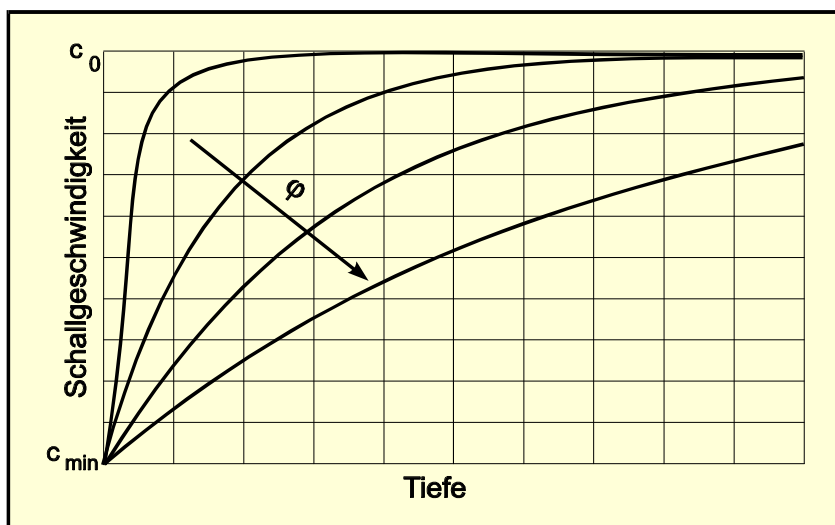


Bild 8.3: Durch eine Exponentialfunktion nach Gleichung 8.4 idealisierte Schallgeschwindigkeitsverläufe  $c(x)$ .

Der Term auf der linken Seite von Gleichung (8.2) entspricht der integralen Schallgeschwindigkeit, die mit der Ultraschall-Laminographie bei einer Wellenlänge  $\lambda$  gemessen wird. Der Term im Nenner der rechten Seite entspricht der Fläche unter der Kurve  $R(x, \lambda)$  bei der entsprechenden Wellenlänge. Die unbekannte Größe ist die Funktion  $c(x)$ , die den realen Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe beschreibt, und für die hier eine Exponentialfunktion nach Gleichung (8.4) angenommen wird.

Durch Integration der rechten Seite von Gleichung (8.2) erhält man  $c_{\text{int}}(\lambda)$  ausgedrückt durch die Parameter  $c_{\text{min}}$ ,  $c_0$  und  $\varphi$ , welche gemäß Gleichung 8.4 den Verlauf der gesuchten Funktion  $c(x)$  bestimmen.

$$c_{\text{int}}(I) = c_{\text{min}} + (c_0 - c_{\text{min}}) \cdot \left[ 1 + \frac{e^{-2.5(\frac{I}{j} + \frac{1}{t})} - 1}{(\frac{I}{j} + 1)(1 - e^{-\frac{2.5}{t}})} \right] \quad \text{Gl. (8.5)}$$

Es ist zu erkennen, daß unter Annahme einer Exponentialfunktion für  $c(x)$  auch die entsprechende Kurve  $c_{\text{int}}(\lambda)$  einer Exponentialfunktion gehorcht. Bei Vorliegen eines Gradienten ist der Verlauf der Meßkurve  $c_{\text{int}}(\lambda)$  flacher als der tatsächliche Verlauf der Schallgeschwindigkeit  $c(x)$ , was auch anschaulich ist, da in die Meßkurven trotz zunehmender Eindringtiefe der oberflächennahe Bereich stets mit eingeht.

Um aus einer integralen Meßkurve den tatsächlichen Verlauf der Schallgeschwindigkeit zu erhalten, ist an diese eine Funktion  $c_{\text{int}}(\lambda)$  nach Gleichung (8.5) durch Wahl der Parameter  $c_{\text{min}}$ ,  $c_0$  und  $\varphi$  anzupassen und mit diesen Parametern dann der tatsächliche Verlauf  $c(x)$  nach Gleichung (8.4) zu berechnen.

Diese Vorgehensweise ist entsprechend auch auf andere Typen der Funktion  $c(x)$  anwendbar.

## 8.2 Verlauf der Schädigung in die Tiefe

Für eine Beurteilung des Schädigungszustands anhand der Meßkurven der Ultraschall-Laminographie ist aus der Änderung der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe der Verlauf der metallographisch nachweisbaren Schädigung abzuschätzen. Es gibt keine Beziehung zwischen der Schallgeschwindigkeit in einem Werkstoff und den in der Praxis zur Beurteilung von Zeitstandschädigung üblichen Gefügeklassen. Ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen soll über die Porosität hergestellt werden. Auf der einen Seite finden sich in der Literatur Arbeiten über die Änderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Porosität. Auf der anderen Seite kann den unterschiedlichen Gefügeklassen durch Auszählen und Vermessen der Poren oder durch bildanalytische Verfahren eine mittlere Porosität zugeordnet werden.

Über den Zusammenhang zwischen der Porosität eines Materials und dessen Schallgeschwindigkeit sind in der Literatur verschiedene Theorien verfügbar. In der vorliegenden Arbeit soll die Gleichung (8.6) nach [62] zur Anwendung kommen, die die Porositätsabhängigkeit des E-Moduls beschreibt. Da darin sowohl die Porenform als auch -orientierung berücksichtigt wird, kann die modellhafte Porosität an das Erscheinungsbild der Zeitstandschädigung angepaßt werden. Die Poren werden als Rotationsellipsoide mit einem Achsenverhältnis  $z/x$  modelliert.

$$E(P) = E_0 \cdot (1 - P^{2/3})^s$$

Gl. (8.6)

$$s = 1,21 \left[ \frac{z}{x} \right]^{1/3} \sqrt{1 + \left( \left[ \frac{z}{x} \right]^{-2} - 1 \right) \cos^2 \phi}$$

mit:

- $E_0$  : Elastizitätsmodul des porenfreien Materials
- $E(P)$  : Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Porosität
- $P$  : Porosität in Vol.%
- $z/x$  : Achsenverhältnis der rotationsellipsoiden Poren
- $\cos^2 \phi$  : Orientierungsfaktor der Rotationsellipsoide zur Schallausbreitungsrichtung

Die Definition des Achsenverhältnisses  $z/x$  und des Orientierungsfaktors  $\cos^2 \phi$  geht aus Bild 8.4 hervor.

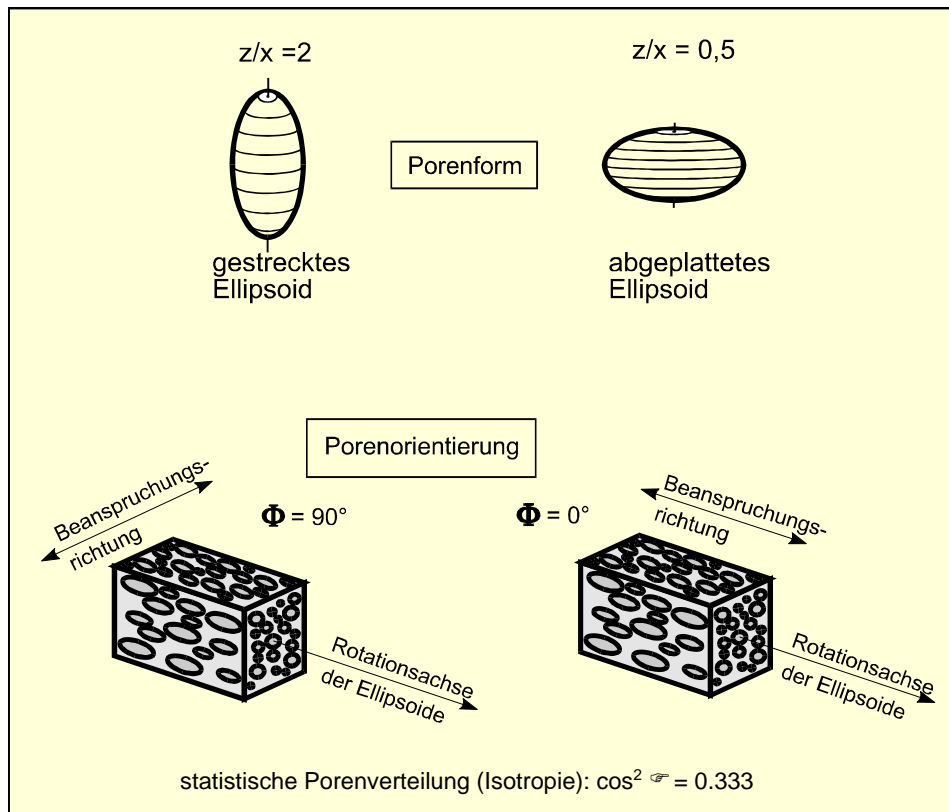


Bild 8.4: Achsenverhältnis  $z/x$  und Orientierungsfaktor  $\cos^2 \phi$  in Gleichung 8.6.

In Bild 8.5 ist der Verlauf der Rayleighwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Porosität unter Anwendung von Gleichung (8.6) für den E-Modul und unter Annahme einer konstanten Querkontraktionszahl aufgetragen. Letztere Annahme scheint aufgrund der verfügbaren Literatur rechtfertigbar [62]. Die Abnahme der Dichte infolge der Porosität ist mitberücksichtigt.

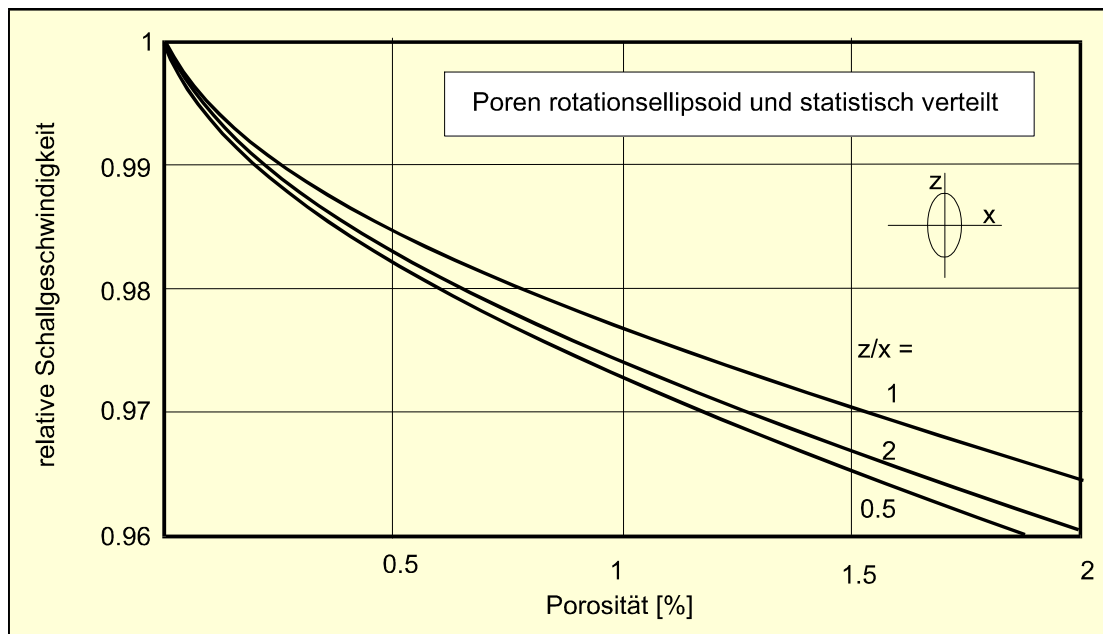


Bild 8.5: Relative Änderung der Rayleigh-Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Porosität nach Gleichung 8.6.

Mit Hilfe dieses Diagramms bzw. von Gleichung 8.6 kann der tiefenabhängigen Änderung der Schallgeschwindigkeit ein Verlauf der Porosität und damit der Schädigung in die Tiefe zugeordnet werden.

Eine Zeitstandporosität von 1% dürfte bereits einer fortgeschrittenen Schädigung oberhalb der Gefügeklasse 3a entsprechen. Beispielhaft können hierfür Ergebnisse des Mannesmann-Forschungsinstituts angeführt werden in denen neben metallographischen Untersuchungen zum Teil auch Messungen der Dichte durchgeführt wurden. In [24] wurde an einem Bauteil aus X20 CrMoV 12 1 eine als relativ hoch bezeichnete Abnahme der Dichte um 0,75 % gemessen. Die Zeitstandfestigkeit dieses Bauteils lag unter dem Streuband nach DIN 17175. Als Beispiel eines niedrig legierten ferritischen Werkstoffs kann eine Untersuchung an einem betriebsbeanspruchten Rohrbogen aus 14 MoV 6 3 herangezogen werden [22]. Dort wurde unter anderem auch die Abnahme der Dichte in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad bestimmt. Für die Schädigungsklasse 4 wird eine Dichteabnahme um etwa 0,76% angegeben. Diese Beispiele sind vor allem



deswegen von Relevanz, da die Messungen an Bauteilproben und nicht an Proben aus relativ kurzen Zeitstandversuchen durchgeführt wurden.

Aus dem Diagramm in Bild 8.5 kann für eine Porosität von 0,75 % eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit um ca. 2 % abgelesen werden. Diese Größenordnung erscheint aufgrund eigener Messungen und der gesichteten Literatur als realistisch.

## 8.3 Anwendungsbeispiel

### 8.3.1 Berechnung des tatsächlichen Geschwindigkeitsverlaufs $c(x)$

Die Beurteilung des Schädigungsverlaufs anhand der Ergebnisse der Ultraschall-Messungen soll nachfolgend an einem Beispiel durchgeführt werden. Das Ergebnis wird mit metallographischen Untersuchungen über den Querschnitt korreliert.

Ein Faltenrohrbogen einer HZÜ-Leitung aus 13 CrMo 4-4 (Rohrbogen G) stand hierzu für Untersuchungen im Labor zur Verfügung. An dem Rohrbogen mit einer Betriebszeit von ca. 203.000 Stunden wurde der Schädigungsgrad 3a festgestellt. Die Ultraschall-Messungen entlang der Zugfaser lieferten einen Geschwindigkeitsverlauf mit einem deutlichen oberflächennahen Gradienten (Bild 8.6).

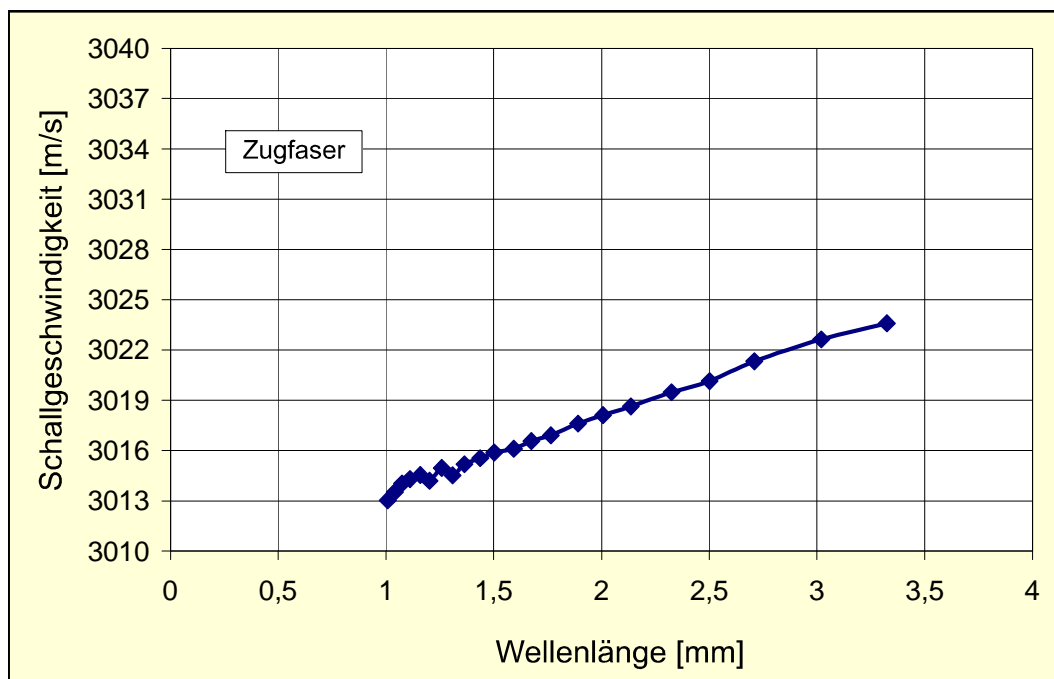


Bild 8.6: Integrale Meßkurve von Rohrbogen G.

Da die Wanddicke des Rohrbogens nur 15 mm betrug, wurde die maximale Wellenlänge der Ultraschall-Messungen auf 4 mm begrenzt, um sicher zu gehen, daß im gesamten Frequenzbereich eine reine Rayleighwelle vorliegt.

Die Meßkurve (Bild 8.6) ist eine Auftragung der integralen Schallgeschwindigkeit über der Wellenlänge. Aus dieser Kurve ist der tatsächliche Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe  $c(x)$  zu berechnen. Beide Kurven,  $c_{\text{int}}(\lambda)$  und  $c(x)$  sind ähnlich. Aufgrund der Form der Meßkurve werde angenommen, daß  $c_{\text{int}}(\lambda)$  und  $c(x)$  durch eine Exponentialfunktion darstellbar seien, und zwar  $c(x)$  gemäß Gleichung 8.4 und folglich  $c_{\text{int}}(\lambda)$  gemäß Gleichung 8.5.

Mit Hilfe eines Iterationsprogramms wird eine Funktion nach Gleichung 8.5 an die Meßkurve angepaßt. Die Iteration liefert die Parameter  $c_{\text{min}}$ ,  $c_0$  und  $\varphi$ , die, in Gleichung 8.4 eingesetzt, den Verlauf  $c(x)$  ergeben.

In Bild 8.7 ist der Verlauf der integralen Meßkurve und der daraus berechnete Verlauf der Schallgeschwindigkeit  $c(x)$  dargestellt.

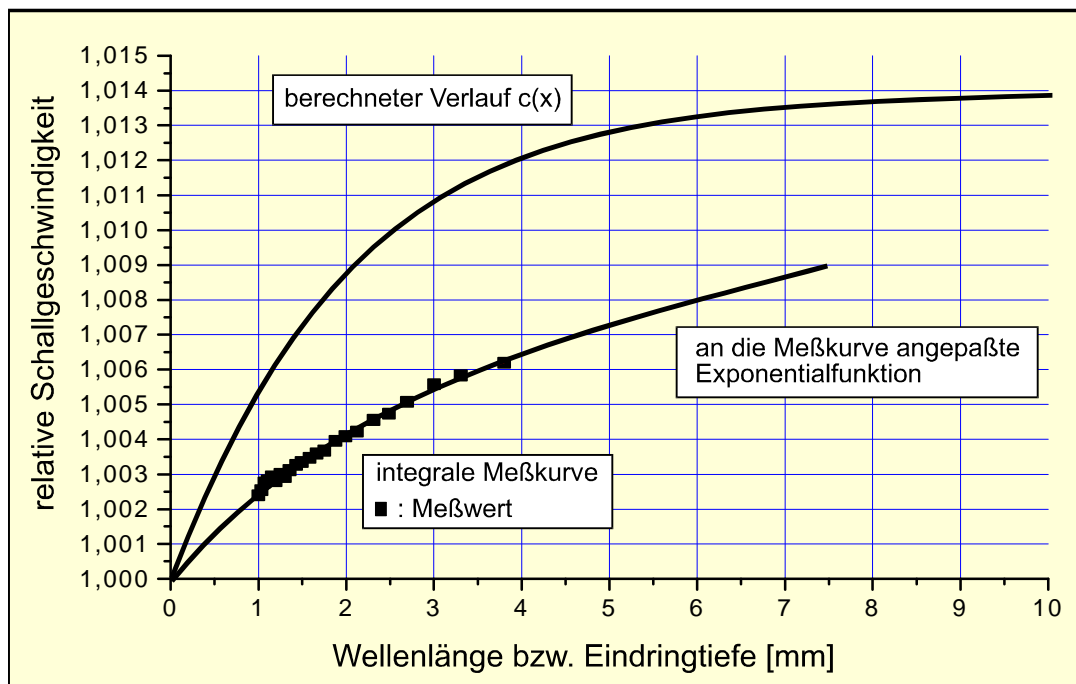


Bild 8.7: Integrale Meßkurve von Rohrbogen G und daraus berechneter tatsächlicher Verlauf der Schallgeschwindigkeit  $c(x)$ .

Beide Kurven schneiden sich an der Oberfläche bei  $x = 0$ , da dort die Eindringtiefe gegen Null geht und deshalb die gemessene integrale Schallgeschwindigkeit mit dem tatsächlichen Wert der Schallgeschwindigkeit zusammenfällt. Der Gradient der berechneten Kurve  $c(x)$  ist erwartungsgemäß steiler als der Gradient der Meßkurve.

Die Kurven in Bild 8.7 sind normiert auf den Wert an der Oberfläche dargestellt, um den anschließenden Vergleich mit der aus metallographischen Daten berechneten relativen Änderung der Schallgeschwindigkeit zu ermöglichen.

### 8.3.2 Korrelation mit metallographischen Untersuchungen

Zur Absicherung ist die durchgeführte Berechnung mit metallographischen Untersuchungen zu korrelieren. Dazu wurde aus dem Bereich der Meßstelle eine Materialprobe zur Anfertigung von Schliffen aus verschiedenen Tiefen entnommen. Die Probennahme ist aus Bild 8.8 ersichtlich.

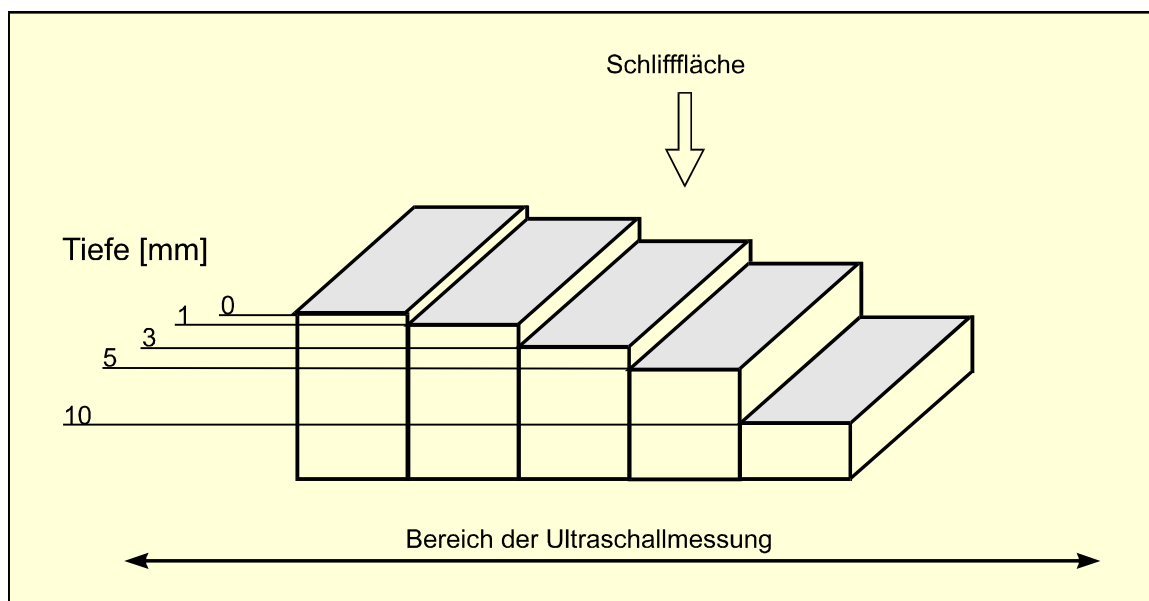


Bild 8.8: Schliffentnahme an Rohrbogen G.

Von der Materialprobe wurden 5 Schliffe aus den Tiefen 0, 1, 3, 5 und 10 mm angefertigt. An den Schliffen wurde mit Hilfe der Bildanalyse die Porendichte bestimmt. Die relevanten Daten der bildanalytischen Untersuchung sind in Tabelle 8.1 zusammengefaßt.

Tiefe [mm]	0	1	3	5	10
Porendichte [ $1/\text{mm}^2$ ]	2070	863	1229	1938	321
mittl. Porendurchmesser [ $\mu\text{m}$ ]	1.62	1.46	1.30	0.72	0.89
Porenflächenanteil [%]	0.52	0.19	0.22	0.11	0.03

Tab. 8.1: Statistische Daten der Bildanalyse an den 5 Schliffen des Rohrbogens G.

Die entscheidende Größe aus Tabelle 8.1 ist der Porenflächenanteil. Nach einem Prinzip der quantitativen Metallographie entspricht - bei statistischer Verteilung der Poren - der Porenflächenanteil dem Porenvolumenanteil [70]. Letztere Annahme soll, wenn auch vereinfachend, da insbesondere bei stärkerer Schädigung eine Porenorientierung vorliegt, hier getroffen werden. Damit kann der Porenflächenanteil annähernd auf die Volumenporosität übertragen werden (Bild 8.9).

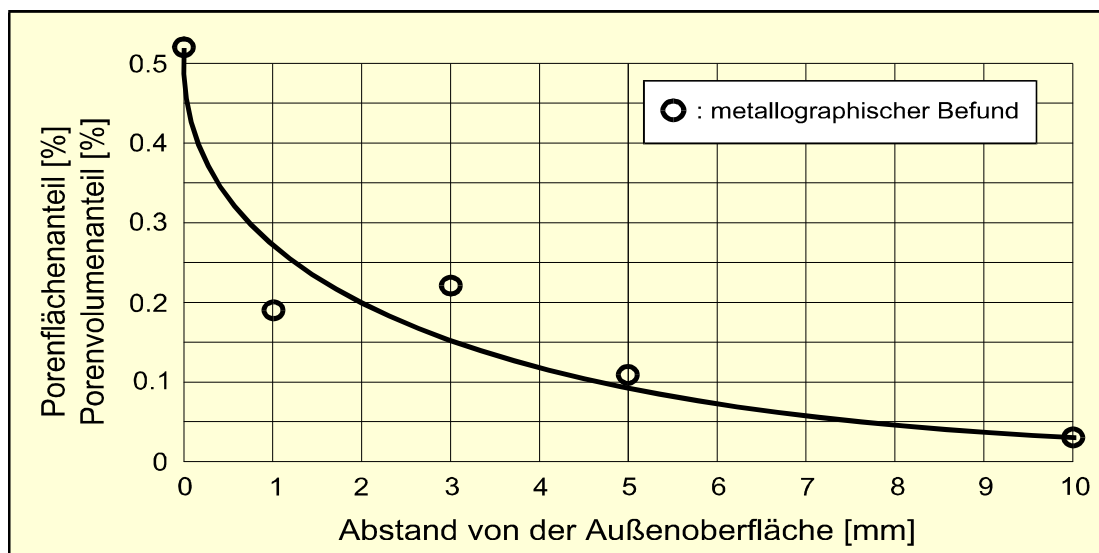


Bild 8.9: Verlauf der metallographisch bestimmten Porosität in die Tiefe.

Gleichung (8.6) stellt einen Zusammenhang zwischen der metallographisch bestimmten Porosität und der auf den porenfreien Werkstoff bezogenen relativen Schallgeschwindigkeit her. Die dem Kurvenverlauf in Bild 8.9 entsprechenden Werte der relativen Schallgeschwindigkeit sind in Tabelle 8.2 aufgeführt. Hierbei wurde angenommen, daß die Poren statistisch verteilte Rotationsellipsoide mit einem Achsenverhältnis  $z/x = 0,75$  seien. Aus Bild 8.5 geht hervor, daß der Einfluß des Achsenverhältnisses relativ gering ist. Bei Annahme eines Wertes  $z/x = 0,5$  oder  $z/x = 2$  und einer Porosität von 1% würde sich eine Abweichung in der berechneten Schallgeschwindigkeit von weniger als 0,25 % ergeben.

Tiefe [mm]	Porosität [%]	Relative Schallgeschwindigkeit nach Gl. (8.6)
0	0.52	1
1	0.27	1,005
3	0.15	1,008
5	0.09	1,011
10	0.03	1,013

*Tab. 8.2: Porosität und daraus berechnete relative Schallgeschwindigkeit.*

Bezieht man die relative Schallgeschwindigkeit wiederum auf den an der Oberfläche extrapolierten Wert, so ergeben sich die in Bild 8.10 durch Kreise markierten Werte für die Schallgeschwindigkeit in der jeweiligen Tiefe. Zum Vergleich ist die Meßkurve der Ultraschall-Laminographie und der daraus berechnete Verlauf der Schallgeschwindigkeit  $c(x)$  mit eingezeichnet.

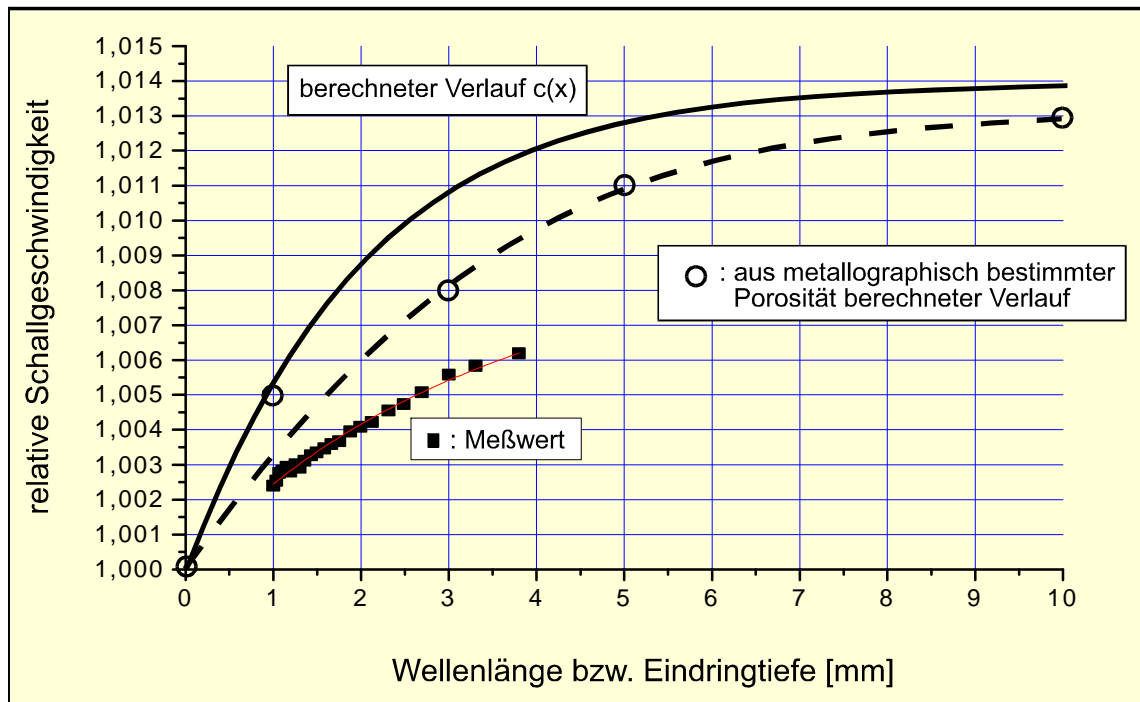


Bild 8.10: Verlauf der Schallgeschwindigkeit, berechnet nach Ergebnissen der Ultraschallmessung und der metallographischen Untersuchung.

Wie aus Bild 8.10 zu erkennen ist, besteht in dem vorliegenden Beispiel eine gute Korrelation zwischen dem aus metallographischen Daten und dem aus Ultraschallmessungen berechneten Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe. Dies kann als experimentelle Bestätigung des dargestellten Zusammenhangs zwischen Zeitstandporosität und Schallgeschwindigkeit sowie der vorgestellten Berechnungsmethode gewertet werden.

## 9. Diskussion

### 9.1 Ultraschall-Laminographie

Die Ultraschall-Laminographie zeichnet sich durch einige Vorteile hinsichtlich der praktischen Anwendung des Verfahrens aus. Die Abtastung der Wellen längs der Oberfläche ist wegen des relativ geringen meßtechnischen Aufwands wenig störanfällig und eignet sich deshalb insbesondere für die Anwendung an realen Bauteilen vor Ort. Aufgrund der großen Wellenlängen von einem bis zu mehreren Millimetern und deren Erfassung längs einer längeren Meßstrecke ist eine hohe Meßgenauigkeit erzielbar. Vergleichbare Meßgenauigkeiten mit konventionellen Impuls-Methoden werden nur im Labor an Proben erreicht.

Wesentliche Vorteile gegenüber der Bauteilmetallographie bestehen zum einen im relativ geringen Aufwand zur Vorbereitung der Prüfoberfläche. Zum anderen ist mit der Ultraschall-Laminographie im Zuge eines Meßvorgangs ein größerer Werkstoffbereich erfassbar und das nicht nur unmittelbar an der Oberfläche, sondern auch in die Tiefe. Ungünstige Umgebungseinflüsse vor Ort, wie Staub, Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen wirken sich auf die Ultraschall-Laminographie weniger störend aus, als auf die Bauteilmetallographie. Für die Zukunft ist mit diesem Verfahren zudem von einem deutlich geringeren Prüfaufwand und einer verkürzten Prüfzeit im Vergleich zur Bauteilmetallographie auszugehen.

Der wesentliche Unterschied der Ultraschall-Laminographie, wie auch anderer physikalischer Meßmethoden, gegenüber der Metallographie besteht darin, daß metallographische Methoden eine Abbildung des Werkstoffgefüges liefern, die, korrekte Präparation vorausgesetzt, eine direkte optische Bewertung des Gefügezustands erlauben. Bei den physikalischen Methoden erhält man stets nur eine Meßgröße, anhand der auf bestimmte Gefügeeigenschaften zu schließen ist. Dieser Umstand scheint jedoch insbesondere bei den neuen ferritisch-martensitischen Werkstoffen etwas in den Hintergrund zu treten, da bei diesen eine metallographisch nachweisbare Schädigung erst in einem spä-



ten Stadium auftritt, wodurch eine Zuordnung zwischen Gefügestand und Lebensdauerverbrauch erschwert wird.

Ein Zusammenhang zwischen den physikalischen Eigenschaften und dem Grad der irreversiblen Zeitstandschädigung eines Werkstoffs ist unbestritten. Die zahlreichen Aktivitäten in der Entwicklung zerstörungsfreier Prüfverfahren zum Nachweis von Zeitstandschädigung bestätigen dies. Einige der durchgeführten Arbeiten haben im Labor positive Ergebnisse erbracht. Hierzu zählen auch die Methoden bei denen Veränderungen der akustischen Eigenschaften, also insbesondere der Schalldämpfung und Schallgeschwindigkeit an geschädigtem Material gemessen werden. Mit Ausnahme der Kriechdehnungsmessung mit Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen hat sich bisher jedoch keine dieser Arbeiten in die Praxis durchgesetzt. Dies liegt vor allem daran, daß die nötige hohe Meßgenauigkeit an realen Bauteilen vor Ort wesentlich schlechter zu realisieren ist als unter Laborbedingungen. Die Anwendung hochsensibler Labor-Meßtechnik, welche eine aufwendige Probenvorbereitung und störungsfreie Umgebungsbedingungen erfordert, ist im Kraftwerk nicht immer möglich. Die Ultraschall-Laminographie hat sich diesbezüglich als relativ robust und wenig stör anfällig erwiesen.

Ein weiterer Umstand der die Anwendung physikalischer Methoden generell und insbesondere vor Ort erschwert, ist die nicht immer ausreichende Selektivität der jeweiligen Prüfmethode hinsichtlich der Zeitstandschädigung. Dies trifft auch für die Ultraschall-Laminographie zu, da nicht nur irreversible Schädigung, sondern auch reversible Gefügeveränderungen zu einer Veränderung der Schallgeschwindigkeit führen. Um diese Zusammenhänge an Bauteilen zu erfassen und zu verstehen ist es jedoch nötig die Prüfung überhaupt vor Ort mit der nötigen Genauigkeit durchführen zu können. Die Ultraschall-Laminographie ist hierbei relativ weit fortgeschritten und es sind weitere Entwicklungsschritte hinsichtlich Erhöhung der Meßgenauigkeit und Verkürzung der Meßzeit zu erwarten.

## 9.2 Integrale Meßkurven der untersuchten Rohrbögen

### 9.2.1 Ungeschädigte Rohrbögen

#### Rohrbogen A und B

Messungen an neuen Rohrbögen wurden chronologisch nach den ersten Messungen an betriebsbeanspruchten Bauteilen durchgeführt. Es galt hierbei zu untersuchen, ob der an geschädigten Bauteilen nachgewiesene Gradient in der Schallgeschwindigkeit auch an neuen Rohrbögen auftrat. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind am Beispiel der Messungen an Rohrbogen A und B dargestellt.

Bei den Rohrbögen aus den Werkstoffen 10 CrMo 9 10 und X10 CrMoVNb 9 1 (P91) handelte es sich um dickwandige Bauteile, die für Frischdampfleitungen in Kraftwerken gefertigt wurden. Die Messungen wurden beim Hersteller nach der abschließenden Wärmebehandlung durchgeführt.

An beiden Rohrbögen ist sowohl an der Zugfaser, wie auch an der neutralen Faser und am Geradrohrteil nahezu keine Veränderung der Schallgeschwindigkeit nachzuweisen. Der Verlauf der Meßkurven unterscheidet sich somit deutlich von dem an den geschädigten Stellen der betriebsbeanspruchten Rohrbögen gemessenen Geschwindigkeitsprofil. Da an den neuen Bögen auch entlang der Zugfaser die Schallgeschwindigkeit in die Tiefe nahezu konstant bleibt, kann ausgeschlossen werden, daß der an den betriebsbeanspruchten Rohrbögen nachgewiesene Geschwindigkeitsverlauf geometriebedingt ist.

## 9.2.2 Geschädigte Rohrbögen

### Rohrbogen C

Mit dem Rohrbogen C wurde die Ultraschall-Laminographie erstmalig an einem Bogen vor Ort im Kraftwerk angewandt. Die Frequenzobergrenze zu der Zeit lag bei 1 MHz, was einer minimalen Eindringtiefe von 3 mm entspricht. Die Wegmessung erfolgte mit einem Wegaufnehmer basierend auf einem flexiblen Magnetband, welches auf die Bogenoberfläche geklebt wurde. Die nominelle Genauigkeit des Wegaufnehmers auf ebener Fläche betrug 0,1 mm. Aufgrund der anfangs relativ großen Meßlänge von 120 bis 150 mm wurde damit eine ausreichend hohe Wiederholgenauigkeit erzielt.

Es ist davon auszugehen, daß das Biegen des Magnetbands auf der Zugfaser zu einem absoluten Fehler verglichen mit einer Messung auf ebener Meßstelle führte. Dieser nicht exakt quantifizierbare Fehler in der Wegmessung ist frequenzunabhängig und hat daher nur einen Einfluß auf die absolute Höhe der Kurve, nicht jedoch auf deren tiefenabhängigen Verlauf. In diesem anfänglichen Stadium der Arbeiten wurde nur der Gradient der Schallgeschwindigkeit betrachtet, während der absoluten Höhe weniger Beachtung geschenkt wurde.

Der Verlauf der Kurven zwischen 3 und 9-10 mm Wellenlänge darf als gesichert betrachtet werden. Zum einen ist bei der oberen Frequenz von 1 MHz mit einer Wellenlänge von ca. 3 mm die Meßmethode noch relativ unempfindlich gegenüber Einflüssen der Oberflächenbeschaffenheit. Zum anderen handelte es sich bei dem Rohrbogen mit einer Wanddicke von über 52 mm um ein relativ dickwandiges Bauteil, bei dem mit Sicherheit bis in den Bereich von 7 – 8 mm Wellenlänge noch von einer reinen Oberflächenwelle ausgegangen werden kann.

Als Fazit aus den Messungen kann nur gezogen werden, daß die Zunahme der Schallgeschwindigkeit von der Oberfläche in die Tiefe an der Zugfaser deutlich stärker ist als an der neutralen Faser. Dieser Umstand wird damit erklärt, daß die an der Oberfläche nachgewiesene Schädigung in die Tiefe abnimmt.

Die Zuordnung zur metallographisch bestimmten Schädigung ist ebenfalls zuverlässig, da die Gefügeuntersuchungen durch den TÜV unmittelbar an der Stelle der Ultraschallmessungen durchgeführt wurden.

### Rohrbogen D

Rohrbogen D lag im ausgebauten Zustand vor. Es handelte sich um einen Bogen aus dem russischen ferritischen Stahl 12 Ch 1MF, welcher sich in den Braunkohlekraftwerken der früheren DDR hinsichtlich seiner Zeitstandeigenschaften bewährt hat. An dem Bogen wurde vom Labor des Kraftwerksbetreibers mit Hilfe der Bauteilmetallographie an der Oberfläche der Zugfaser eine maximale Schädigung der Klasse 3b/4 nachgewiesen. Von der Zugfaser ca. 70 mm in Richtung neutrale Faser versetzt lag noch die Gefügekategorie 2a/2b vor. An diesen beiden Stellen, sowie vergleichend an der neutralen Faser wurden Messungen vorgenommen. Die Wegmessung erfolgte auf die gleiche Weise wie im Fall von Rohrbogen C. Das dort bezüglich der absoluten Meßgenauigkeit Gesagte gilt auch hier. Die obere Frequenzgrenze wurde mit den selben Prüfköpfen von 1 MHz auf 1,5 MHz erhöht, was einer minimalen Eindringtiefe von 2 mm entspricht. Der Verlauf der Kurven im Bereich zwischen 2 und 5-6 mm Wellenlänge darf bei der Wanddicke des Rohrbogens von 25 mm als gesichert betrachtet werden.

Längs der Zugfaser liegt in diesem Bereich eine starke Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Eindringtiefe vor. Daraus ist zu schließen, daß die an der Oberfläche metallographisch nachgewiesene Schädigung in die Tiefe abklingt. An der neutralen Faser, an der die metallographische Untersuchung keine Schädigung ergab, bleibt die Schallgeschwindigkeit in die Tiefe konstant.

Die metallographische Bestimmung der Schädigung erfolgte nach einer Methode, mit relativ starker Ätzbehandlung, welche nicht mit der von der VGB empfohlenen Vorgehensweise in Einklang steht. Das starke Ätzen kann unter Umständen zu einer Überbewertung der Porengröße und Porenanzahl führen. Dies ist bei der Korrelation zwischen den Meßkurven und der Schädigung zu berücksichtigen.

### Rohrbögen E und F

Die Meßkurven der Rohrbögen E und F sind zwei repräsentative Beispiele aus einer Untersuchung mehrerer Rohrbögen einer Frischdampfleitung. Der Schadensbefund an

der Leitung war in verschiedener Hinsicht untypisch. Nach der relativ kurzen Dauer von 123.000 Stunden, die die Leitung in Betrieb war, ist am Werkstoff X20 CrMoV 12 1 im Normalfall keine ausgeprägte Schädigung zu erwarten. An dieser Leitung wurden jedoch neben un- bzw. schwach geschädigten Rohrbögen auch solche mit für die Betriebsdauer zu hohem Schädigungsgrad bis zur Gefügekategorie 3a gefunden. Die Verteilung der geschädigten und ungeschädigten Rohrbögen innerhalb der Leitung ließ keine Systematik erkennen. Untypisch war weiterhin, daß die geschädigten Rohrbögen nicht nur auf der Zugfaser, sondern auch in der Druckzone und der neutralen Faser Zeitstandsporen aufwiesen. Zum Teil waren auch die geraden Schenkel der Rohrbögen betroffen. Dieser Befund läßt vermuten, daß die Rohrbögen bereits im Ausgangszustand eine zu geringe Zeitstandfestigkeit hatten und daß die an der Oberfläche nachgewiesene Schädigung weiter in die Tiefe reicht. Um dies zu bestätigen, wurde an einer Stelle eines stark geschädigten Rohrbogens (Rohrbogen F) bis auf die minimal zulässige Wanddicke abgeschliffen und ein zusätzlicher Gefügeabdruck entnommen. Hierbei wurde in einer Tiefe von 4,3 mm noch die selbe Schädigung wie an der Oberfläche nachgewiesen, was ein deutlicher Hinweis darauf ist, daß die Schädigung weit in die Tiefe reicht bzw. über den Wandquerschnitt gleichmäßig stark ausgeprägt ist.

Die Voraussetzungen für Messungen mit der Ultraschall-Laminographie waren insofern ungünstig, als trotz hoher Schädigung kein oder nur ein geringer Schädigungsgradient vorlag, da die Schädigung bis in größere Tiefen unter die Oberfläche reichte. Dies führte dazu, daß zwischen geschädigten und ungeschädigten Rohrbögen kein signifikanter Unterschied im Verlauf des Geschwindigkeitsprofils zu erkennen war. In diesem Fall bleibt nur die Möglichkeit, auch den Absolutwert der Schallgeschwindigkeit mit zu berücksichtigen. Ein Vergleich zeigt, daß die Schallgeschwindigkeit der un- oder schwach geschädigten Rohrbögen auf einem um 0,4 bis 0,5% höherem Niveau liegt als die der geschädigten. Der Vergleich ist bedingt zulässig, da alle Rohrbögen die gleiche Betriebsbeanspruchung erfahren haben und geometriegleich sind. Es wurden jeweils nur Messungen entlang der Zugfaser bzw. entlang der neutralen Faser miteinander verglichen. Ein Unsicherheitsfaktor liegt jedoch darin, daß nicht mehr mit Sicherheit festgestellt werden konnte, ob die Wärmebehandlung aller Rohrbögen im Ausgangszustand gleich war.

### Rohrbogen G

Rohrbogen G wies mit der Gefügekategorie 3a ebenfalls deutliche Schädigung auf. Da die Wanddicke des Rohrbogens mit 15 mm relativ gering war, wurden die Messungen nur im oberen Frequenzbereich zwischen ca. 800 kHz und 3 MHz durchgeführt. Die Wellenlänge liegt hierbei zwischen ca. 1 und 3,8 mm. In diesem Frequenzbereich ist eine hohe Meßgenauigkeit erreichbar. Der Verlauf der Meßkurve zeigt eine stetige Zunahme der Schallgeschwindigkeit von der Oberfläche in die Tiefe. Aufgrund der geringen Streuung der Meßpunkte läßt sich an die Kurve mit hoher Sicherheit eine stetige Funktion anpassen, wodurch ein entscheidender Ungenauigkeitsfaktor in der Abschätzung des Schädigungsverlaufs minimiert wird. Zur Korrelation der Ultraschallergebnisse mit metallographischen Untersuchungen wurden an der Stelle der Ultraschallmessung Materialproben zur Anfertigung von Schliffen aus verschiedenen Tiefen entnommen. Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen sind in Kapitel 8.3.2 beschrieben und werden in Kapitel 9.4 diskutiert.

### Fazit

An zeitstandgeschädigten Rohrbögen konnte durch die Messungen ein tiefenabhängiger Gradient in der Schallgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Dieser wird darauf zurückgeführt, daß die an der Oberfläche metallographisch nachgewiesene Schädigung in die Tiefe abnimmt, was einen Gradienten in den akustischen Eigenschaften des Materials zur Folge hat. Ein entsprechender Gradient wurde an ungeschädigten Stellen betriebsbeanspruchter Rohrbögen und an neuen Rohrbögen nicht oder nur in abgeschwächter Form festgestellt.

An einer Reihe stärker geschädigter Rohrbögen wurde kein signifikanter Unterschied im Gradienten im Vergleich zu ungeschädigten Rohrbögen festgestellt. Die metallographische Untersuchung eines dieser Bögen erbrachte deutliche Hinweise darauf, daß die Schädigung weiter in die Tiefe reicht bzw. über die gesamte Wanddicke gleichmäßig stark ausgeprägt ist. An diesen Bögen lag das absolute Niveau der Meßkurven niedriger als an den ungeschädigten. Diese Ergebnisse machen deutlich, daß nicht nur die tie-

fenabhängige Änderung der Schallgeschwindigkeit, sondern ebenso deren absolute Höhe in die Bewertung mit einzubeziehen ist. Insbesondere vergleichenden Messungen an geschädigten Stellen im Bogenbereich und ungeschädigten Stellen am geraden Schenkel scheinen erfolgversprechend, da dies den Vergleich von Material gleicher Herkunft und gleicher Betriebsbeanspruchung ermöglicht.

Experimentell stellt die exakte Absolutwertbestimmung der Schallgeschwindigkeit höhere Anforderungen an die Meßvorrichtung. Als entscheidende Größe fließt hierbei die Wegmessung ein, die mit hoher Genauigkeit auf gekrümmter Oberfläche durchzuführen ist. Hierin, sowie in der Verkleinerung der Meßstrecke zum Zwecke einer höheren lokalen Auflösung, bestehen weitere Entwicklungspotentiale der Ultraschall-Laminographie.

Die durchgeführten Messungen lassen erkennen, daß auch rein thermisch bedingte, schädigungsunabhängige Gefügeveränderungen sich auf die Höhe der Schallgeschwindigkeit auswirken. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse, welche in Kapitel 7.3 zusammengefaßt sind, zeichnet sich ab, daß die Änderung der Schallgeschwindigkeit nicht willkürlich, sondern einer zeit- und temperaturabhängigen Gesetzmäßigkeit gehorchend erfolgt. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit einer auch schädigungsunabhängigen Überwachung der Gefügeeigenschaften durch Messung der Schallgeschwindigkeit an in Betrieb befindlichen Bauteilen.

### **9.3 Berechnung des tatsächlichen Verlaufs der Schallgeschwindigkeit**

Eine wichtige Aufgabe dieser Arbeit ist es, aus den Daten der Ultraschallmessungen eine Aussage darüber zu treffen, ob Zeitstandserschädigung vorliegt und wie weit diese in die Tiefe reicht. Dazu wurde in Kapitel 8 eine Berechnungsmethode vorgeschlagen, um aus den integralen Meßkurven der Ultraschall-Laminographie den tatsächlichen Verlauf der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe  $c(x)$  zu rekonstruieren. Bei dieser Methode wird angenommen, daß der Beitrag, den die Schallgeschwindigkeit einer differentiellen Tiefenschicht zum gemessenen integralen Mittelwert der Schallgeschwindigkeit liefert, proportional zur Vektorsummenkurve aus longitudinaler und transversaler Schwingungsamplitude in die Tiefe verläuft (vgl. Bild 8.1). Diese Annahme ist eine Vereinfachung, da

grundsätzlich auch eine unterschiedlich starke Gewichtung der beiden Schwingungsanteile möglich ist. Es ist daher nicht auszuschließen, daß es sich im Laufe der weiteren Arbeiten als notwendig erweisen wird, die Gewichtungsfunktion  $R(x,\lambda)$  in die eine oder andere Richtung mehr an den Verlauf der transversalen oder longitudinalen Komponente anzugleichen. Solche Anpassungen führen jedoch nur zu geringen, nicht zu grundsätzlichen Änderungen in der Berechnung von  $c(x)$ . Der am Beispiel von Rohrbogen G durchgeführte Vergleich der Berechnungsmethode mit Ergebnissen metallographischer Untersuchungen hat eine gute Übereinstimmung ergeben. Dies ist zumindest eine Bestätigung dafür, daß mit der vorgeschlagenen Methode eine qualitativ richtige Abschätzung möglich ist.

Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Annahme eines idealisierten Geschwindigkeitsverlaufs  $c(x)$ . In Kapitel 8 wurde angenommen, daß  $c(x)$  einer Exponentialfunktion gehorcht, die eine asymptotische Annäherung von einem unteren an einen oberen Grenzwert beschreibt. Die Funktion wurde aus folgenden Gründen gewählt:

Zum einen zeigen viele der integralen Meßkurven, die an geschädigten Rohrbögen gemessen wurden, einen Verlauf, der durch eine derartige Funktion ausreichend genau darstellbar ist. Es ist daher naheliegend, für den grundsätzlichen Verlauf  $c(x)$  eine entsprechende Funktion anzunehmen. Zum anderen ist die vorgeschlagene Funktion insofern für die Simulation einer oberflächennahen Schädigung plausibel, als der Minimalwert  $c_{\min}$  an der Oberfläche die geringere Schallgeschwindigkeit des geschädigten Materials repräsentiert, und der Maximalwert  $c_0$  die Schallgeschwindigkeit des ungeschädigten Materials in der Tiefe. Die Steigung der Funktion entspricht dem Schädigungsgradienten und kann allein durch die Wahl der „Funktionskonstanten“  $\varphi$  an die bestehende Meßkurve angepaßt werden.

$c_{\min}$  kann mit relativ hoher Sicherheit abgeschätzt werden, da beim derzeitigen Stand der Arbeiten die kleinste Wellenlänge ca. 1 mm beträgt, so daß in der Meßkurve  $c_{\text{int}}(\lambda)$  nur mehr der Bereich zwischen  $\lambda = 1$  mm und  $\lambda = 0$  mm extrapoliert werden muß. An der Oberfläche bei  $x = 0$  bzw.  $\lambda = 0$  schneiden sich beide Kurven, d.h. der dort aus der Meßkurve extrapolierte Wert entspricht gleichzeitig der tatsächlichen Schallgeschwindigkeit an der Oberfläche. Zur Anpassung einer Funktion an die Meßkurve müssen so-



mit nur mehr zwei Parameter variiert werden, nämlich  $c_0$  und  $\varphi$ . Die Extrapolation von  $c_0$  ist schwieriger, da die Messungen nicht mit beliebig großer Eindringtiefe durchgeführt werden können und da der Anteil der oberflächennahen Schallgeschwindigkeit im Meßwert stets mit enthalten ist. Allerdings wurde in Kapitel 4.3 bereits darauf hingewiesen, daß sich die durch Zeitstandschiädigung verursachte Änderung der Schallgeschwindigkeit nur innerhalb einer geringen Bandbreite bewegen kann. Mit diesem Wissen und mit zunehmender Menge an Meßdaten wird es möglich sein, eine durchaus realistische Abschätzung für den Wert  $c_0$  des ungeschädigten Materials vorzunehmen. Hierbei ist noch zu betonen, daß sich Fehler bei der Annahme von  $c_0$  nicht sehr stark auf den oberflächennahen Teil von  $c(x)$  auswirken, welcher von besonderem Interesse ist.

Mit der in Kapitel 8 exemplarisch benutzten Exponentialfunktion lassen sich jedoch nicht alle Meßkurven darstellen. Die Vorgehensweise der Berechnung ist grundsätzlich auch auf andere Funktionen  $c(x)$  anwendbar. Bei deren Wahl sind folgende Punkte zu beachten:

Die beiden Kurven  $c(x)$  und  $c_{\text{int}}(\lambda)$  sind ähnlich und unterscheiden sich nur in ihrer Steigung. Daraus folgt, daß sich die Wahl von  $c(x)$  vor allem nach dem Verlauf der Meßkurve  $c_{\text{int}}(\lambda)$  zu richten hat. Es ist plausibel, eine stetige Funktion anzunehmen, da die Entstehung von Zeitstandschiädigung vor allem temperatur- und spannungsabhängig erfolgt und sich diese beiden Größen über den Wandquerschnitt nicht sprungartig ändern. Weiterhin ist es sinnvoll, eine Funktion zu wählen, die sich innerhalb zweier Grenzwerte bewegt. Dadurch wird vermieden, daß  $c(x)$  mit zunehmender Eindringtiefe unrealistisch hohe oder niedrige Werte annimmt. Aus diesem Grund hat es sich auch als nicht günstig erwiesen, die Meßkurve durch ein Polynom  $n$ -ten Grades darzustellen, da die Funktionen mit zunehmendem  $n$  zu viele Wendepunkte aufweisen und in die Tiefe zu steil verlaufen. Ein derartiges Verhalten ist aber in der Realität nicht zu erwarten.

Bei der Abschätzung des Schädigungsverlaufs aus der Meßkurve der Ultraschall-Laminographie wurde in den folgenden Schritten vorgegangen:

- Ermittlung der Meßkurve durch Ultraschallmessungen
- Anpassung einer geeigneten stetigen Funktion  $c_{\text{int}}(\lambda)$  an die Meßkurve

- Berechnung des tatsächlichen Verlaufs  $c(x)$  der Schallgeschwindigkeit in die Tiefe
- Korrelation zwischen Schallgeschwindigkeit und Porosität nach Gleichung 8.6

Jeder dieser Schritte ist naturgemäß mit einem Fehler behaftet, und es sind zum Teil vereinfachende Annahmen zu treffen.

Um zu untersuchen, inwieweit die durchgeführte Abschätzung mit der Schädigungsverteilung im Werkstoff übereinstimmt, wurde am Rohrbogen G nach der Ultraschallmessung ein metallographischer Schädigungsnachweis über den Wandquerschnitt erbracht. Der Rohrbogen war dafür besonders geeignet, da er zum einen im Labor vorlag und für eine zerstörende Untersuchung zur Verfügung stand. Zum anderen war aufgrund der relativ hohen Schädigung an der Oberfläche (Gefügeklasse 3a) zu erwarten, daß ein deutlicher Schädigungsgradient vorhanden war. An einem Rohrbogen der Gefügeklasse 2a etwa ist es schwierig, in Bezug auf die Porendichte einen Schädigungsgradienten zu bestimmen, da die Abstufung zwischen „vereinzelt Poren“ und „ohne Poren“ sehr gering ist, zumal dann, wenn der Übergang nur allmählich verläuft.

Die an Rohrbogen G gemessene Kurve weist einen deutlichen Gradienten in der Schallgeschwindigkeit auf. Die Meßkurve läßt sich mit guter Übereinstimmung durch eine Exponentialfunktion nach Gleichung 8.4 (Kap. 8.1) darstellen (vgl. Bild 8.7). Aus dieser Funktion wird nach der vorgeschlagenen Berechnungsmethode der tatsächliche Verlauf der Schallgeschwindigkeit  $c(x)$  berechnet.  $c(x)$  gehorcht einer artgleichen Exponentialfunktion, die innerhalb des selben oberen und unteren Grenzwertes liegt und nur eine andere Steigung aufweist.

Bei dieser Berechnung ist folgendes zu beachten. Jeder Meßwert der Ultraschall-Laminographie enthält Informationen über den Materialbereich von der Oberfläche bis in eine, von der Wellenlänge abhängige, maximale Eindringtiefe. Die Informationsdichte einer Meßkurve der Ultraschall-Laminographie ist daher im oberflächennahen Bereich am größten und nimmt mit zunehmender Eindringtiefe ab. Die Berechnung des tatsächlichen Schallgeschwindigkeitsverlaufs ist abhängig von der Streuung der Meßpunkte bzw. der Meßgenauigkeit und von der Art der für  $c(x)$  angenommenen Funktion. Ist die Streuung gering, wie im Fall der Meßkurve von Rohrbogen G, so ist in dem Bereich der

Abszisse, in dem die Meßwerte liegen, die Berechnung relativ genau und wenig abhängig von der Art der Funktion  $c(x)$ .

Mit der Berechnung von  $c(x)$  ist auch eine Extrapolation in größere Tiefe verbunden. Diese Extrapolation hingegen ist stark von der angenommenen Funktion  $c(x)$  abhängig und wird mit zunehmender Tiefe umso schlechter, je mehr der tatsächliche Verlauf der Schallgeschwindigkeit von der angenommenen Funktion abweicht. Dieser Sachverhalt ist in Bild 9.1 veranschaulicht.

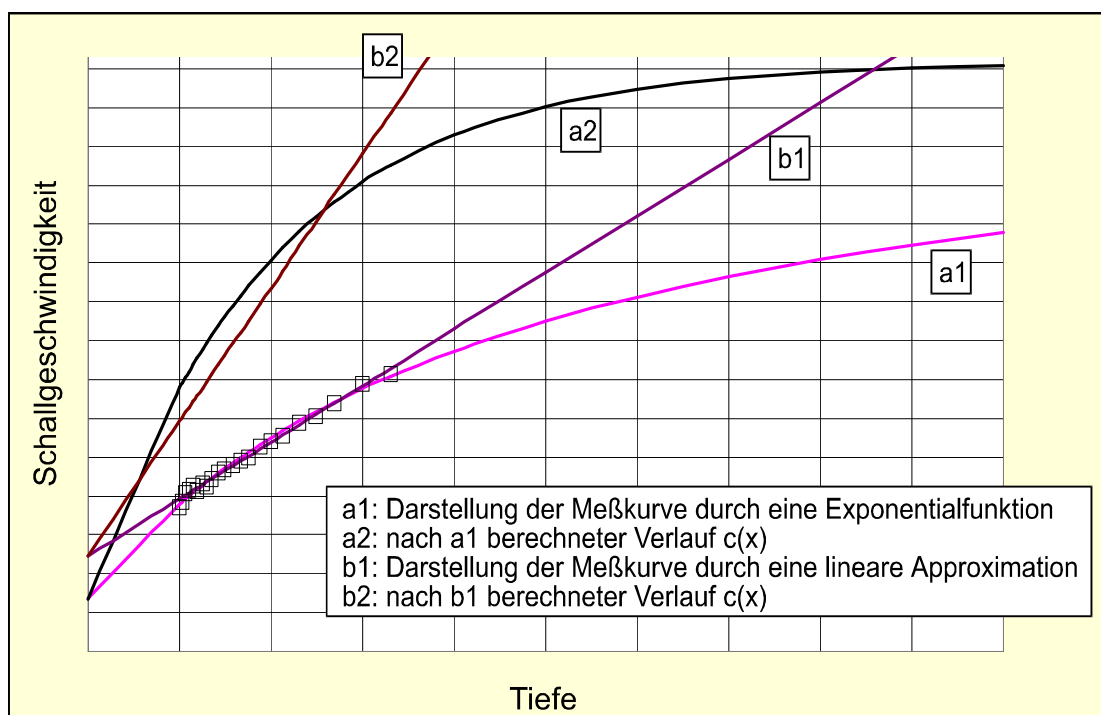


Bild 9.1: Berechnung des tatsächlichen Geschwindigkeitsverlaufs für zwei unterschiedliche Funktionen  $c(x)$ .

Bild 9.1 zeigt eine Gegenüberstellung der berechneten Geschwindigkeitsverläufe  $c(x)$  für zwei unterschiedliche Funktionen. Zum einen eine Exponentialfunktion wie in Kapitel 8.3 und zur Gegenüberstellung eine lineare Approximation.

Die Meßkurve kann durch beide Funktionen (a1 und b1) ausreichend genau angenähert werden. Eine grundsätzliche Entscheidung darüber, welche der beiden Funktionen besser geeignet ist, kann aufgrund der Meßkurve nicht getroffen werden. Aus Plausibilitäts-

gründen ist jedoch die Exponentialfunktion vorzuziehen, da sie ein asymptotisches Verhalten aufweist, was den realen Verhältnissen mehr entspricht, als eine beständig zunehmende Schallgeschwindigkeit. Welchen Einfluß die Wahl der Funktion hat, geht aus Bild 9.1 deutlich hervor.

Kurve a2 zeigt den berechneten Verlauf  $c(x)$  für die Exponentialfunktion und Kurve b2 für die lineare Approximation. In dem Bereich der Kurve, in dem die Meßpunkte liegen (Abszissenwerte ca. 1 bis 3,5 mm) unterscheiden sich die beiden berechneten Verläufe  $c(x)$  nur unwesentlich. In diesem Bereich ist die Berechnung also wenig abhängig von der Wahl der Funktion, solange diese sich gut an die Meßwerte anpassen läßt. Die Berechnung ist hier im wesentlichen von der Meßgenauigkeit und der Streuung der Meßwerte abhängig.

Mit weiter fortschreitender Tiefe weichen die beiden Kurven a2 und b2 jedoch sehr stark voneinander ab. Die Kurve b2 erreicht sehr schnell unrealistisch hohe Werte, während sich die Kurve a2 asymptotisch dem Wert  $c_0$  nähert. Die Extrapolation in größere Tiefe ist daher wesentlich davon abhängig, wie genau der tatsächliche Verlauf der Schallgeschwindigkeit mit dem angenommenen Funktionstyp übereinstimmt.

Durch mathematische Korrektur kann aus den Meßkurven die Schallgeschwindigkeit unterschiedlicher Tiefenschichten eines Bauteils berechnet werden. Aus dem Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Porosität wird den Meßkurven ein Schädigungsprofil zugeordnet. Die Methode der Berechnung des Schallgeschwindigkeitsverlaufs und die Zuordnung zwischen der Höhe der Schallgeschwindigkeit und dem Grad der Schädigung ist im Laufe der Arbeiten weiter zu verfeinern. Dies kann nur durch Ultraschallmessungen an Bauteilen und anschließende metallographische Untersuchung über den Wandquerschnitt erfolgen.

## 9.4 Abschätzung des Schädigungsverlaufs und Korrelation mit metallographischen Untersuchungen

Der Zusammenhang zwischen der Änderung der Schallgeschwindigkeit und Zeitstandschädigung wurde über die Porosität hergestellt. Da irreversible Zeitstandschädigung in der Bildung von Poren und Rissen resultiert, kann die Porosität als ein Maß für den Grad der Schädigung betrachtet werden. Dies wird auch durch Untersuchungen bestätigt, die zeigen, daß Zeitstandschädigung zu einer Abnahme der Dichte führt.

In der Literatur sind Theorien über die Abnahme der Schallgeschwindigkeit infolge von Porosität in einem Werkstoff verfügbar. In dieser Arbeit wurde zur Berechnung der Porositätsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit eine Gleichung [62] verwendet, die die Porenform und -orientierung als Parameter berücksichtigt.

Bei der in Kapitel 8.3 durchgeführten Berechnung wurden die Poren als statistisch verteilte Rotationsellipsoide mit einem Achsenverhältnis  $z/x = 0,75$  angenommen. Die Porenform steht damit in guter Übereinstimmung mit Erfahrungen der Metallographie, wo häufig über abgeplattete, linsenförmige Poren berichtet wird. Obwohl bekannt ist, daß insbesondere bei fortgeschrittener Schädigung die Poren und Porenketten sich senkrecht zur Hauptnormalspannung ausrichten, ist die Annahme einer statistischen Porenverteilung vertretbar. Zum einen, weil die Teilchenauslenkung einer Rayleighwelle ohnehin in zwei Richtungen polarisiert ist, nämlich parallel zur Ausbreitungsrichtung und senkrecht dazu in die Tiefe. Zum anderen ist die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Porenorientierung in der betrachteten Gleichung nicht so stark, daß eine begrenzte Abweichung von der statistischen Verteilung zu einem wesentlichen Fehler führen würde.

Die Auftragung der Schallgeschwindigkeit über der Porosität in Bild 8.5 zeigt, daß eine Porosität von 1% zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit in der Größenordnung um 2 – 3% führt. Eine Porosität von einem Prozent ist aber bereits einer fortgeschrittenen Zeitstandschädigung zuzuordnen. Die Kenntnis dieser Größenordnungen ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Bewertung von Meßkurven und den daraus berechneten Geschwindigkeitsverläufen  $c(x)$ .

## 9.5 Ausblick

Die bisher durchgeführten Arbeiten zeigen, daß neben dem Nachweis eines tiefenabhängigen Gradienten der Schallgeschwindigkeit auch der Absolutwert der Schallgeschwindigkeit wichtige Informationen über den Gefügezustand eines Bauteils liefert. Eine erweiterte Betrachtungsweise der Meßkurven unter Einbeziehung des absoluten Niveaus erlaubt insbesondere auch die Erfassung des ungünstigen Falls einer über die Wand gleichmäßigen Schädigung. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß auch schädigungsunabhängige Gefügeeigenschaften, wie z.B. der Vergütungszustand, einen Einfluß auf die Höhe der Schallgeschwindigkeit haben. Gefügeveränderungen, die im Laufe des Betriebs einer Komponente im Werkstoff ablaufen, führen immer auch zu einer Änderung dessen physikalischer Eigenschaften. Die Messung der Schallgeschwindigkeit ist eine Methode, um solche Veränderungen nachzuweisen und zu verfolgen.

Dieser Sachverhalt erschwert einerseits den Nachweis von Zeitstandschädigung anhand von Absolutwertmessungen der Schallgeschwindigkeit. Auf der anderen Seite jedoch ergibt sich daraus die Möglichkeit, Gefügeänderungen nachzuweisen, die vor oder parallel zur Bildung von Zeitstandporen auftreten. Dies kann sich insbesondere im Hinblick auf die neuen 9%-Cr-Stähle als vorteilhaft erweisen, da diese erst in einem sehr späten Stadium eine metallographisch nachweisbare Schädigung zeigen.

Es ist davon auszugehen, daß die Änderung der Werkstoffeigenschaften im allgemeinen und der Schallgeschwindigkeit im speziellen einer vor allem zeit- und temperaturabhängigen Gesetzmäßigkeit gehorcht, die in einem Zusammenhang zu reversiblen und irreversiblen Gefügeänderungen steht. Zur Bewertung der Ultraschallmessungen von betriebsbeanspruchten Bauteilen muß die Voraussetzung erfüllt sein, daß das Gefüge in einem definierten Ausgangszustand vorlag. Dies ist bei sehr alten Bauteilen ohne Gefügedokumentation und ohne Informationen über den Herstellungsprozeß problematisch. Bei neueren Komponenten, die im Induktivbiegeverfahren hergestellt und in modernen Öfen einer normgemäßen Wärmebehandlung unterzogen wurden, kann hingegen mit einer für den Ausgangszustand charakteristischen Schallgeschwindigkeit gerechnet werden. Für Bauteile, die zukünftig in Betrieb gehen, bietet sich zudem an, an den relevanten Werkstoffen durch Messungen mit der Ultraschall-Laminographie eine Be-

standsaufnahme im Neuzustand durchzuführen und in definierten Zeitabständen betriebsbegleitend Wiederholungsmessungen zu machen.

Die Ultraschall-Laminographie ist ein noch neues Verfahren im Anfangsstadium der Entwicklung. Wichtige Ansätze zur Weiterentwicklung des Verfahrens bestehen vor allem in der weiteren Erhöhung der absoluten Meßgenauigkeit, der Verkleinerung der minimal erfaßbaren Meßstrecke und der Automatisierung des Meßvorgangs.

Eine hohe absolute Meßgenauigkeit ist besonders wichtig, um reversible Gefügeveränderungen nachweisen zu können und auch vergleichende Bewertungen anhand von Messungen an unterschiedlichen Bauteilen mit ähnlicher Betriebsbeanspruchung zu ermöglichen. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang der Aufbau einer Datenbasis mit Meßergebnissen von den wichtigsten Werkstoffen nach unterschiedlichen Betriebsbeanspruchungen. Mit der Erhöhung der Meßgenauigkeit geht die Verringerung der minimalen Meßstrecke einher. Dadurch kann das lokale Auflösungsvermögen des Verfahrens erhöht werden, um Stellen maximaler Schädigung sicherer aufzufinden.

Die Automatisierung des Meßvorgangs kann zu einer Reduzierung subjektiver Fehlerinflüsse durch den Prüfer führen. Vor allem aber hat sie zum Ziel, die Prüfzeit zu verkürzen um auch größere Bereiche eines Rohrbogens zu erfassen. Neben der Mechanik und Elektronik zur Realisierung und Steuerung des Prüfvorgangs wird hierbei auch die Entwicklung von Software zur Auswertung und Darstellung der Meßergebnisse zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Über diese absehbaren Entwicklungstendenzen hinaus bestehen auch Gedankenansätze zu modifizierten Anwendungen des Verfahrens. Hierbei ist als wichtigster die Messung in Umfangsrichtung zu nennen. Die Messung in Rohrumfangsrichtung kann unter Umständen nicht nur zum Schädigungsnachweis, sondern auch zur Messung von Aufweitungen und Rohrunrundheiten eingesetzt werden.

## 10. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein neues Verfahren zum Nachweis von Zeitstandschädigung entwickelt, das insbesondere für die Anwendung an realen Bauteilen vor Ort geeignet ist. Der Nachweis der Schädigung erfolgt durch tiefenabhängige Messung der Schallgeschwindigkeit von Rayleigh-Oberflächenwellen im Ultraschallbereich. Die Eindringtiefe dieser Wellen kann durch Variation der Frequenz eingestellt werden. Damit ist es möglich den Werkstoff im Randbereich von der Oberfläche in die Tiefe abzutasten. Aufgrund dieser Besonderheit wurde für das entwickelte Meßverfahren die Bezeichnung „Ultraschall-Laminographie“ gewählt.

Die Messung der Schallgeschwindigkeit erfolgt nicht, wie konventionell üblich, mit Schallimpulsen, sondern mit einer kontinuierlichen Oberflächenwelle. Es wird eine Anordnung aus zwei Prüfköpfen, einem Sender und einem Empfänger, benutzt, von denen einer ortsfest auf dem Bauteil befestigt ist und der andere verschiebbar. Während der eine Prüfkopf relativ zum anderen verschoben wird, ändert sich periodisch die Phasenlage der Sender- und Empfängerschwingung zueinander. Eine Periode entspricht einem Fahrweg von einer Wellenlänge. Durch Registrierung der Phasenverschiebung der beiden Prüfköpfe zueinander und des Fahrweges kann die mittlere Wellenlänge und daraus die Schallgeschwindigkeit längs der Meßstrecke bestimmt werden. Durch Verfahren über einen ausreichend langen Weg ist auch an realen Bauteilen eine hohe Meßgenauigkeit von  $\pm 0,1\%$  und zum Teil besser erreichbar.

Das Prinzip der Ultraschall-Laminographie basiert auf zwei wesentlichen Grundlagen. Zum einen auf der Erfahrungstatsache, daß Zeitstandschädigung bevorzugt im oberflächennahen Bereich auftritt, und zum anderen darauf, daß Zeitstandschädigung zu einer Abnahme der Schallgeschwindigkeit führt. Daraus läßt sich ableiten, daß an oberflächennah geschädigtem Material ein Gradient zunehmender Schallgeschwindigkeit in die Tiefe vorliegen muß. Mit der Ultraschall-Laminographie ist es mehrfach gelungen, einen entsprechenden Gradienten an geschädigten Bauteilen nachzuweisen. Die Messungen wurden nicht nur im Labor, sondern auch an Bauteilen vor Ort während Revisionen durchgeführt. An neuen Geradrohren und Rohrbögen wurde hingegen keine oder nur



eine geringe Änderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Eindringtiefe gemessen.

Zur Abschätzung des Schädigungsgradienten wurde ein Berechnungsmodell vorgeschlagen, das die Eindringcharakteristik der Oberflächenwelle berücksichtigt. Eine Korrelation zwischen der Schallgeschwindigkeit und der Schädigung wurde über den Parameter Porosität hergestellt, wobei auf einen mathematischen Zusammenhang aus der Literatur zurückgegriffen wurde.

An einem geschädigten Bauteil im Labor wurde nach den Ultraschallmessungen eine metallographische Untersuchung über den Querschnitt durchgeführt. Diese ergab eine gute Übereinstimmung zwischen dem metallographisch bestimmten und dem aus den Ultraschallmessungen abgeschätzten Schädigungsverlauf in die Tiefe.

## 11. Literatur

- 1 Bürgel, R.: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik. Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 1998
- 2 DIN 54150: Abdruckverfahren für die Oberflächenprüfung (Replica-Technik).
- 3 Technische Regeln für Dampfkessel (TRD), TRD 508: Zusätzliche Prüfungen an Bauteilen, berechnet mit zeitabhängigen Festigkeitskennwerten.
- 4 Melzer, B. ; Seliger, P. ; Illmann, W.: Verbesserte Lebensdauerabschätzung kriechbeanspruchter Rohrbögen mittels bauteilspezifischer Kennwerte. In: VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 4, S. 394
- 5 VGB-Richtlinie R 509 L: Wiederkehrende Prüfungen an Rohrleitungen in fossil befeuerten Wärmekraftwerken. VGB, Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen
- 6 Estorff, Ulrik v.: Bestimmung der Kriechschädigung in rostfreien Stählen durch Ultraschallmessungen. Diss. RWTH Aachen, 1992
- 7 Hirao, M. ; Morishita, T. ; Fukuoka, H.: Ultrasonic velocity change with creep damage in copper. Metallurgical Transactions A, Vol 21A, Juni 1990, S. 1725-1732
- 8 Lakestani, F. ; Rimoldi, P.: Variation of ultrasonic propagation velocity due to creep strain in austenitic steel. In: Nondestructive Characterization of Materials, 3.-6.10.1988, Saarbrücken
- 9 Schmitt-Thomas, Kh. G.: Metallkunde für das Maschinenwesen. Band 1, Springer Verlag, 1988
- 10 Schmitt-Thomas, Kh. G.: Metallkunde für das Maschinenwesen. Band 2, Springer Verlag, 1988
- 11 Tolksdorf, E.: Hochleistungswerkstoffe im Kraftwerksbau. Vorlesung „Beanspruchungsgerechte Werkstoffwahl und -behandlung“, TU München, 1999
- 12 Poirier, J.-P.: Creep of crystals. Cambridge University Press, 1985
- 13 Illschner, B.: Hochtemperatur-Plastizität. Springer-Verlag, 1973
- 14 Schatt, W.: Werkstoffe des Maschinen-, Anlagen- und Apparatebaus. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1987

- 15 DIN 50118: Prüfung metallischer Werkstoffe; Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung. Januar 1982
- 16 Bendick, W. ; Weber, H.: Beurteilung von Bauteilen nach langer Zeitstandbeanspruchung, Teil 1. In: VGB Kraftwerkstechnik 66 (1986), Heft 1, S. 63-72
- 17 Jesper, H. ; Meyer, H. ; Remmert, H.: Zeitstandschäden an Rohrleitungen nach langer Betriebsdauer. In: VGB Kraftwerkstechnik 65 (1985), Heft 2, S. 178-186
- 18 Brühl, F. ; Kalwa, G. ; Weber, H.: Bruchverhalten von Bauteilen unter Zeitstandbeanspruchung. In: VGB Kraftwerkstechnik 65 (1985), Heft 11, S. 1059-1068
- 19 Livschitz, B., G.: Physikalische Eigenschaften der Metalle und Legierungen. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
- 20 Baerlecken, E. ; Fabritius, H.: Der Einfluß einer langzeitigen Glühung bei 500 bis 700 °C auf das Kriechverhalten des Stahles 13 CrMo 44 bei 550 °C. In: Arch. Eisenhüttenw. 37 (1966), Heft 7, S. 569-578
- 21 Baerlecken, E. ; Fabritius, H.: Untersuchungen an einem betriebsbeanspruchten Sammler aus dem Werkstoff 13 CrMo 44. Sonderdruck aus Mitteilungen der VGB, Heft 2, 50. Jahrgang (Apr. 1970), S. 122-132
- 22 Bendick, W. ; Weber, H.: Untersuchung von Zeitstandschädigung und Erschöpfung an einem Rohrbogen aus 14 MoV 63. In: VGB Kraftwerkstechnik 69 (1989), Heft 9, S. 936-944
- 23 Gramberg, U. ; Günther, T.: Untersuchungen an einem langzeitbeanspruchten 13 CrMo 44-Rohr. In: Arch. Eisenhüttenwesen 48 (1977), Nr. 2, S. 99-104
- 24 Bendick, W. ; Weber, H.: Beurteilung von Bauteilen nach langer Zeitstandbeanspruchung, Teil 2. In: VGB Kraftwerkstechnik 66 (1986), Heft 2, S. 170
- 25 Westhäußer: Zur Frage der Beurteilung des weiteren Zeitstandverhaltens betriebsbeanspruchter Kesselbauteile aufgrund von Werkstoffuntersuchungen. In: Mitteilungen d. TÜV Bayern, Heft 2/1973, S. 16-20
- 26 Bendick, W. ; Zylla, I. ; Müsch, H. ; Wachter, O.: Eigenschaften des Werkstoffs X20 CrMoV 12 1 nach Betriebsbeanspruchung und Zeitstandschädigung. In: VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 3, S. 261-268

- 27 Nowick, A. S. ; Berry, B. S.: Anelastic relaxation in crystalline solids. Academic Press, New York, London, 1972
- 28 Schmitt-Thomas, Kh. G. ; Wilhelm, M.: Zerstörungsfreie Erfassung von Kriechschädigungen durch Veränderung der Werkstoffdämpfung. VGB-Konferenz „Restlebensdauer 1992“, Vortrag 35, Mannheim, 06.-07.07.1992
- 29 Schmitt-Thomas, Kh. G. ; Tolksdorf, E. ; Wilhelm, M.: Zerstörungsfreie Erfassung von Kriechschädigungen durch veränderte Werkstoffdämpfung. DVM-Tagung „Werkstoffprüfung 1992“, Bad Nauheim, 03.-04.12.1992
- 30 Wilhelm, M.: Zerstörungsfreie Erfassung von Kriechschädigungen in warmfesten ferritischen Stählen. Diss. TU München, 1995
- 31 Wünsch, E.: Erfahrungen mit der Wärmewellen-Mikroskopie. In: Materialprüfung 33 (1991) 1-2, S.21
- 32 Henrichs, M. ; Hofstätter, P. ; Reichel, H.-H. ; Willems, H. ; Wünsch, E.: Zerstörungsfreie Prüfungen an kriechbeanspruchten Bauteilen - Gegenwärtiger Stand und Zukunftsaussichten. VGB-Konferenz „Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1991“, Vortrag 8, Essen, 09.-10.01.1991
- 33 Heinrich, H.: Warmfeste Stähle in Kraftwerken. In: Ingenieur-Werkstoffe 3 (1991), Nr. 12, S. 55-59
- 34 Bendick, W. ; Haarmann, K. ; Wellnitz, G. ; Zschau, M.: Eigenschaften der 9- bis 12-%-Chromstähle und ihr Verhalten unter Zeitstandbeanspruchung. In: VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 1, S. 77- 84
- 35 Husemann, R. U. ; Wachter, O. ; Zabelt, K.: Verarbeitung und Betriebseinsatz von neuen Werkstoffen im Kraftwerksbau. In: VGB Kraftwerkstechnik 75 (1995), Heft 3, S. 265-279
- 36 Reiners, U. ; Weber, J. ; Kempkes, B.: Lebensdauerüberwachung von Rohrleitungen und zeitstandbeanspruchten Komponenten. In: VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 8, S. 613-618
- 37 Blum, R. ; Hald, J. ; Bendick, W. ; Rosselet, A. ; Vaillant, J.C.: Neuentwicklungen hochwarmfester ferritisch-martensitischer Stähle aus den USA, Japan und Europa. In: VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994), Heft 8, S. 641-652
- 38 Meyer, E. ; Neumann, E.-G.: Physikalische und technische Akustik. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1975

- 39 Borucki, H.: Einführung in die Akustik. Bibliographisches Institut, Mannheim  
Wien, Zürich, 1980
- 40 Lord Rayleigh: On waves propagated along the plane surfaces of an elastic solid. In: Proc. London Math. Soc., 17 (1885), S. 4-11
- 41 Viktorov, I. A.: Rayleigh and Lamb waves. Plenum Press, New York, 1967
- 42 Pollard, H. F.: Sound waves in solids. Pion Limited, London, 1977
- 43 White, R. M.: Surface elastic waves. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 58, No.8, August 1970, S.1238-1276
- 44 Minton, W. C.: Inspection of metals with ultrasonic surface waves. In: Nondestructive Testing, 1954, Juli-August, S. 13-16
- 45 Jassby, K. ; Saltoun, D.: Use of ultrasonic Rayleigh waves for the measurement of applied biaxial surface stresses in aluminum 2024-T351 alloy. In: Materials Evaluation, 40, Febr. 1982, S. 198-205
- 46 Pohl, J.: Ultraschall mißt Nitrierhärte tiefe an Kurbelwellen. In: Materialprüfung 34 (1992) 4, S. 95-99
- 47 Curtis, G. J.: the use of surface elastic waves in examining surface mechanical properties. In: Szilard, J.: Ultrasonic Testing. John Wiley & Sons, 1982
- 48 Klanke, H.-P.: Wiederkehrende Prüfungen an Turbinenläufern. VGB Kraftwerkstechnik 71 (1991), S. 1009-1012
- 49 Hofstötter, P.: Laborerprobung und praktischer Einsatz kapazitiver Dehnungsmeßstreifen zur Messung von Kriechdehnungen im Betrieb bei 530 °C. In: VGB Kraftwerkstechnik 69 (1989), S. 613-617
- 50 Hofstötter, P.: Kapazitive Kriechdehnungsmessungen an Rohren und Rohrbögen in Kraftwerken. VGB-Konferenz „Kraftwerke 1990“, Essen, 18.-21.-09.1990
- 51 Joas, H. D.: Messung von Kriechdehnungen mittels Replica-Technik. VDI-GET-Tagung „Monitoring und Diagnose in energietechnischen Anlagen“, Braunschweig, 08./09.10.1997
- 52 Schröder, H. C.: Prinzipielle Überlegungen zur Bewertung und Überprüfung von älteren Kraftwerksanlagen. In: VGB KraftwerksTechnik 9/98, S. 38-47

- 53 Dobmann, G. ; Koblitz, Th.-D. ; Kröning, M. ; Willems, H.: Früherkennung von Kriechschäden - zum Stand fortschrittlicher zerstörungsfreier Prüfverfahren. VGB-Konferenz „Restlebensdauer 1992“, Mannheim, 06./07.07.1992
- 54 Bossert, J. ; Ondracek, G.: Betrachtungen zur Gefügesystematik. In: Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 26 (1995), S. 560-568
- 55 Ondracek, G.: Zum Zusammenhang zwischen Eigenschaften und Gefügestruktur zweiphasiger Werkstoffe, Teil II: Gefügestruktur und spezifischer elektrischer Widerstand. In: Z. Werkstofftechnik 8 (1977), S. 280-287
- 56 Tolksdorf, E.: Materials Requirements for Life Steam Temperatures up to 700 °C. The 9 th Israel Materials Engineering Conference IMEC-9. December 6-7, 1999, Technion – Israel Institute of Technology, Haifa, Israel
- 57 Krautwasser, P. ; Widera, M. ; Czyrska-Filemonowicz, A. ; Schuster, H. ; Eckerlebe, H.: Zerstörungsfreie Bestimmung der kriechdehnungsabhängigen Werkstoffschädigung durch Neutronen-Kleinwinkelstreuung. In: VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 6, S. 555-558
- 58 Sayers, C. M. ; Smith, R. L.: The propagation of ultrasound in porous media. In: Ultrasonics, Sept. 1982, S. 201-205
- 59 Stigh, U.; Sotkovszki, P.  
Ultrasonic measurement of creep damage in pipe
- 60 Norris, A. N.: Effects of pore shapes on low frequency wave speeds in porous media. In: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation, 5B. 1985
- 61 Birring, A. S. ; Hanley, J. J.: Effects of cavities on ultrasonic attenuation and velocity. In: Nondestructive characterization of materials, II. 1986
- 62 Leopold, E. ; Boccaccini, A. R.: Ultraschallgeschwindigkeit in keramischen Werkstoffen - Abhängigkeit von Porosität und Porenform. In: Materialprüfung 39 (1997) 4, S. 116-119
- 63 Alvarez-Arenas, T. G. ; de Sarabia, E. R.-F. ; Gallego-Juarez, J.A.: Ultrasonic evaluation of creep damage in steel. In: Ultrasonics 31 (1993), No. 3, S.155-159
- 64 Martinez-Ona, R. ; Navarro, A. ; Banes, J. ; Perez, Ma. C. ; Borregan, J. Ma.: Creep evaluation of metallic materials by ultrasonic and metallurgical parameters. In: Int. J. Pres. Ves. & Piping 41 (1990), 113-122

- 65 Eggeler, G. ; Brear, J.M. ; et. al.: Parameters for creep damage quantification and their correlation with results from ultrasonic velocity, attenuation and energy evaluations. Swansea-Conference, 1990
- 66 Höller, P. ; Arnold; W.: „Micro-non-destructive testing“ for structure and defects, especially in new materials. Ultrasonics International 89 Conf. Proc. S. 880
- 67 Stigh, U.: Influence of damage on ultrasonic velocity and strength -Analysis and experiments. In: Eng. Fract. Mechanics Vol.28 (1987), No.1, S. 1-12
- 68 Kolb, R. ; Pohl, R. ; Kühne, C. ; Beesdo, H.: Zeitstandverhalten von Rohrbögen aus dem russischen Werkstoff 12 Ch 1 MF. In: VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 6, S. 506-513
- 69 Kußmaul, K. ; Maile, K. ; Purper, H.: Verformungs- und Versagensverhalten von Rohrbogen unter Innendruck und konstantem Zusatzmoment im Kriechbereich. In: VGB Kraftwerkstechnik 76 (1996), Heft 8, S. 661-666
- 70 Exner, H. E. ; Hougardy, H. P.: Einführung in die Quantitative Gefügeanalyse. DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1986
- 71 Widera, M. Th.: Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung hochwarmfester Legierungen mit Hilfe der Neutronenkleinwinkelstreuung (SANS). Dissertation RWTH Aachen, 1992
- 72 John, R.: Planung von Rohrleitungsgewerken moderner Großkraftwerksanlagen unter Einbeziehung neuer hochwarmfester Werkstoffe. VGB Kraftwerkstechnik 74 (1994), Heft 10, S. 850-856
- 73 Ambs, E. ; Tolksdorf, E. ; Leich, K. E. ; Schlieben, R. ; Schwarzwaldler, H.: Werkstoff P91 (X10 CrMoVNb 9 1) – Einsatz im Heizkraftwerk Tiefstack der HEW in einer Frischdampfleitung aus Werkstoff X20 CrMoV 12 1.
- 74 Köster, W.: Elastizitätsmodul und Dämpfung von Eisen und Eisenlegierungen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 14 (1940), Heft 6, S. 271-278
- 75 Förster, F. ; Köster, W.: Elastizitätsmodul und Dämpfung in Abhängigkeit vom Werkstoffzustand. Zeitschrift für Metallkunde 29 (1937), Heft 4, S. 116-123
- 76 Vijayendra, M. K. ; Neumann, E.: Ultraschall-Polarisation in Werkstoffen mit Textur. Materialprüfung 35 (1993), 9, S. 260-264

- 77 Ondracek, G.: Zum Zusammenhang zwischen Eigenschaften und Gefügestruktur mehrphasiger Werkstoffe – Teil III: Gefügestruktur und Elastizitätsmodul. Z. Werkstofftechnik 9 (1978), S. 31-36
- 78 Bendick, W. ; Rasche, C. ; Haarmann, K. ; Zschau, M.: Eigenschaften und Möglichkeiten des Rohrstahts X 10 CrMoVNb 9 1 (T 91/ P91). 3R international 32 (1993), Heft 9, S. 494-499
- 79 Haarmann, K. ; Schwenk, W. ; Venkateswarlu, J. ; Zschau, M.: Hochtemperaturkorrosionsbeständigkeit des warmfesten Stahtes X 10 CrMoVNb 9 1 (P 91/ T 91) im Vergleich zu höher- und niedriglegierten warmfesten ferritischen Chromstähten in Wasserdampf. VGB Kraftwerkstechnik 73 (1993), Heft 9, S. 837-840
- 80 DeWitte, M. ; Coussement, C.: Creep properties of 12% Cr and improved 9% Cr weldments. Materials at High Temperatures, Vol 9, No 4, November 1991
- 81 Fabritius, H. ; Weber, H.: Restlebensdauer und Werkstoffeigenschaften von langfristig bei hohen Temperaturen betriebsbeanspruchten Bauteilen aus warmfesten ferritischen Stählen. VGB Kraftwerkstechnik 54 (1974), Heft 4, S. 250
- 82 Seliger, P. ; Melzer, B.: Neue Ergebnisse zum Kriech- und Zeitstandverhalten des warmfesten Rohrstahtes 15 CrMoV 5-10. In: VGB KraftwerksTechnik 1/98, S. 91
- 83 Schmitt-Thomas, Kh. G. ; Kellerer, E. ; Tolksdorf, E.: Zerstörungsfreies Prüfverfahren zum Nachweis von Zeitstandschädigung mit Hilfe von Ultraschall-Oberflächenwellen. VGB-Konferenz „Werkstoffe und Schweißtechnik im Kraftwerk 1996“, Vortrag 11, Cottbus, 08.-09.10.1996
- 84 Millner, R.: Ultraschalltechnik – Grundlagen und Anwendungen. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1987.
- 85 Kellerer, E.: VGB-Forschungsprojekt Nr. 171: „Zerstörungsfreier Schädigungsnachweis“, Abschlußbericht, 2000