

ISBN 3-88314-514-9

Forschungsbericht 120

Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM)
Berlin

Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung

von Dr.-Ing. Andreas Hecht

April 1986

173 Seiten, 128 Abbildungen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon (030) 8104-1 Telex 183 261 bamb d Telefax (030) 8 112 029

Copyright © 1986 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon (0471) 46093-95

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter in der Fachgruppe 6.2 „Zerstörungsfreie Prüfung“ der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) in Berlin.

Maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit haben die Mitarbeiter des Laboratoriums 6.24 „Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Werkstoffeigenschaften“ beigetragen, denen ich dafür sehr danke.

Mein besonderer Dank gilt:

Herrn Prof. Dr. E. Mundry, der diese Arbeit immer gefördert hat, für zahlreiche Ideen und kritische Hinweise,

Herrn Prof. Dr. D. Dengel für wertvolle Hinweise bei der Erörterung der Ergebnisse dieser Arbeit,

Herrn Dr. E. Neumann für die stete Förderung dieser Arbeit und für viele Diskussionen und Hinweise,

Herrn Dipl.-Ing. (FH) R. Thiel, der die meisten Rechnerprogramme erstellt hat, an der Vorbereitung und Durchführung aller Betriebsmessungen maßgeblich beteiligt war, und der vor allem bei der Entwicklung des jetzt im Einsatz befindlichen Meßsystems wertvolle Arbeit geleistet hat,

Herrn W. Gieschler für wertvolle Hilfen bei der Versuchsdurchführung und bei der Ergebnisauswertung und -darstellung,

Frau K. Glöckner für das Erstellen der Zeichnungen,

Frau K. Lasicki für das Anfertigen der Fotografien,

Frau H. Armbrust, Frau M. Haustein und Herrn B. Scherlitzky für die zügige und sorgfältige Ausführung der Schreivarbeiten.

Zusammenfassung

Austenitische Bänder werden nach dem Kaltwalzen im Durchlauf rekristallisationsgeglüht, wobei eine bestimmte mittlere Korngröße eingestellt wird. Um die Rekristallisationsglühung auf eine bestimmte Korngröße hin steuern zu können, ist eine kontinuierliche zerstörungsfreie Kontrolle der Korngröße im Kaltband nach der Glühung erforderlich.

Als zerstörungsfreies Verfahren eignet sich die Registrierung von Ultraschallwellen. Dazu wird mit einer Frequenz von 25 MHz so in das Blech eingeschallt, daß eine Oberflächenwelle angeregt wird. Diese wird vom Oberflächengefüge in das Volumengefüge des Bleches und von dort zurück zum Prüfkopf gestreut (Rayleigh-Streuung). Die Amplitude der Rückstreuung aus dem Volumengefüge wird registriert.

Zur Untersuchung von Einflußgrößen auf das Meßergebnis wurde im Labor eine Meßapparatur aufgebaut, die danach für den Einsatz an der Durchlaufglühanlage modifiziert wurde. Dieses Korngrößenmeßsystem wurde intensiv an der Durchlaufglühanlage erprobt. Es wurden ca. 120 km austenitisches Kaltband gemessen und umfangreiche metallographische Stichprobenkontrollen durchgeführt. Vielfach wurden die Glühbedingungen, d. h. Bandgeschwindigkeit oder Ofentemperatur, verändert. Die daraus resultierenden Korngrößenänderungen konnten sehr gut detektiert werden. Der Meßfehler wird mit ca. $\pm 0,5 \mu\text{m}$ abgeschätzt.

Abstract

Austenitic stainless-steel sheets have to be annealed after cold rolling where a definite grain-size is established. For an optimization of the annealing process a continuous recording of the grain-size is necessary.

A suitable non-destructive testing method for this task is the evaluation of backscattered ultrasonic waves. A 25 MHz ultrasonic impulse is transmitted from an ultrasonic transducer into the sheet in immersion technique under the critical angle, where a surface wave is generated. This damped surface wave is scattered by the sheet's surface grains both back to the transducer and forward into the sheet's volume where the waves are scattered back to the transducer again (Rayleigh-scattering). The amplitude of these scattered volume waves is then evaluated.

A computer controlled laboratory equipment has been developed to examine various phenomena. This equipment was then modified for working in a steel-rolling mill, where it has been tested intensively. About 120 km of austenitic steel-sheet have been examined non-destructively accompanied by destructive metallographical tests. Also annealing parameters, e. g. temperature and strip-speed, have been varied to get areas of different grain-size within a single coil. These grain-size changes could be detected very precise. The accuracy of the developed equipment was estimated at $\pm 0,5 \mu\text{m}$ grain-size.

0. Liste der verwendeten Symbole	1
1. Einleitung und Aufgabenstellung	1
2. Übersicht der zerstörungsfreien Verfahren zur Korngrößenbestimmung	4
2.1 Magnetische, induktive und radiographische Methoden	5
2.2 Ultraschallmethoden	6
2.2.1 Grundlagen	6
2.2.2 Schwächungsmessung	12
2.2.3 Streuungsmessung	14
3. Ultraschallausbreitung in schallstreuenden Werkstoffen unter besonderer Berücksichtigung von dünnen Blechen	22
3.1 Verwendete Meßapparaturen für die Grundlagenmessungen	23
3.2 Grundlagen der Ultraschallausbreitung in polykristallinen Werkstoffen	26
3.3 Rückstreuung von Transversalwellen in Grobblechen	32
3.3.1 Vorbetrachtungen	32
3.3.2 Streuungsmessungen an Grobblechen	33
3.4 Ausbreitung gestreuten Ultraschalls, vor allem bei Anregung in der Umgebung des kritischen Winkels	37
3.5 Ultraschallstreuung in dünnen Blechen	47
3.5.1 Struktur des Streusignals	47
3.5.2 Einfluß der Korngröße auf das Streusignal	54
3.5.3 Einfluß der Blechdicke auf das Streusignal	60
4. Meßmethode zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an Feinblechen	65
4.1 Prinzip der Korngrößenbestimmung durch Vergleichsmessung an austenitischen Feinblechen; Korrektur der Blechdicke	66
4.2 Diskussion von Einflußparametern und Fehlergrößen	72
4.3 Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Meßmethode für Messing- und Bronzebleche	75
5. Meßsystem zur kontinuierlichen zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an austenitischen Bändern in einer Durchlaufglühanlage	79
5.1 Randbedingungen und Zielsetzung	79
5.2 Mechanisch-akustischer Teil des Meßsystems	80
5.3 Elektronischer Teil des Meßsystems	82
5.4 Meßprogramm	87
5.4.1 Struktur des Meßprogrammsystems	87
5.4.2 Korngrößenbestimmung aus den vorhandenen Meßdaten	89
5.4.3 Automatische Winkeloptimierung	97
5.5 Einstellung und Arbeitsweise des Meßsystems	101
5.5.1 Kalibrierung und Einstellung des Meßsystems	101
5.5.2 Start der Messung	109
5.5.3 Entscheidungskriterien für die Durchführung einer Winkeloptimierung	110
5.5.4 Meßwert- und Ergebniswertausgabe	113
6. Ergebnisse der zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an der Durchlaufglühanlage	114
6.1 Gemessene Bänder	115
6.1.1 Bänder mit konstanter Korngröße	116
6.1.2 Veränderung von Glühbedingungen	117
6.1.3 Bänder mit periodischen Korngrößenschwankungen	121
6.2 Diskussion der metallographischen Nachuntersuchungen	125
7. Diskussion der Leistungsfähigkeit des Korngrößenmeßsystems	132
8. Zusammenfassung	135
9. Literatur	140

10.	Anhang	152
A 1	Beschreibung der verwendeten Geräte	152
A 1.1	Ultraschallgerät 5052 PR	152
A 1.2	Verwendete Prüfköpfe	154
A 1.3	Ultraschallanalysator 5052 UA	162
A 1.4	Multiplizier-Oszilloskop PM 3243	163
A 1.5	Transientenrekorder DL 922	164
A 1.6	Analoger Spektrumanalysator 8568 A	165
A 1.7	CAMAC-System	165
A 1.8	IEC-Bus	168
A 1.9	HP-1000 Rechner	169
A 1.10	Tauchtechnik-Meßplatz	170
A 1.11	Prüfkopfmanipulator	170
A 2	Aufbau einer elektrischen Schaltung zur Abstandsmessung (Laufzeitmessung)	170

0. Liste der verwendeten Symbole

A	Ultraschallamplitude
$A(t)$	Amplitudenverlauf als Funktion der Zeit
$A(x)$	Amplitudenverlauf als Funktion des Ortes
A_0	Amplitude am Ort $x=0$ / zum Zeitpunkt $t=0$
A_s	Amplitude des gestreuten Ultraschalls
\bar{A}_s	Amplitude des gestreuten Ultraschalls, arithmetisch oder laufend über den Ort l (Ortskoordinate der Bandlänge) gemittelt
$\bar{A}_s(x)$	Ortsgemittelter Streuamplitudenverlauf als Funktion des Schallweges x
$\bar{A}_s(t)$... als Funktion der Schalllaufzeit t
$\bar{A}_s(\Delta t)$	Ortsgemittelter und zeitlich mittlerer Amplitudenwert im Zeitabschnitt Δt (Auswertebereich)
B	Funktion der Poissonzahl ($B=0.89$ für Stahl)
C	Beliebige Konstante
C_1	Achsenabschnitt der Kalibriergeraden zur Korngrößenbestimmung
C_2	Steigung der Kalibriergeraden zur Korngrößen- bestimmung
D	Korngröße
\bar{D}	mittlere Korngröße
$ \Delta D $	aktuelle Korngrößenabweichung
D_{eff}	effektiver Schwingerdurchmesser eines Prüfkopfes
E	Elastizitätsmodul
$F(x)$	Funktion zur Beschreibung der Schallausbreitungsverluste
M	Normierungsfaktor zur Blechdickenkorrektur
N	Nahfeldlänge
R	Reflexionsfaktor
R_e	Streckgrenze
R_p	Dehngrenze
$R_{p0,2}$	0.2 Dehngrenze
R_0	Reibungsspannung der Versetzungen bei unendlicher Korngröße
R_t	Oberflächen-Rauhtiefe
V	Variationskoeffizient
W_I	Wellenwiderstand des Mediums I

a	Abstand zwischen Prüfkopf und Blech in der akustischen Achse
Δa	Abstandsänderung
a_1	Absorptionskonstante
a_4	Streukonstante
b	Ortskoordinate der Breite eines austenitischen Bandes
c_I	Schallgeschwindigkeit im Medium I
c_L	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle
c_T	Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle
c_R	Schallgeschwindigkeit der Rayleighschen Oberflächenwelle
c_{ij}	elastische Konstanten des Einkristalls
d	Blechdicke, Banddicke
f	Frequenz
f_R	Mittelfrequenz eines Prüfkopfes oder einer Filterfunktion
f_B	Bandbreite eines Prüfkopfes oder einer Filterfunktion
k	Koeffizient, der den gemessenen Amplitudenabfall der Ultraschallstreuung beschreibt
k_∞	... für ein unendlich dickes Blech
k_{H_2O}	... Anteil des durch Abstrahlung in das umgebende Wasser verursachten Amplitudenabfalls
l	Ortskoordinate der Länge eines austenitischen Bandes
m	Mittelungsfaktor, z.B. bei der Ortsmittelung von Streuamplitudenwerten A_S
n	1, 2, 3, 4, ...
r	Korrelationskoeffizient einer Stichprobe
s	Standardabweichung
t	Zeit
Δt	Zeitabschnitt, Auswertebereich zur Korngrößenbestimmung
v	Bandgeschwindigkeit
x	Ortskoordinate des Schallweges
α	Einfallswinkel (im Wasser)
α_K	Kritischer Winkel
β	Einschallwinkel (im Werkstück)
γ	Austrittswinkel vom Werkstück in das Wasser

Δ	Impulslänge
$\kappa^{L, T, R}$	Ultraschallschwächungskoeffizient für Longitudinal-, Transversal-, Rayleighsche Oberflächenwellen
κ_A	Absorptionskoeffizient
κ_S	Streukoeffizient
κ_S^L	Streukoeffizient für Longitudinalwellen
κ_S^T	Streukoeffizient für Transversalwellen
κ_S^R	Streukoeffizient für Rayleighsche Oberflächenwellen
κ_S^{LL}	Koeffizient, der den Anteil der durch Streuung einer einfallenden Longitudinalwelle entstehenden Longitudinalwellen beschreibt
κ_S^{LT}	dito, aber entstehende Transversalwellen aus einfallender Longitudinalwelle
κ_S^{TT}	dito, aber entstehende Transversalwellen aus einfallender Transversalwelle
κ_S^{TL}	dito, aber entstehende Longitudinalwellen aus einfallender Transversalwelle
λ	Ultraschallwellenlänge
μ	elastische Anisotropie
ν	Poissonsche Querkontraktionszahl
ρ	Korrelationskoeffizient einer Grundgesamtheit
ρ_I	Dichte im Medium I

Anmerkungen:

- 1) Der Ultraschallschwächungskoeffizient wird in der Literatur oft mit " α " bezeichnet. Zur Unterscheidung vom Einfallswinkel α wurde hier die Abkürzung " κ " gewählt.
- 2) In der werkstoffkundlichen Literatur wird die Querkontraktionszahl meistens mit " ν " bezeichnet, in der Literatur über zerstörungsfreie Prüfung oft mit " μ ". Zur Unterscheidung von der elastischen Anisotropie μ wurde hier die Abkürzung " ν " gewählt.
- 3) Der Index "-", z.B. bei \bar{A}_S , kennzeichnet immer eine Ortsmittelung, die durch Bewegungen des Prüfkopfes bzw. des Bandes durchgeführt wird. Der Streuamplitudenmittelwert \bar{A}_S wird entweder durch arithmetische oder eine laufende Mittelwertbildung errechnet (Gl. (62), S. 93). Beide Methoden führen hier zu gleichen Werten, daher wurde nur eine Abkürzung \bar{A}_S gewählt.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Das Verarbeitungsverhalten kaltgewalzter, nichtrostender austenitischer Feinbleche wird entscheidend durch die Größe der Körner im Mikrogefüge beeinflusst. Nach Hall /1/ und Petch /2/ ist die für das Fließen notwendige Spannung (Streckgrenze R_e) umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Korngröße D :

$$R_e = R_0 + \frac{C}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

Da austenitische Werkstoffe keine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen, werden bei ihnen zur Beurteilung der plastischen Verformbarkeit Dehngrenzen R_p gemessen. Abb. 1 zeigt anhand der Ergebnisse von 4 verschiedenen Großzahlauswertungen aus 12 Jahren den Einfluß der Korngröße auf die 0,2-Dehngrenze /3/. (Der Begriff der "Korngröße", der eigentlich auf die Beschreibung eines Kornvolumens hindeutet, soll in dieser Arbeit auch für den linienhaft ermittelten Korndurchmesser D angewendet werden). Ebenso steigt die Zugfestigkeit mit kleiner werdendem Korndurchmesser an, während z.B. die Bruchdehnung abfällt /3/.

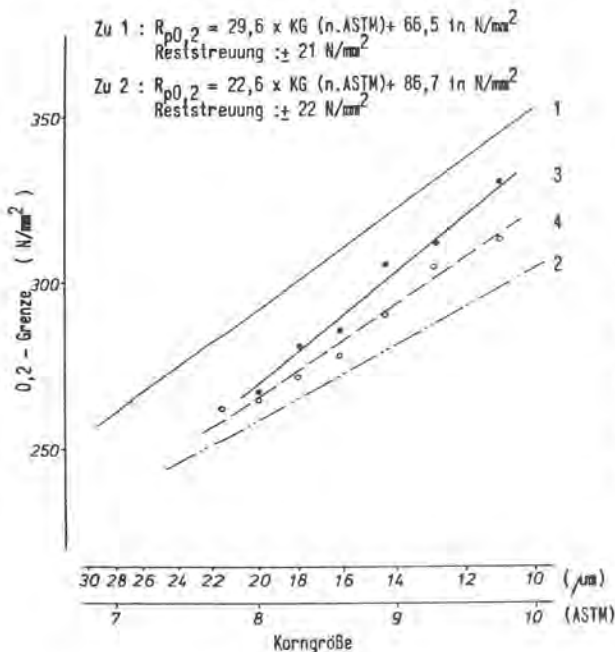


Abb. 1:

Gemessener Einfluß der Korngröße auf die 0,2-Dehngrenze bei Kaltbändern aus dem Werkstoff X 5 CrNi 18 9 (nach /3, 4/)

Für kritische Umformoperationen sollten also Feinbleche mit größerem Korn bevorzugt werden; die Korngröße hat jedoch auch

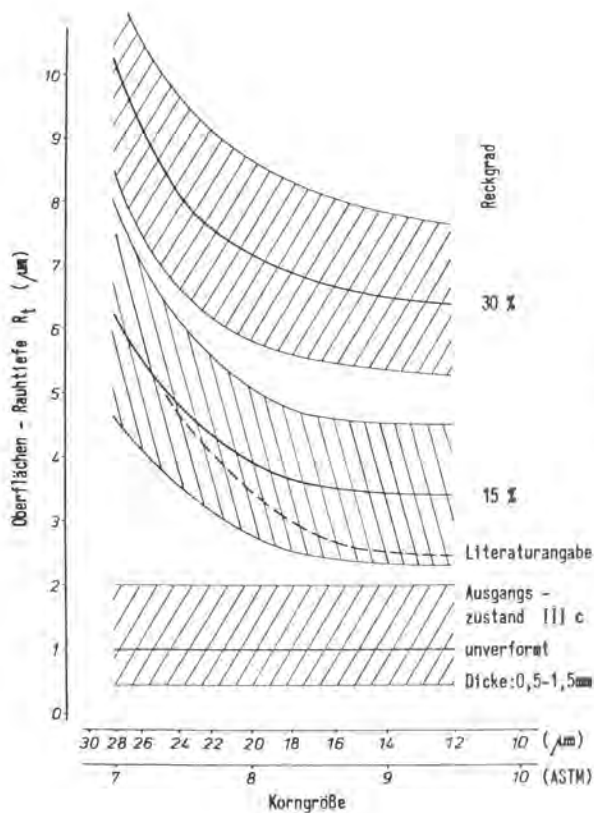


Abb. 2:
 Gemessener Einfluß
 der Korngröße
 auf die Oberflächen-
 aufrauhung bei Kaltbändern
 aus dem Werkstoff
 X 5 CrNi 18 9 (nach /3 ,4/)

einen starken Einfluß auf die Aufrauhung der Oberfläche, wenn Feinbleche durch Reckung gedehnt werden.

Aus Abb. 2 geht hervor, daß die Oberflächenrauhentiefe R_t nach einer Reckung mit wachsender Korngröße deutlich zunimmt. Da bei der Verarbeitung austenitischer Feinbleche Verformungen über 50% vorgenommen werden, muß zur Verringerung des anschließenden Polieraufwandes das Korn möglichst fein sein. Die gleichzeitige Berücksichtigung von Verformbarkeit und Oberflächengüte erfordert es, ein möglichst enges, definiertes Korngrößenstreuband bei der Herstellung der Bleche zu erreichen.

Die Korngröße wird nach dem Kaltwalzen durch eine rekristallisierende Durchlaufglühung eingestellt, die durch sehr kurze Glühzeiten (≈ 1 min) bei Ofentemperaturen über 1000°C gekennzeichnet ist. Neben den von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen Wärmeübergangsbedingungen sowie den Gehalten an bestimmten Legierungselementen wird die Korngröße vor allem durch die Glühbedingungen, also Temperatur und Bandgeschwindigkeit, beeinflusst. Jedoch ist es wegen des Einflusses

verschiedener Parameter derzeit noch nicht möglich, eine auf den Verwendungszweck optimierte Korngröße gezielt zu erzeugen. Z.B. treten, bedingt durch die Vorgeschichte eines Bandes, manchmal unregelmäßige Verzunderungen beim Glühen auf, die zu anderen Wärmeübergangsbedingungen führen und somit zu anderen Korngrößen. Durch eine kontinuierliche zerstörungsfreie Kontrolle der Korngröße könnte diese Problematik gelöst werden, da mit Hilfe einer Anzeige der momentan erzeugten Korngröße in den Glühprozeß steuernd eingegriffen werden kann.

Der Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer mit Ultraschall arbeitenden Meßmethode zur kontinuierlichen zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an austenitischen Kaltbändern und deren apparative Realisierung, wobei das bisher im Betrieb übliche Linienschnittverfahren ersetzt

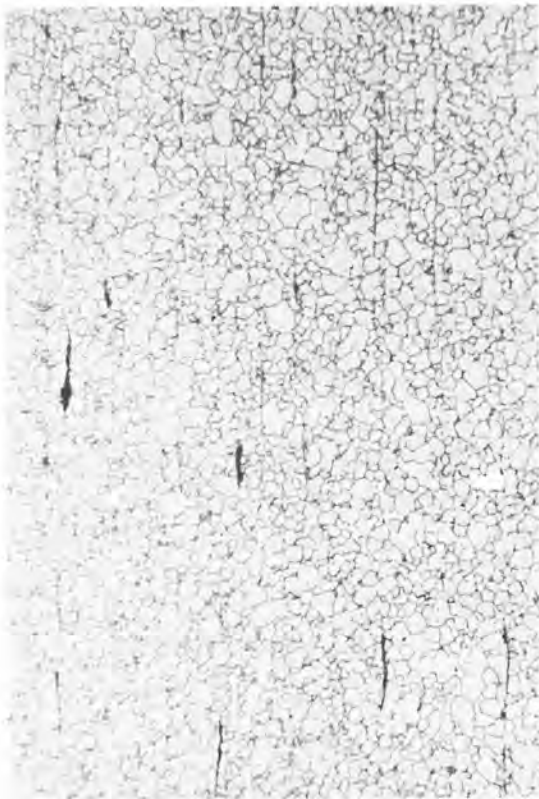


Abb. 3:
Längsschliff eines austenitischen
Feinbleches mit mittlerem Korn-
durchmesser $D = 9 \mu\text{m}$

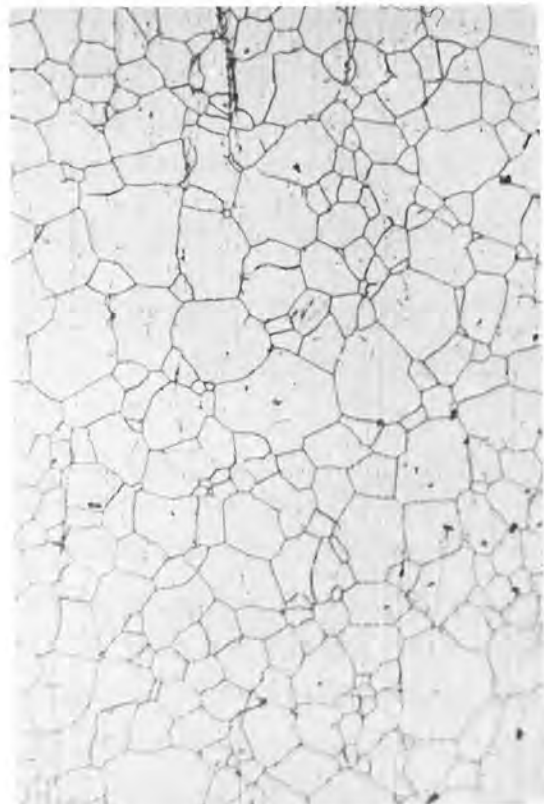


Abb. 4:
wie Abb. 3, aber
 $D = 23 \mu\text{m}$

werden soll. Dieses zerstörende metallographische Verfahren erlaubt lediglich eine stichprobenweise Korngrößenbestimmung, die in der Regel am Anfang und am Ende eines Bandes durchgeführt wird (siehe Abb. 3 und 4).

Die zerstörungsfreie Meßmethode basiert auf der Registrierung und Auswertung des vom Gefüge gestreuten Ultraschalls. Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, daß Ultraschall wegen der elastischen Anisotropie der einzelnen Körner im polykristallinen Gefüge gestreut wird, und die gemessene Verteilung der Streuamplituden Informationen über die mittlere Korngröße enthält. Die Kaltbänder, für die die Meßmethode zu entwickeln war, waren fast ausschließlich von der Qualität X 5 CrNi 18 9 (Werkstoff Nr. 1.4301) mit quasi-einphasigem Gefüge. Daher wird in dieser Arbeit auch nur die Ultraschallstreuung der einphasigen Gefüge behandelt. Bei der Lösung des vorliegenden Meßproblems war vor allem die Ausbreitung des gestreuten Ultraschalls im dünnen Blech zu untersuchen, um das gemessene Streusignal interpretieren und für eine zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung auch an dünnen, sehr feinkörnigen Blechen ausnutzen zu können.

2. Übersicht der zerstörungsfreien Methoden zur Korngrößenbestimmung

Die Standardverfahren zur Korngrößenbestimmung im Mikrogefüge von polykristallinen Werkstoffen beruhen auf der Präparation von Schliffen und der nachfolgenden Gefügebeurteilung unter einem Mikroskop. Obwohl diese metallographischen Verfahren teilweise automatisiert werden können, muß immer zerstörend eine Probe entnommen werden. In vielen Fällen ergibt sich jedoch die Forderung nach zerstörungsfreien Korngrößenmeßverfahren. Obwohl z.Zt. die Verfahrensentwicklung auf dem Gebiet der Ultraschallmethoden am fortgeschrittensten ist, soll zuerst ein kurzer Abriß der anderen zerstörungsfreien Meßmethoden gegeben werden.

2.1 Magnetische, induktive und radiographische Methoden

Magnetische Meßmethoden eignen sich nur für ferromagnetische Werkstoffe, scheiden also für das vorliegende Meßproblem aus.

In /5/ wird ein Verfahren zur Korngrößenbestimmung beschrieben, das auf einer Ausnutzung des Barkhausen-Rauschens bei der Magnetisierung beruht. In /6/ werden Entwicklung und Arbeitsweise einer Apparatur zur Messung des Gefügezustandes an ferritischen rostfreien Kaltbändern in einer Durchlaufglühanlage dargestellt. Mit Hilfe dieses Verfahrens, bei dem das Kaltband magnetisiert und danach der Restmagnetismus (Remanenz) gemessen wird, können die Gefügestände: nicht / teilweise / vollständig rekristallisiert sowie martensitisch gut unterschieden werden. Diese Anlage arbeitet bereits mehrere Jahre erfolgreich im praktischen Betrieb.

In /7/ konnten in Al-Legierungen Gefügeveränderungen durch eine Änderung der Wirbelstromleitfähigkeit nachgewiesen werden. Entsprechende Versuche zur Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen blieben jedoch zunächst erfolglos /8/.

Ebenso scheinen radiographische Methoden zur Korngrößenbestimmung nicht geeignet zu sein /8/. Die Wellenlängen der für Beugungsuntersuchungen verwendeten Röntgenstrahlung liegen zwischen 0.23 nm und 0.07 nm, also im Bereich der Atomgitterabstände und sind für eine Bestimmung der Korngröße im Bereich von $10 \leq D[\mu\text{m}] \leq 25$ nicht sensibel. Bei Röntgenaufnahmen von dünnwandigen austenitischen Bauteilen sowie von Aluminiumlegierungen mit Grenzenergien ≤ 100 keV (entsprechend einer Wellenlänge von ≥ 0.012 nm) wird jedoch manchmal eine Beugungsstruktur auf dem Röntgenfilm beobachtet, das sog. "mottling" /9, 10/. Es konnte gezeigt werden, daß diese Struktur auch von der Korngröße der verwendeten Proben abhängt. Diese Abhängigkeit tritt aber nur dann auf, wenn nach einer Rekristallisationsglüfung eine Verformung erfolgte. Es wird angenommen, daß sich Versetzungen, die für

diese Beugungsstrukturen verantwortlich sind, nach der Verformung an den Korngrenzen anhäufen und so eine Korngrößenabhängigkeit des "mottling" hervorrufen. Neben der Tatsache, daß das "mottling" z.Zt. meßtechnisch nur schwierig quantifizierbar ist /11/, eignet es sich nicht für das vorliegende Meßproblem. Dort soll die Korngröße der Feinbleche nach der Rekristallisationsglühung bestimmt werden; es wird im Herstellungsprozeß keine Verformung mehr aufgebracht.

Es sei zusätzlich darauf hingewiesen, daß mit Hilfe der Röntgenstrukturanalyse in Transmissionstechnik eine kontinuierliche Bestimmung der Anisotropie (R-Wert) in Feinblechen möglich ist /12/. Allerdings muß die empfangene Röntgenstrahlung wegen der äußerst geringen Intensitätsausbeute bei diesem Meßverfahren über größere Zeiträume aufaddiert werden, so daß nur alle 50 m ein integraler Meßwert erhalten wird.

2.2 Ultraschallmethoden

2.2.1 Grundlagen

Eine Ultraschallwelle, die sich in einem Medium mit dem Wellenwiderstand $W_1 = \rho_1 \cdot c_1$ ausbreitet, wird an einer Grenzfläche zu einem Medium mit einem anderen Wellenwiderstand $W_2 = \rho_2 \cdot c_2$ teilweise oder vollständig reflektiert. Ist die Größe dieser Grenzfläche - verglichen mit der Ultraschallwellenlänge - nicht "unendlich" ausgedehnt, sondern in etwa im Bereich der Wellenlänge oder kleiner, so spricht man nicht von Reflexion, sondern von Streuung.

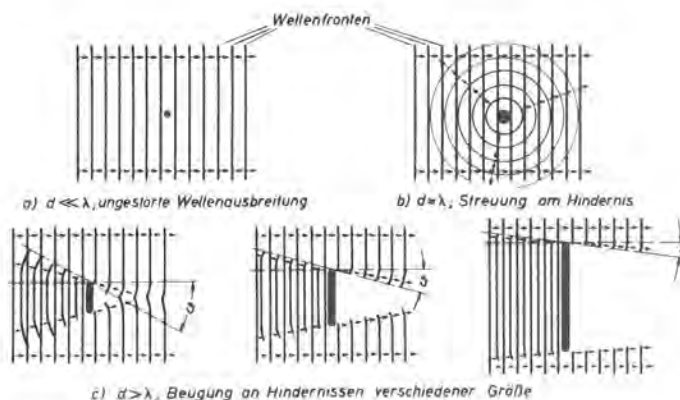


Abb. 5:
Streuung und Beugung
von Wellen an Hin-
dernissen

In Abb. 5 ist schematisch dargestellt, daß ein Streuer ($D \approx \lambda$), der von einer ebenen Wellenfront getroffen wird, eine Kugelwelle aussendet und somit der ebenen Wellenfront Energie entzieht /13/. Bereits gegen Ende der 40er Jahre haben Mason und McSkimmin /14, 15/, Lifshitz und Parkhomovskii /16/ sowie später Bhatia und Moore /17, 18/ gezeigt, daß eine ähnliche Betrachtung auch für die Ultraschallausbreitung in polykristallinen Materialien angewendet werden kann. Dort tritt ein Sprung im Wellenwiderstand zwischen benachbarten Körnern wegen der elastischen Anisotropie (Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im Einkristall) auf, so daß der einfallenden Ultraschallwelle durch Streuung Energie entzogen wird. Die Streuwellen breiten sich auch in diesem Fall ohne besondere Vorzugsrichtung aus (in alle Raumrichtungen gleichmäßig), wenn die Bedingung $D \ll \lambda$ erfüllt ist /19/. Es ist nun möglich, die Korngröße sowohl durch Messung der Amplitude der primären Welle nach dem Streuprozess zu bestimmen (Schwächungsmessung), als auch durch Messung der Amplitude der entstandenen Streuwelle (Streuungsmessung).

Für den durch Schwächung verursachten Amplitudenabfall einer ebenen Welle, die sich in einem homogenen Medium in x-Richtung ausbreitet, kann geschrieben werden:

$$A(x) = A_0 \cdot \exp(-\kappa x) \quad (2)$$

Der Schwächungskoeffizient κ setzt sich aus dem Absorptionskoeffizienten κ_A und dem Streukoeffizienten κ_S zusammen.

$$\kappa = \kappa_A + \kappa_S \quad (3)$$

Bei der Absorption wird Ultraschallenergie durch magnetoelastische oder Relaxationsmechanismen schließlich in Wärme umgewandelt. Die Absorption in polykristallinen Materialien hängt von der verwendeten Prüffrequenz ab. Während in älteren Arbeiten /20, 21/ noch eine quadratische Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten von der Frequenz f festgestellt wird, gibt eine neuere Arbeit /19/ eine durch umfangreiche Messungen abgesicherte lineare Abhängigkeit an (Gl. (4)).

$$\kappa_A = a_1 \cdot f \quad (4)$$

a_1 ist eine werkstoffspezifische Konstante, die u.a. die Versetzungsdichte enthält. Aufgrund umfangreicher Untersuchungen wird in /19/ für verschiedene Stähle die empirisch ermittelte Gleichung

$$\kappa_A \cdot \lambda = 0.007 \pm 0.005 \quad (5)$$

angegeben. λ ist dabei die Ultraschallwellenlänge.

Bei der Behandlung der Streuung müssen bezüglich des Verhältnisses zwischen Korngröße D und Ultraschallwellenlänge λ (D/λ -Verhältnis) Fallunterscheidungen getroffen werden (Abb. 6).

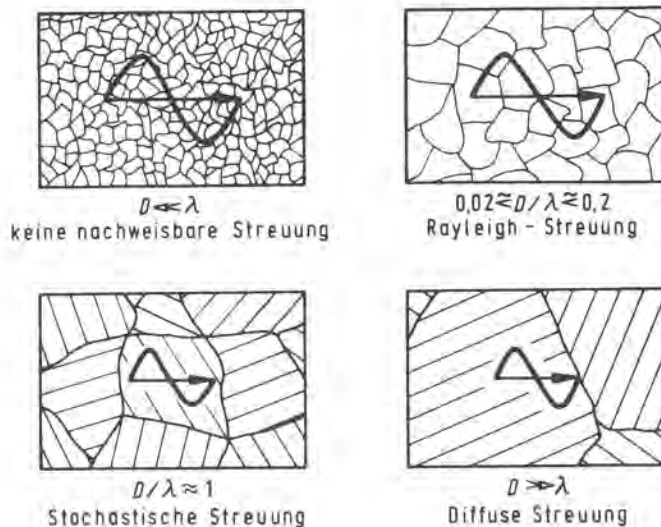


Abb. 6:
Ultraschall-Streuung:
Schematische Darstellung
der unterschiedlichen
Streumechanismen

Bei der Einteilung der Streubereiche nach unterschiedlichen Mechanismen ist zu beachten, daß die Grenzen zwischen den einzelnen Streumechanismen reine Anhaltswerte und nicht sprunghaft sind, sondern daß es Übergangsbereiche gibt, nicht zuletzt wegen der Korngrößenverteilung im Gefüge.

Ist die Korngröße kleiner als die Wellenlänge (nach neueren Untersuchungen /22 - 25/ $D/\lambda \ll 0.2$), so wird eine Ultraschallwelle im polykristallinen Gefüge nach dem Mechanismus der Rayleigh-Streuung gestreut. Dabei sind die Streukoeffizienten

κ_S^L und κ_S^T für einfallende Longitudinal- oder Transversalwellen zu unterscheiden. Diese Koeffizienten sind für polykristalline Gefüge zuerst von Bhatia /17, 18/ berechnet und später von Papadakis /26/ für verschiedene Kristallsysteme zusammengefaßt worden. Für kubische Systeme ist:

$$\kappa_S^L = \frac{8\pi^3}{375} \cdot \frac{f^4 \cdot D^3 \cdot \mu^2}{\rho^2 \cdot c_L^3} \cdot \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5} \right) \quad (6)$$

$$\kappa_S^T = \frac{6\pi^3}{375} \cdot \frac{f^4 \cdot D^3 \cdot \mu^2}{\rho^2 \cdot c_T^3} \cdot \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5} \right) \quad (7)$$

Diese beiden Streukoeffizienten sind proportional zum Quadrat der elastischen Anisotropie μ ,

$$\mu = c_{11} - c_{12} - 2c_{44} \quad (8)$$

welche den Unterschied der Schallgeschwindigkeiten in den verschiedenen kristallographischen Richtungen im Einkristall beschreibt. So wird z.B. Ultraschall in Aluminium wegen der kleineren elastischen Anisotropie bei sonst gleicher Korngröße und Frequenz weniger stark gestreut als in Stahl /19/. Aus den Gln. (6) und (7) geht insbesondere hervor, daß

$$\kappa_S^{L,T} \sim f^4 \cdot D^3 \quad (9)$$

d.h. daß der Streukoeffizient der Rayleigh-Streuung stark von mittlerer Korngröße D und Prüffrequenz f abhängig ist. Die Messung der Streukoeffizienten ist also eine Möglichkeit zur Korngrößenbestimmung.

Werden in die Gln. (6) und (7) gleiche Werte für D , f , usw. eingesetzt, so ergibt sich für Stahl, daß κ_S^T einen ca. 5 mal größeren Wert annimmt als κ_S^L . Transversalwellen werden also bei sonst gleichen Bedingungen stärker geschwächt. Ebenso ist

der Anteil von Transversalwellen, die durch Streuung entstehen, größer als der Anteil von entstehenden Longitudinalwellen. Die Gln. (6) und (7) können zur Verdeutlichung dieses Sachverhaltes folgendermaßen aufgespalten werden:

$$\kappa_S^L = \kappa_S^{LL} + \kappa_S^{LT} \quad (10)$$

$$\kappa_S^T = \kappa_S^{TL} + \kappa_S^{TT} \quad (11)$$

Am Beispiel der Gl. (10) wird so aus der Gl. (6):

$$\kappa_S^L = \frac{8\pi^3}{375} \frac{f^4 D^3 \mu^2}{\rho^2 c_L^3} \frac{2}{c_L^5} + \frac{8\pi^3}{375} \frac{f^4 D^3 \mu^2}{\rho^2 c_L^3} \frac{3}{c_T^5} \quad (12)$$

κ_S^{LL} beschreibt den Anteil der aus einer Longitudinalwelle durch Streuung entstehenden Longitudinalwellen, κ_S^{LT} den Anteil der entstehenden Transversalwellen. Dabei ist für Stahl

$$\frac{\kappa_S^{TT}}{\kappa_S^{TL}} = \frac{\kappa_S^{LT}}{\kappa_S^{LL}} \approx 37 \quad (13)$$

Dies bedeutet, daß - unabhängig von der Art der einfallenden Welle - der Anteil der durch Streuung entstehenden Transversalwellen 37 mal mehr zum Streukoeffizienten κ_S beiträgt als der Anteil der entstehenden Longitudinalwellen. (Andere Verhältnisse ergeben sich, wenn die Streukoeffizienten und deren Anteile nicht für eine konstante Frequenz verglichen werden, sondern für gleiche Wellenlängen der beteiligten Longitudinal- und Transversalwellen. Diese Betrachtung kann bei der Abschätzung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Ultraschallprüftechniken sinnvoll sein, jedoch nicht beim hier vorliegenden Prüfproblem.)

Es sei zusätzlich darauf hingewiesen, daß die Einheit der in (6) und (7) angegebenen Streukoeffizienten [Neper/mm] ist. Wegen der dimensionslosen Einheit "Neper" ist dies gleichbedeutend mit [1/mm]. In der Ultraschallprüfung ist jedoch die Angabe der Schallschwächung in [dB/mm] üblich. Dabei gilt einfach:

$$\kappa [\text{dB/mm}] = 8.69 \cdot \kappa [1/\text{mm}] \quad (14)$$

Zur Beschreibung der in dieser Arbeit diskutierten Sachverhalte wird jedoch weiter die Einheit $[1/\text{mm}]$ benutzt werden, um bei der Lösung von Exponentialfunktionen zusätzliche Umrechnungen zu vermeiden.

Bei größeren D/λ -Verhältnissen treten andere Streumechanismen auf: Ist $D/\lambda \approx 1$, so liegt der Mechanismus der stochastischen Streuung vor, ist $D/\lambda \gg 1$, so spricht man von diffuser Streuung. Auch für diese Streumechanismen sind Streukoeffizienten berechnet worden /26, 27/, wobei für die stochastische Streuung als wesentliches Merkmal gilt:

$$\kappa_S^{L,T} \sim f^2 \cdot D \quad (15)$$

und für die diffuse Streuung

$$\kappa_S^{L,T} \sim D^{-1} \quad (16)$$

Die diffuse Streuung kommt wegen des großen D/λ -Verhältnisses in der Praxis kaum vor und läßt sich insbesondere bei dem hier vorliegenden Meßproblem nicht ausnutzen. Die Beziehung (15) für den Streukoeffizienten der stochastischen Streuung ist außerdem nicht hinreichend abgesichert. Deshalb sollte für eine zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung mit Ultraschall die Wellenlänge so gewählt werden, daß im Bereich der Rayleigh-Streuung gemessen wird.

Die Wahl der für die Korngrößenbestimmung geeigneten Prüffrequenz wird in folgendem Beispiel dargestellt:

Ist die maximal auftretende Korngröße $D = 30 \mu\text{m}$, so ergibt sich bei einem Verhältnis $D/\lambda = 0.2$ eine Wellenlänge von $\lambda = 0.150 \text{ mm}$ für eine Transversalwelle. Bei einer Prüffrequenz von 20 MHz ist die Wellenlänge $\lambda = c_T/f = 3.1/20 = 0.151 \text{ mm}$. 20 MHz wäre für diesen Anwendungsfall daher die geeignete Prüffrequenz. Jedoch wird dann bei einer Korngröße

von $D \approx 3 \mu\text{m}$ das D/λ -Verhältnis kleiner als 0.02. In diesem Fall ist kaum noch Ultraschallstreuung meßbar (siehe Abb. 6, S. 8, links oben), weil der einfallenden Welle kaum noch Energie entzogen wird.

2.2.2 Schwächungsmessung

Bei der Schwächungsmessung wird der Amplitudenabfall ΔA einer Schallwelle als Funktion des Schallaufweges gemessen (Abb. 7).

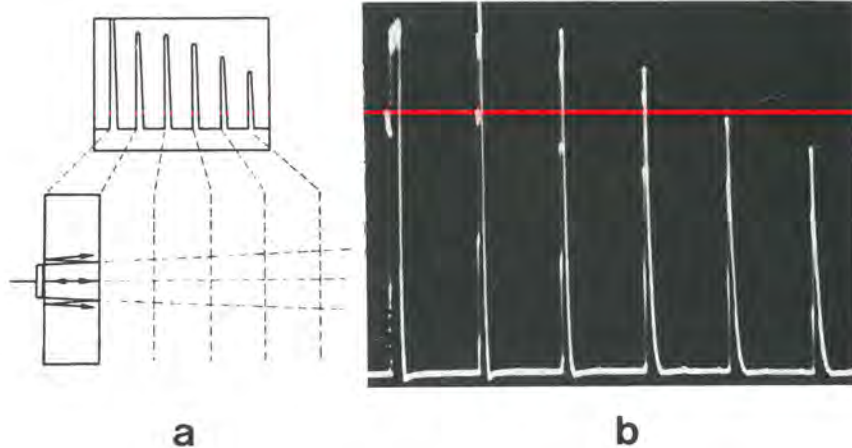


Abb. 7:

Mehrfachechos

aus einer Platte

a) schematisch

b) wirkliches

Schirmbild ohne

Laufzeit- oder

Dickenskala,

Stahlplatte von

50 mm Dicke,

Frequenz 4 MHz

(nach /28/,

Seite 194)

Die Amplitude A einer Rückwandeckhofolge in einer planparallelen Platte als Funktion des Schallaufweges x läßt sich wie folgt beschreiben:

$$A = C \cdot F(x) \cdot R^{n-1} \cdot e^{-\kappa x} \quad (17)$$

C ist eine Konstante, die prüfkopf- und gerätespezifische Größen enthält, die Funktion $F(x)$ beschreibt die Schallausbreitungsverluste als Funktion des Schallaufweges x ; R ist der Reflexionsfaktor der Grenzfläche Stahl/Prüfkopf, n die Anzahl der Reflexionen und κ der Schwächungskoeffizient des betreffenden Werkstoffs. Die Schallausbreitungsverluste sind zuerst für den monochromatischen Fall von Seki, Granato und Truell

/29/ berechnet worden. Sie sind in der Kurve "0" der Abb. 8 dargestellt, wobei der Abstand von der Prüfkopfoberfläche bezogen auf die Nahfeldlänge N angegeben ist

$$N \approx \frac{D_{\text{eff}}^2}{4\lambda} = \frac{D_{\text{eff}}^2 \cdot f}{4c} \quad (18)$$

mit D_{eff} als effektivem Schwingerdurchmesser des Prüfkopfs. Im Fernfeld des Prüfkopfes ($x > 3N$) wird $F(x) = 1/x$.

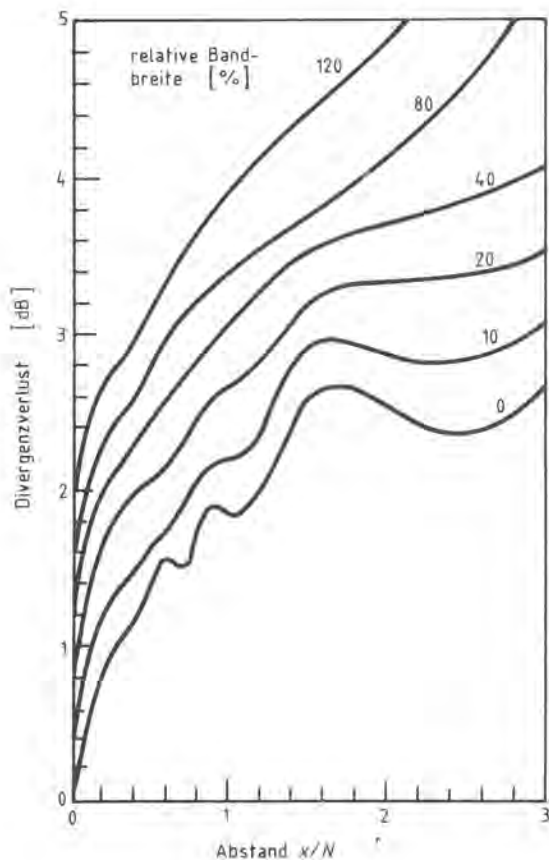


Abb. 8:
Berechnete Schallausbrei-
tungsverluste als Funktion
des Abstandes für Ultraschall-
impulse unterschiedlicher
Bandbreite (Angabe der Band-
breite in % bezogen auf die
Mittenfrequenz. 0% ist der
monochromatische Fall)
(nach /30/)

Da im Schwächungskoeffizienten κ die Korngröße enthalten ist ($\kappa = \kappa_A + \kappa_S; \kappa_S \sim D^3$), kann aus der Messung des Amplitudenabfalls der Rückwandeckhofolge die Korngröße in einer planparallelen Platte bestimmt werden, wenn die Schallausbreitungsverluste $F(x)$ und die Reflexionsverluste R^{n-1} korrigiert werden. Dies ist jedoch schwierig, da einerseits nicht monochromatisch gearbeitet wird sondern mit Impulsen, wobei der in /29/ angegebene Formalismus zu fehlerhaften Ergebnissen führt, und andererseits die Ankopplungsbedingungen zwischen

Prüfkopf und Werkstück über die Koppelschicht (Reflexionsfaktor R) nicht genau definiert sind, da sie stark von Anpreßdruck, Ölschichtdicke, Oberflächenrauheit und vom verwendeten Prüfkopftyp abhängen. Bereits 1958 wurde von Krautkrämer /31/ auf den starken, jedoch schlecht quantitativ erfaßbaren Einfluß des Reflexionsfaktors R auf die Schwächungsmessung hingewiesen.

Enorme Verbesserungen auf dem Gebiet der Ultraschallschwächungsmessungen hat Papadakis erreicht, der sowohl die Berechnungen von Seki, Granato und Truell auf den nicht-monochromatischen Fall erweiterte, (Abb. 8), d.h. für die normale Ultraschallprüfung mit zeitlich begrenzten Impulsen /30, 32/, als auch eine Methode zur zerstörungsfreien Korngrößenmessung vorschlug, bei der definierte Vorlaufstrecken (z. B. Quarzglas) verwendet werden und so auch der Reflexionsfaktor korrigiert werden kann /33/. Trotz dieser verbesserten Methode sowie zahlreicher Untersuchungen z.B. von Aurich /21, 34/, Serabian /35/, Klinmann /36/ und anderer Autoren /37 - 44/ hat sich die Korngrößenbestimmung durch Schwächungsmessung wegen der geringen erreichten Meßgenauigkeit in der Praxis nicht durchgesetzt. Gründe dafür könnten mangelnde Parallelität der zu untersuchenden Werkstücke sein sowie zu rauhe Oberflächen. Eine realistische Einschätzung über die Anwendbarkeit der Schwächungsmessung geben Bott et al. /45/ an. Sie kommen zu dem Ergebnis, daß diese lediglich als Sortierverfahren für Werkstoffe geeignet ist, um z.B. anhand des Rückwandechoabfalls einen gehärteten von einem normalgeglühten Stahl unterscheiden zu können.

2.2.3 Streuungsmessung

Im Gegensatz zur Schwächungsmessung wird bei der Streuungsmessung die vom Gefüge zum Prüfkopf zurückgestreute Schallamplitude registriert, das sog. "Gefügerauschen". In Abb. 9 ist dargestellt, wie die Amplitude des vom Gefüge rückgestreuten Ultraschalls bei grobkörnigem Gefüge angestiegen

ist, so daß bereits mit einem einfachen Ultraschallgerät die Korngröße grob unterschieden werden kann. Der von den Autoren verwendete Begriff "Bürstenmethode" ist dabei so zu verstehen, daß das auf dem Bildschirm beobachtete Ultraschallstreusignal - verursacht durch grobkörniges Gefüge - in etwa einer Bürste ähnelt.

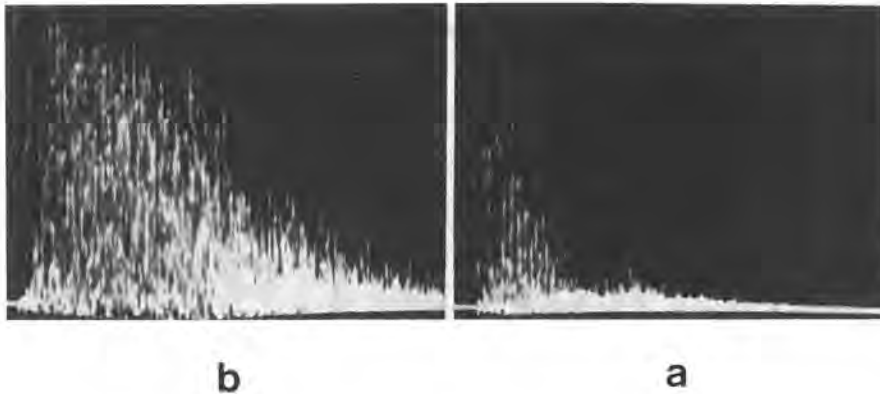


Abb. 9:

Die Bürstenmethode zum Vergleich der Schwächung in gleichgeformten Prüflingen, hier zur Gefügeprüfung in stranggepreßtem Aluminiumrundmaterial von 80 mm Durchmesser, Frequenz 4 MHz
a) bei Normalzustand
b) bei Gefügevergrößerung
(nach /28/, Seite 543)

Die ersten Betrachtungen und Versuche zur genaueren Korngrößenbestimmung mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung wurden 1973 von Koppelman und Fay durchgeführt /46 - 48/. Für die Amplitude der rückgestreuten Ultraschallwellen als Funktion des Schallaufweges gilt danach

$$A_s(x) = C \cdot \sqrt{\kappa_s \cdot \Delta} \cdot e^{-(\kappa_A + \kappa_s)x} \quad (19)$$

wobei $A_s(x)$ die Amplitude der Streuwelle darstellt, die am Ort x entstanden ist und nicht weiter mit anderen Streuern

reagiert (Einfachstreuung; auf die Mehrfachstreuung, bei der auch die Wechselwirkung der bereits gestreuten Schallwellen mit dem Gefüge betrachtet wird, wird im Abschnitt 3.5.2 eingegangen). C enthält geräte- und schallfeldspezifische Größen, Δ ist die Länge des eingeschallten Ultraschallimpulses in [mm]. Die Gl. (19) ist sowohl für Longitudinal- als auch für Transversalwellen gültig; da Streuungsmessungen in der Regel mit einer Transversalwelleneinschallung durchgeführt werden, wird in die Gl. (19) der Streukoeffizient aus Gl. (7) eingesetzt. Unter Vernachlässigung der Absorption ergibt sich:

$$A_s(x) = C \cdot \sqrt{\frac{6\pi^3 \cdot f^4 D^3 \mu^2 \Delta}{375 \cdot \rho^2 \cdot c_T^3} \cdot \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{6\pi^3 \cdot f^4 D^3 \mu^2}{375 \cdot \rho^2 c_T^3} \cdot \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5}\right)\right) x} \quad (20)$$

Am Rande sei bemerkt, daß es in einigen Fällen außerdem sinnvoll ist, die Gl. (20) so umzustellen, daß anstelle der Frequenz das Korndurchmesser/Wellenlängen-Verhältnis D/λ angegeben wird:

$$A_s(x) = C \cdot \sqrt{\frac{6\pi^3 \cdot (D/\lambda)^3 \mu^2 \Delta \cdot c_T}{375 \cdot \rho^2 \cdot \lambda} \cdot \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5}\right)} \cdot e^{-\left(\frac{6\pi^3 \cdot (D/\lambda)^3 \mu^2 c_T}{375 \cdot \rho^2 \lambda} \cdot \left(\frac{2}{c_L^5} + \frac{3}{c_T^5}\right)\right) x} \quad (21)$$

In Abb. 10 sind nun theoretisch berechnete Rückstreu曲ven gemäß Gl. (20) für unterschiedliche Streukoeffizienten dargestellt. Der Einfluß der Korngröße D , die im Streukoeffizienten enthalten ist, zeigt sich durch zwei Effekte: Einerseits nimmt die Streuamplitude am Ort $x = 0$ mit der Korngröße zu,

$$A_s(x=0) \sim \sqrt{D^3} \quad (22)$$

andererseits nimmt auch die Steigung der theoretisch berechnete Rückstreu曲ven mit der Korngröße zu, d.h. die Streuamplitude fällt als Funktion des Schallaufweges schneller ab.

$$A_s(x) \sim e^{-D^3 \cdot x} \quad (23)$$

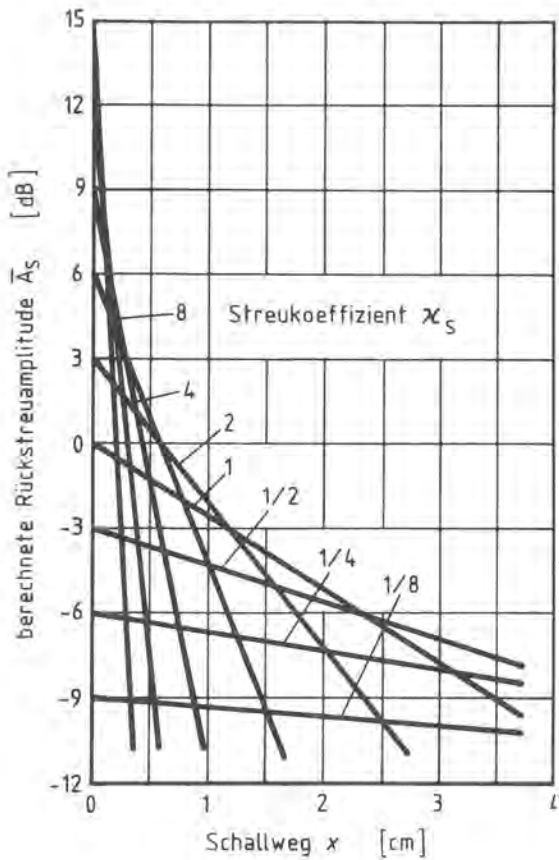


Abb. 10:

Nach Gl. (20) theoretisch ermittelte Rückstreukurven für Proben mit makroskopisch homogenem Gefüge (κ_s unabhängig von x) (nach /48/)

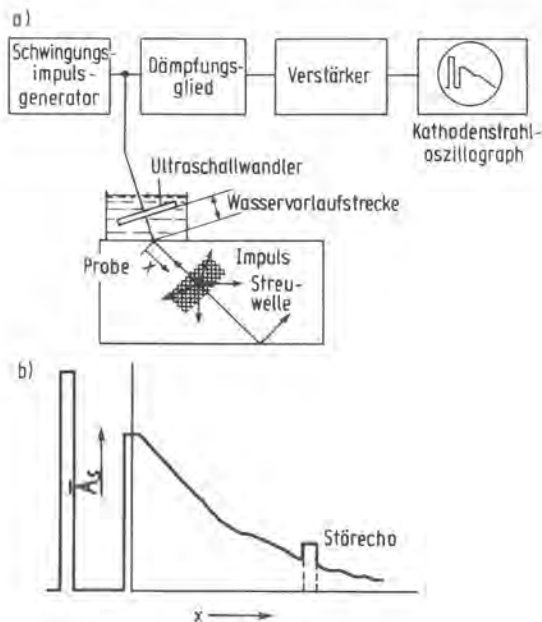


Abb. 11:

Schematische Darstellung des Ultraschallrückstreuverfahrens:

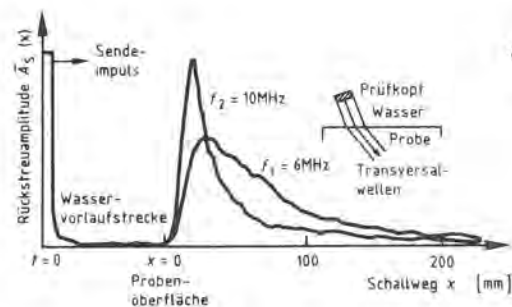
- a) Meßanordnung
- b) vom Wandler empfangenes, bei der Koordinate x entstandenes Rückstreusignal \bar{A}_s mit durch raue Probenoberfläche verursachtem Störecho (nach /48/)

Hinweis: Über die Entstehung des "Störechos" wird in Kap. 3.3 berichtet

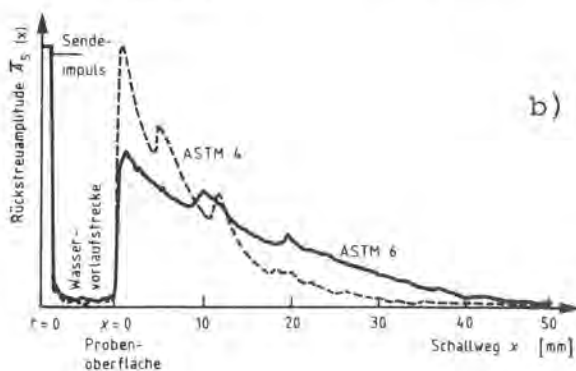
In der Abb. 11 ist schematisch die von Fay benutzte Meßapparatur dargestellt. Über eine Wasservorlaufstrecke wird so eingeschallt, daß sich im Werkstück eine Transversalwelle ausbreitet, die im Gefüge gestreut wird. Die Steigung der Rückstreu-

amplitude $\bar{A}_S(x)$ wird dann zur Korngrößenbestimmung herangezogen. Ein wesentliches Merkmal der Rückstreuungsmessung ist, daß kein planparalleles Werkstück mehr erforderlich ist.

Das Ultraschallrückstreuerverfahren ist von Goebbels verbessert worden /19, 49, 50/. Dabei wird zur Korngrößenbestimmung ausgenutzt, daß der Streukoeffizient der Rayleigh-Streuung gemäß Gl.(9) sowohl von der Korngröße D als auch von der Prüffrequenz f abhängt. Werden nun in ein Werkstück zwei Transversalwellen mit unterschiedlichen Frequenzen eingeschallt, so haben die jeweils empfangenen Streusignale auch unterschiedliche Steigungen (Abb. 12). Mit Hilfe der deshalb resultierenden unterschiedlichen Werte κ_1 und κ_2 der gemessenen Schwächungskoeffizienten kann der Absorptionskoeffizient κ_A bei bekannter Frequenzabhängigkeit eliminiert werden, so daß die Angabe eines absoluten Wertes für die Korngröße D möglich ist.



a) Abb. 12:
Gemessene Rückstreuamplitudenverläufe bei Veränderung von Frequenz und Korngröße (nach /19/)



b)

Aus diesem Meßprinzip ist mittlerweile ein kommerzielles Korngrößenmeßgerät entwickelt worden /51/, das sich wegen der dort benutzten Auswertmethode jedoch nicht für die Korngrößenbestimmung in dünnen Blechen eignet. Bei dünnen Blechen folgt der Streuamplitudenverlauf $\bar{A}_S(x)$ nicht den in Abb. 12b bzw. Abb. 10 dargestellten Gesetzmäßigkeiten. Dies wird im Kapitel 3.5.2 beschrieben (siehe z.B. Abb. 43, S. 55).

Eine weitere Begrenzung der Anwendungsmöglichkeiten dieses Gerätes ergibt sich aus der Dynamik des Rayleighschen Streubereichs, der ungefähr durch $0,02 \leq D/\lambda < 0,2$ gegeben ist. Bei $D/\lambda \approx 0,02$ ist die Amplitude der Rückstreuung für eine Korngrößenbestimmung zu klein, bei $D/\lambda \gg 0,2$ gelten die Gesetzmäßigkeiten der Rayleigh-Streuung nicht mehr. Wie eben beschrieben, muß mit 2 Frequenzen f_1 und f_2 gearbeitet werden bzw. mit 2 Wellenlängen λ_1 und λ_2 . In der Regel sollte dabei $f_2 = 2f_1$ sein: Ist $f_2 < 2f_1$ (beide Frequenzen liegen dichter beieinander), so kann die Messung in der Praxis dadurch ungenauer werden, daß auch κ_1 und κ_2 zu dicht beieinander liegen und eventuell nicht mehr unterschieden werden können. Ist $f_2 > 2f_1$, so kann nur noch ein begrenzter Korngrößenbereich meßtechnisch im Bereich der Rayleigh-Streuung erfaßt werden. Dies kann leicht durch den Extremfall $f_2 = 10f_1$, bzw. $\lambda_2 = 0,1 \lambda_1$, gezeigt werden, wobei nur noch ein einziger Korngrößenwert richtig gemessen werden kann, nämlich der, der für die Frequenz f_1 die Bedingung $D/\lambda = 0,02$ erfüllt und für f_2 $D/\lambda = 0,2$. Beim optimalen Frequenzverhältnis $f_2 = 2f_1$ halbiert sich der Rayleighsche Streubereich, da sonst entweder f_2 zu groß oder f_1 zu klein ist. Das bedeutet aber, daß der Korngrößenbereich, in dem eine korrekte Messung möglich ist, für die hier getroffenen Annahmen nur einen Faktor 5 umfaßt; z.B. von 20 μm bis 100 μm . Wird berücksichtigt, daß die Bereichsgrenzen ungefähre Richtwerte sind, so sollte eine ausreichend genaue Korngrößenbestimmung über einen Korngrößenbereich von einer bis zu einer halben Dekade möglich sein, wobei der Anwender die ungefähre Korngröße im Werkstück aber vorher wissen sollte.

Das von Goebbels vorgeschlagene 2-Frequenzen-Verfahren ist von Willems auf den Anwendungsfall der Korngrößenbestimmung an der Oberfläche eines Werkstücks erweitert worden /22, 23, 52/. Dazu wird mit einem Winkelprüfkopf über eine Plexiglasvorlaufstrecke so eingeschallt, daß eine freie Rayleighsche Oberflächenwelle im Werkstück erzeugt wird (Abb. 13).

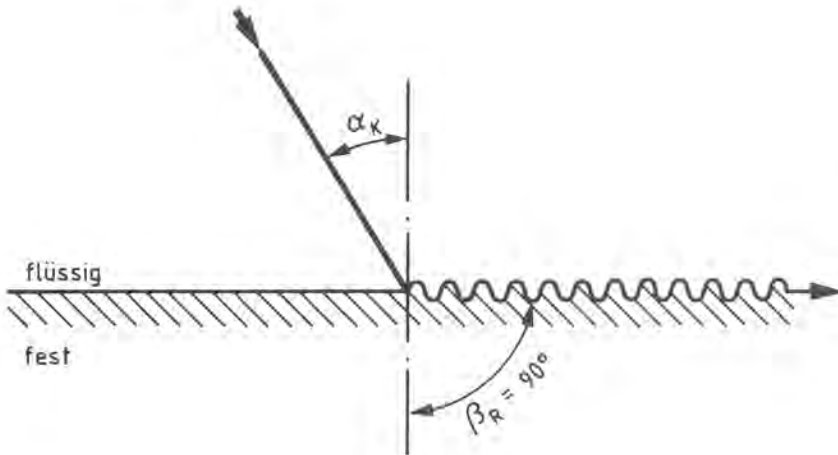


Abb. 13:
Erzeugung von
Oberflächenwellen

Der dazu erforderliche Einfallswinkel α_k im Plexiglas berechnet sich wegen $\beta_R = 90^\circ$ aus

$$\alpha_k = \arcsin \frac{c_L}{c_R} \quad (24)$$

mit c_L Longitudinalwellengeschwindigkeit im Plexiglaskeil (2.74 mm/ μ sec) und c_R Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle im Werkstück. Dabei gilt

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12 \cdot \nu}{1 - \nu} \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \nu)}} \quad (25)$$

mit E als Elastizitätsmodul, ρ als Dichte und ν als Poisson'scher Querkontraktionszahl oder angenähert

$$c_R \approx 0.9 \cdot c_T \quad (26)$$

Für eine Paarung Plexiglas/Austenitischer Stahl ergibt sich so ein Einfallswinkel von ca. $\alpha \approx 80^\circ$. Es sei noch darauf hingewiesen, daß der notwendige Einfallswinkel zur Erzeugung

einer Oberflächenwelle α_k ("Kritischer Winkel") nicht identisch ist mit dem Einfallswinkel zur Totalreflexion der Transversalwelle. Dieser errechnet sich aus

$$\alpha = \arcsin \frac{c_{L, \text{Plexiglas}}}{c_{T, \text{Stahl}}} \quad (27)$$

und ist wegen Gl. (26) stets etwas kleiner als α_k .

Zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung werden bei diesem Verfahren wieder bei 2 unterschiedlichen Frequenzen die Steigungen der empfangenen Rückstreusignale - diesmal von der rückgestreuten Oberflächenwelle - gemessen und daraus die Korngröße berechnet. Der Schwächungskoeffizient der Oberflächenwelle setzt sich dabei nach Viktorow /53/ additiv aus den Schwächungskoeffizienten für Longitudinal- und Transversalwellen zusammen.

$$\kappa^R = B \cdot \frac{c_T}{c_R} \cdot \kappa^T + (1-B) \cdot \frac{c_L}{c_R} \cdot \kappa^L \quad (28)$$

B ist eine Funktion der Poisson-Zahl ν und hat für Stahl den Wert $B = 0,89$. Nach Gl. (28) wird κ^R hauptsächlich durch den Schwächungskoeffizienten für Transversalwellen bestimmt.

Dieses von Willems und Goebbels erst kürzlich /22/ weiterentwickelte Verfahren zur Korngrößenbestimmung im Oberflächenbereich kommt der Lösung des in dieser Arbeit behandelten Problems der Korngrößenbestimmung in austenitischen Feinblechen schon recht nahe, jedoch sprechen 3 Gründe gegen die Anwendung dieses Verfahrens:

- a) Konventionelle austenitische Feinbleche haben Korndurchmesser im Bereich zwischen 10 und 25 μm , sind dem technischen Sprachgebrauch nach ausgesprochen feinkörnig. Nach den in Kap. 2.2.1 auf Seite 11 angestellten Betrachtungen ist die optimale Prüffrequenz für diesen Bereich 25 MHz. Eine Ultraschallwelle dieser hohen Frequenz wird jedoch in einem Plexiglaskeil so stark geschwächt (dies gilt

erfahrungsgemäß auch für andere feste Materialien mit geringer Schallgeschwindigkeit), daß die Amplitude des Rückstreuungssignals nicht wesentlich größer als das elektrische Rauschen ist. Hinzu kommt, daß der Schallaufweg in Plexiglas wegen des großen Einfallwinkels von $\alpha = 80^\circ$ mehrere cm beträgt. Eine Erniedrigung der Prüffrequenz wäre insofern keine Abhilfe, da Werkstoffe mit Korngrößen $D \lesssim 20 \mu\text{m}$ nicht mehr gemessen werden könnten, weil das Streusignal wegen des zu kleinen D/λ -Verhältnisses ebenfalls im elektrischen Rauschen untergehen würde /52/. Die Anregung von Oberflächenwellen über Flüssigkeitsvorlaufstrecken, die den Ultraschall weit weniger schwächen als feste Materialien, führt zu anderen physikalischen Effekten und wird in Kap. 3.4 ausführlich beschrieben.

- b) Die Eindringtiefe der Rayleighschen Oberflächenwelle liegt etwa bei einer Wellenlänge, was bei der Prüffrequenz von 25 MHz ca. 0.1 mm entspricht. Da Feinbleche an der Oberfläche etwas feiner auskristallisieren können als im Blechvolumen, ist diese Eindringtiefe zur Beurteilung des gesamten Gefüges nicht ausreichend.
- c) In /52/ wird die Genauigkeit der Meßmethode mit $\pm 20\%$ Abweichung vom metallographischen Befund angegeben. Das entspricht bei einer Korngröße von $D = 20 \mu\text{m}$ einem absoluten Fehler von $\pm 4 \mu\text{m}$ und reicht für den vorgegebenen Meßbereich von 10-25 μm nicht aus.

3. Ultraschallausbreitung in schallstreuenden Werkstoffen unter besonderer Berücksichtigung von dünnen Blechen

Zur Lösung des Problems der Korngrößenbestimmung in Feinblechen mit Ultraschall werden in diesem Kapitel die Grundlagen der Ultraschallausbreitung in schallstreuenden Werkstoffen theoretisch und experimentell eingehend untersucht. Daher sollen bereits an dieser Stelle die Meßaufbauten

beschrieben werden, die in den Kapiteln 3. und 4. für Grundlagenmessungen verwendet wurden. Die eigentliche Meßapparatur zur Korngrößenbestimmung in einer Durchlaufglühanlage wird in Kap. 5 vorgestellt.

3.1 Verwendete Meßapparaturen für die Grundlagenmessungen

Bei Ultraschalluntersuchungen werden oft zwei Prinzipien zur Beurteilung von empfangenen Signalen verwendet /54, 55/, die z.T. mit gleichen Geräten durch geeignetes Zusammenschalten realisiert werden können:

- 1) Messung der Ultraschallamplitude A als Funktion der Zeit $A(t)$ (A-Bild)
- 2) Messung des Amplitudenverlaufs $A(t)$, Ausblenden eines interessierenden Auswertebereichs Δt mit Hilfe einer Torschaltung, Fourieranalyse des Signals $A(\Delta t)$ im Auswertebereich z.B. durch einen analogen Spektrumanalysator und Registrierung des erhaltenen Amplitudenspektrums $dA/df(f)$.

Andere mechanisierte Ultraschallmeßtechniken sind in der DIN 54119 definiert, z.B. B-, C-, D-Bild-Techniken; diese sollen aber hier nicht diskutiert werden.

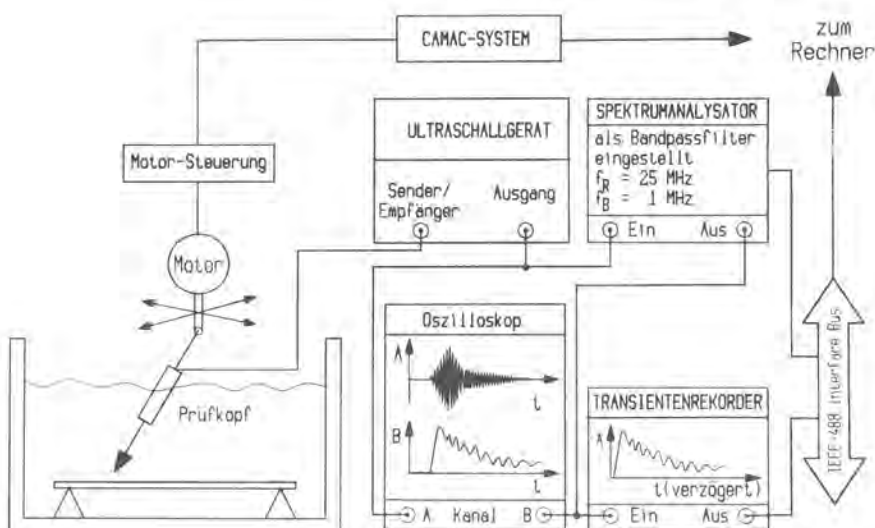


Abb. 14: Blockschaltbild des Aufbaus zur Messung hochfrequenter Zeitsignale

Abb. 14 zeigt schematisch den für das 1. Meßprinzip verwendeten Aufbau *). Die benutzten Komponenten werden im Anhang A1 genauer beschrieben. Der Prüfkopf befindet sich an einer kardanischen Aufhängung, befestigt in einem Becken unter Wasser. Das Wasser dient der akustischen Kopplung zwischen Prüfkopf und Prüfobjekt. Diese Anordnung erlaubt in einfacher Weise eine Variation des Einfallswinkels. Die Prüfkopfhaltung ist manuell in der Höhe verstellbar sowie zur Ortsmitteilung über rechnergesteuerte Schrittmotoren in Längs- und Querrichtung. Der Prüfkopf wird von einem Ultraschallgerät angeregt (Panametrics Pulser/Receiver 5052 PR), das für Ultraschallfrequenzen bis 50 MHz geeignet ist. Das empfangene Ultraschallsignal $A_g(t)$ wird auf einem Oszilloskop (Philips 50 MHz-Multiplizieroszilloskop) dargestellt. Ein Abspeichern dieses Signals im Rechner ist bei der zumeist verwendeten Frequenz von 25 MHz mit Hilfe des verwendeten Transientenrecorders (Taktfrequenz 20 MHz) zunächst nicht möglich. Daher wird ein analoger Spektrumanalysator, dessen Mittenfrequenz und Filterbandbreite einstellbar sind, als Bandpaßfilter für das Ultraschallsignal benutzt. Außerdem wird nach der Gleichrichtung des gefilterten Signals im Gerät die Einhüllende gebildet, deren obere Grenzfrequenz der eingestellten Filterbandbreite (z.B. 1 MHz) entspricht (Abb. 15).

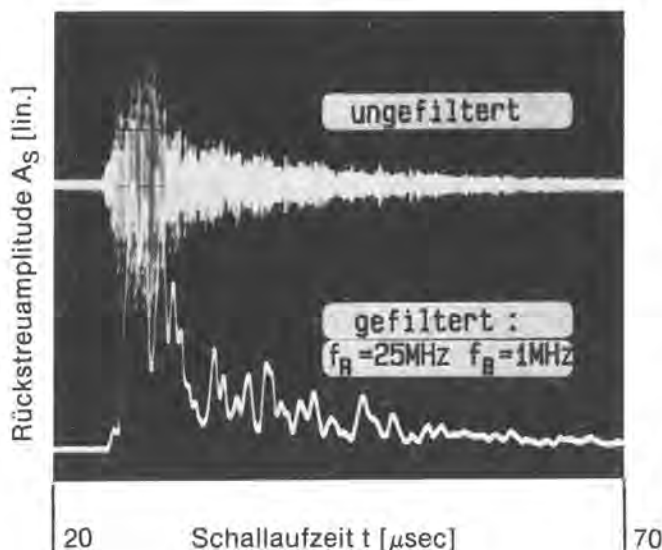


Abb. 15:
Typisches
Rückstreusignal
eines austeni-
tischen Fein-
blechs:
gefiltert und
ungefiltert

*) Mit diesem wurden die meisten der in Kap. 3.3-3.5 beschriebenen Grundlagenmessungen durchgeführt sowie die Meßmethode zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung im Laborstadium realisiert (Kap. 4).

Das nun bedeutend niederfrequenzere analoge Zeitsignal $A_S(t)$ kann mit dem Transientenrecorder in ein digitales Signal umgewandelt werden. Dieses wird über ein genormtes Datenübertragungssystem (IEC-Bus, HP-IB-Bus) in einen Prozeßrechner (HP 1000-F) transferiert und kann dort durch entsprechende Programme ausgewertet oder weiterverarbeitet werden. Auch der als Bandpaß verwendete analoge Spektrumanalysator ist über den HP-IB-Bus z.B. zur Vorwahl bestimmter Geräteeinstellungen mit dem Prozeßrechner verbunden. Beim rechnerunterstützten Betrieb der Schrittmotoren zur Prüfkopfmanipulation dient als Schnittstelle zum Prozeßrechner ein CAMAC-System, das ebenfalls im Anhang A1 beschrieben wird.

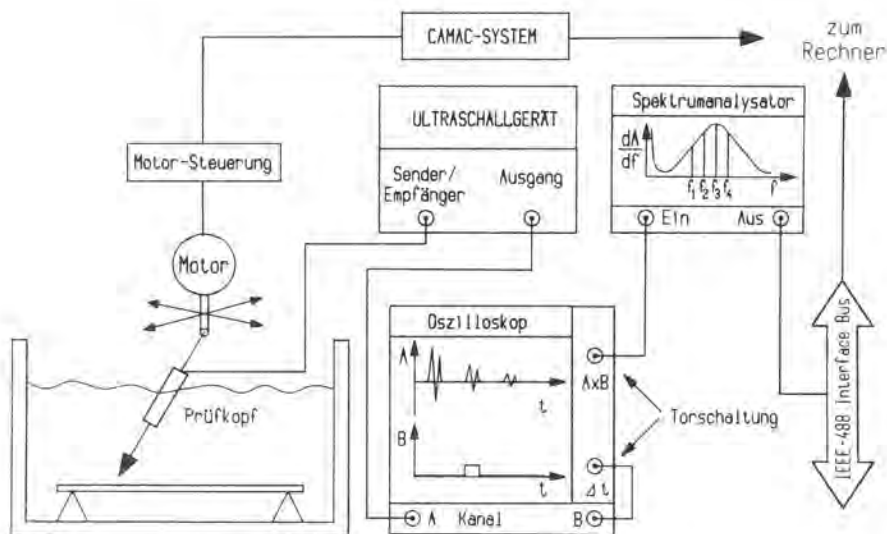


Abb. 16: Blockschaltbild des Aufbaus zur Messung von Amplitudenspektren sowie zur Bestimmung des Amplitudenabfalls bestimmter Frequenzanteile eines Ultraschallimpulses

Der für das 2. Meßprinzip benutzte Aufbau ist in Abb. 16 dargestellt. Dieser Meßaufbau wurde vor allem für die in Kap. 3.2 vorgestellten Ergebnisse benutzt sowie bei den Abbn. 24, S. 36, und Abb. 40, S. 53. Dabei dient das Oszilloskop sowohl zur Darstellung des empfangenen Ultraschallsignals $A(t)$ als auch zur Realisierung der Torschaltung. Das ausgeblendete Ultra-

schallsignal $A(\Delta t)$ wird auf den analogen Spektrumanalysator gegeben und das so gemessene Amplitudenspektrum $dA/df(f)$ über den HP-IB-Bus in den Prozeßrechner transferiert. Bei diesem Meßprinzip ist der Transientenrecorder nicht erforderlich; alle anderen Komponenten sind identisch. Die Meßwertausgabe erfolgt nach einer Zwischenspeicherung auf einem Bildschirm oder einem Drucker.

3.2 Grundlagen der Ultraschallausbreitung in polykristallinen Werkstoffen

Eine Ultraschallwelle soll sich in einem polykristallinen Prüfgegenstand ausbreiten, der sehr groß in Bezug zur Wellenlänge λ ist, z.B. 500 x 500 x 500 mm. Für die Amplitude A dieser Ultraschallwelle als Funktion des Laufweges x kann dann geschrieben werden

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-\kappa x} \cdot F(x) \quad (29)$$

wobei κ die werkstoffabhängige Schwächung beschreibt und $F(x)$ die Schallausbreitungsverluste (siehe Abb. 8, S. 13). Für den in Kap. 2.2.1 besprochenen Fall der Rayleigh-Streuung gilt für den Schwächungskoeffizienten κ gemäß den Gln. (3) und (4), S. 7, 8 sowie den Gln. (6) und (7), S. 9

$$\kappa = a_1 \cdot f + a_4 \cdot f^4 \quad (30)$$

mit a_1 als Absorptions- und a_4 als Streukonstanten. Werden zunächst die frequenzabhängigen Größen Schallausbreitungsverlust sowie Absorption vernachlässigt (a_1 ist im Bereich der Rayleigh-Streuung, z.B. $D/\lambda = 0.1$, bei den meisten Metallen viel kleiner als a_4), so reduziert sich Gl. (29) zu

$$A(x) = A_0 \cdot e^{-a_4 \cdot x \cdot f^4} \quad (31)$$

Bei konstanter Korngröße, die in a_4 enthalten ist (Gln.(6) und (7), S. 9), nimmt die Amplitude einer Ultraschallwelle daher mit der 4. Potenz der Frequenz ab.

Die experimentelle Verifikation dieser Gleichung kann besonders elegant mit Hilfe handelsüblicher Prüfköpfe durchgeführt werden, die hochbedämpft sind und daher einen kurzen Impuls mit hoher Frequenzbandbreite aussenden. Die Abb. 17 zeigt am Beispiel des verwendeten 10 MHz-Prüfkopfes, daß im zugehörigen Ultraschallimpuls Frequenzen von ca. 1 MHz - 16 MHz enthalten sind (bei 20 dB-Abfall vom Maximum).

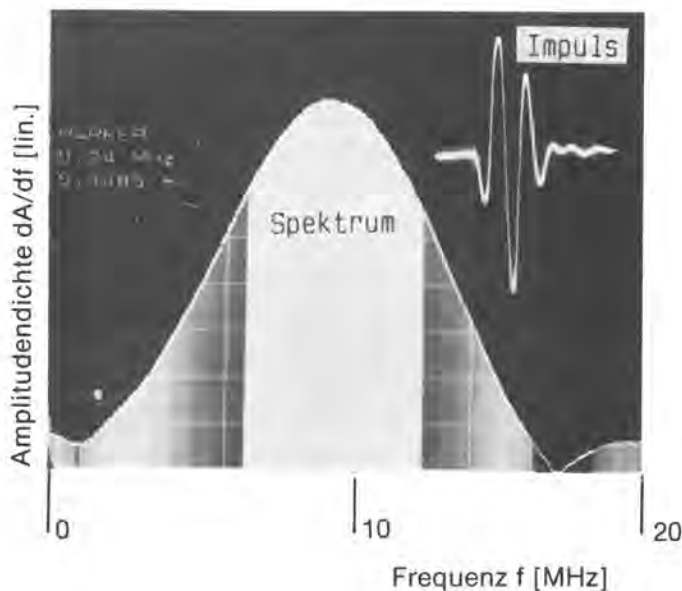


Abb. 17:
Gemessener
Ultraschallimpuls
(Rückwandecho an einem
Quarzblock) eines
10 MHz-Prüfkopfes mit
zugehörigem Amplituden-
spektrum

Der Ultraschallimpuls wird wegen der Frequenzabhängigkeit der Streuung mit zunehmendem Schallaufweg zu niedrigen Frequenzen hin verzerrt. Die Kurven

$$A(f) = A_0 \cdot e^{-a_4 \cdot x \cdot f^4} \quad (32)$$

beschreiben diesen Sachverhalt und stellen die Übertragungsfunktionen des Werkstoffs für den jeweiligen Schallaufweg x dar /56/. Nach dieser Gl. berechnete Übertragungsfunktionen sowie die sich daraus ergebenden Impulsverzerrungen sind in Abb. 18 dargestellt.

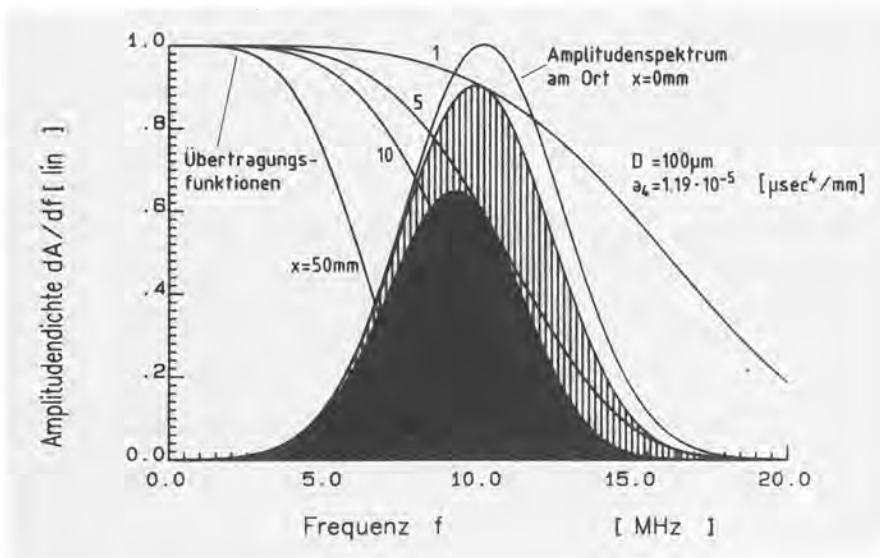


Abb. 18: Berechnete laufwegabhängige Übertragungsfunktionen für einen Stahl der Korngröße 100 μm bei einer einfallenden Longitudinalwelle. Resultierende Verzerrung eines Ultraschallimpulses.

Eine Korngröße von $D = 100 \mu\text{m}$ ergibt dabei nach Gl. (6) einen a_4 -Wert von $a_4 = 1.19 \cdot 10^5 (\mu\text{sec}^4/\text{mm})$ für eine Longitudinalwelle. (Für eine Transversalwelle gilt ein identischer Formalismus, nach Gl. (7) ergeben sich jedoch andere a_4 -Werte.)

Der Amplitudenabfall für unterschiedliche Frequenzen kann nun mit Hilfe des in der Abb. 16, S. 25, dargestellten Aufbaus gemessen werden, der als wesentlichen Bestandteil eine Torschaltung zum Ausblenden des interessierenden Signals enthält sowie einen analogen Spektrumanalysator /57, 58/. Abb. 19 zeigt den am Ultraschallimpuls eines 10 MHz-Prüfkopfs gemessenen Amplitudenabfall von unterschiedlichen Frequenzanteilen in einem austenitischen Stahl der Korngröße $D \approx 100 \mu\text{m}$ für eingeschaltete Longitudinal- und Transversalwellen. Die Kurven sind auf einen gemeinsamen Anfangspunkt normiert. Die Divergenzverluste für die jeweils betrachtete Frequenz wurden nach der in /33/ angegebenen Methode korrigiert.

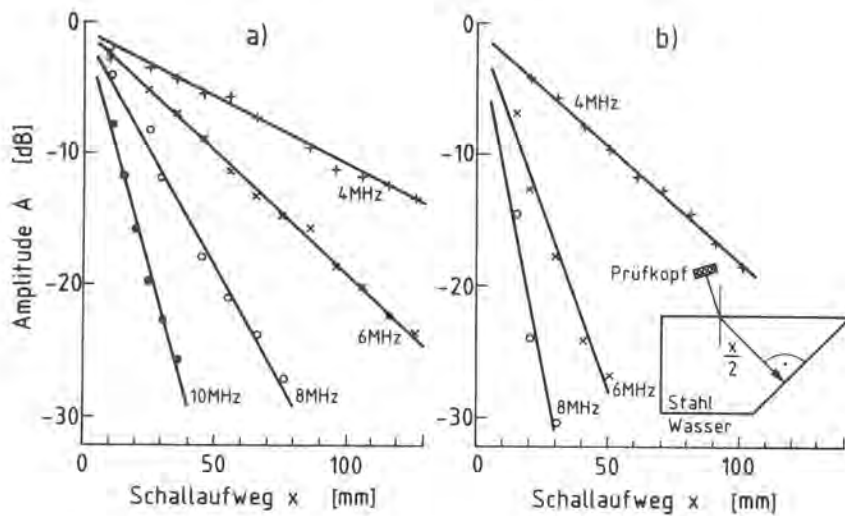


Abb. 19:

Gemessene Amplituden der unterschiedlichen Frequenzanteile eines Rückwandechos als Funktion des Schallaufweges x
 a = Longitudinalwelle, b = Transversalwelle (nach /57/)

Nach den Gln. (6) und (7), S. 9, müssen sich für den Amplitudenabfall der Longitudinal- und Transversalwelle gleiche Steigungen ergeben, wenn die Frequenz der Longitudinalwelle 1.5 mal so groß ist wie die der Transversalwelle. Dazu wird $\kappa_S^L = \kappa_S^T$ aus den Gln. (6) und (7) angesetzt:

$$\frac{8f_L^4}{c_L^3} = \frac{6f_T^4}{c_T^3} \quad (33)$$

Mit $c_L = 5.8 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ und $c_T = 3.05 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ für Austenit ergibt sich:

$$f_L = 1.51 \cdot f_T \quad (34)$$

Am Beispiel der 6 MHz-Longitudinalwelle und der 4 MHz-Transversalwelle aus der Abb. 19 läßt sich dies tatsächlich sehr gut bestätigen.

Nach der Betrachtung der Schwächung der einfallenden Ultraschallwelle soll nun auf die in den unterschiedlichen Tiefen des Werkstücks entstehenden Streuwellen eingegangen werden. Der Ultraschallimpuls wird mit zunehmendem Laufweg niederfrequenter (Abb. 18). Daher sollte auch der bei größeren Laufwegen gestreute Ultraschall niederfrequenter sein als der aus dem oberflächennahen Bereich stammende. Dies konnte ebenfalls mit dem in Abb. 16 dargestellten Meßaufbau nachgewiesen werden /57, 58/. Bei der Messung wurde allerdings mit zwei örtlich getrennten Prüfköpfen in Sende/Empfangstechnik gearbeitet. Wie in Abb. 20 dargestellt, wurde mit dem Sendeprüfkopf unter Ausnutzung des Snelliusschen Brechungsgesetzes so in das Werkstück eingeschallt, daß die Amplitude der seitwärts (nach links) gestreuten Wellen gemessen werden konnte, die durch einfallende Longitudinal- oder Transversalwelle entstanden sind. Die zeitliche Lage des Tores zur Amplitudenmessung wurde entsprechend dem Kreuzungsbereich der beiden Schallfelder gewählt. Der Schallaufweg x wurde durch Verschieben des Empfängerprüfkopfes eingestellt. Für den jeweils betrachteten Schallaufweg x mußte zusätzlich eine Ortsmittlung durchgeführt werden, da ein einzelner Streuamplitudenwert keine zuverlässige Größe darstellt (siehe auch Kap. 5.4, z.B. Abbn. 67 und 68, S. 91 und 92). Dazu wurden beide Prüfköpfe gemeinsam in der Richtung senkrecht zu der in Abb. 20 dargestellten Ebene verschoben und dabei 20 Amplitudenspektren aus dem Kreuzungsbereich aufgenommen und gemittelt.

In der Abb. 20 ist die Amplitude der unterschiedlichen Frequenzanteile der empfangenen Seitwärtsstreuung als Funktion des Schallaufweges dargestellt. Es ergibt sich, daß das Ultraschallstreusignal in gleicher Weise durch das Übertragungsverhalten des Werkstoffes (Tiefpaß) beeinflusst wird, wie das Ultraschallsignal selbst (Abb. 19).

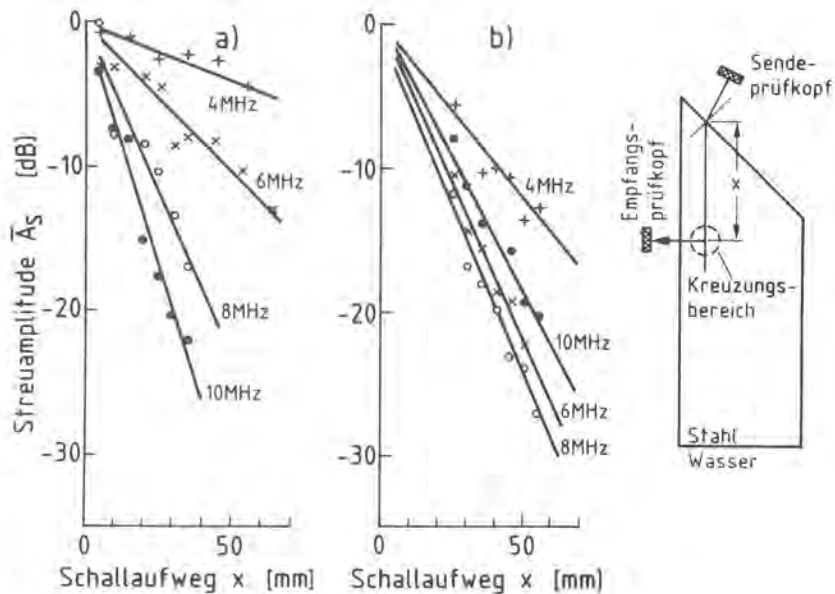


Abb. 20: Messung der Amplitude der unterschiedlichen Frequenzanteile eines Streusignals als Funktion des Schallaufweges x ; durch räumliches Verschieben des Empfängerprüfkopfes realisiert (nach /57/)

a = Longitudinalwelle
b = Transversalwelle

Im Falle der Longitudinalwelle ist die Übereinstimmung mit dem Meßergebnis aus der Abb. 19 (Amplitudenabfall der einfallenden Welle) sehr gut, bei der Transversalwelle allerdings nur beim 4 und 6 MHz-Anteil. Das liegt daran, daß für die 8 MHz-Transversalwelle das D/λ -Verhältnis bereits $D/\lambda=0.25$ wird, so daß man hier an der Grenze des Rayleighschen Streubereichs ist.

Diese eben getroffene Feststellung erscheint zunächst trivial: Der einfallende Ultraschallimpuls verändert auf seinem Laufweg durch den Werkstoff kontinuierlich seine spektrale Zusammensetzung, wobei dann die am jeweiligen Ort x angeregten Streuwellen eine identische spektrale Zusammensetzung wie der einfallende Impuls haben. Dies ist noch einmal in der Abb. 21 schematisch dargestellt:

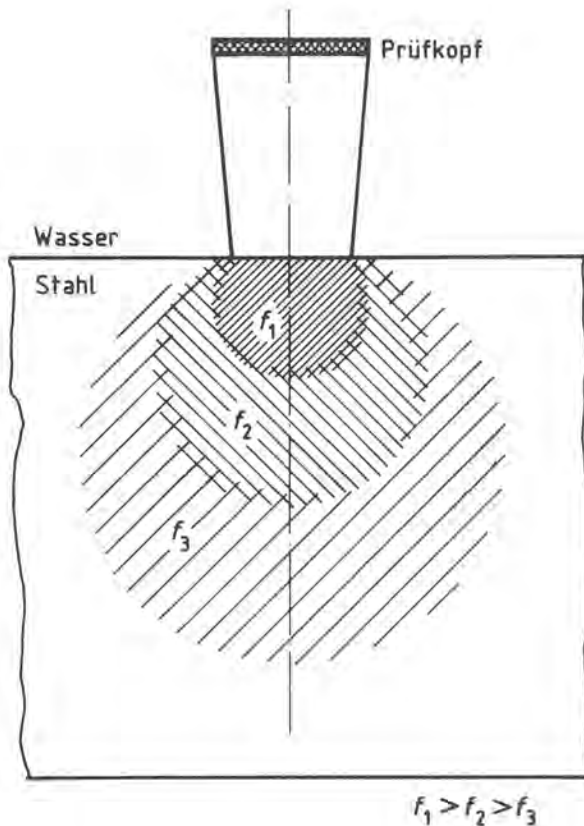


Abb. 21:
Ausbreitung des gestreuten
Ultraschalls für unter-
schiedliche Frequenzen
(schematisch)
(nach /57/)

Der gestreute Ultraschall aus den Werkstückbereichen in der Nähe des Prüfkopfes ist also hochfrequenter als der aus größeren Tiefen stammende; bzw. bei Streuungsmessungen mit niedrigen Frequenzen empfängt man rückgestreuten Ultraschall aus größeren Tiefen, mit höheren Frequenzen nur aus dem oberflächennahen Bereich. Der eben beschriebene experimentelle Nachweis dieser Tatsache sollte geführt werden, um Streuungsmessungen besser interpretieren zu können, die an austenitischen Grobblechen durchgeführt wurden und nun diskutiert werden sollen.

3.3 Rückstreuung von Transversalwellen in Grobblechen

3.3.1 Vorbetrachtungen

Nach DIN 1541 haben Feinbleche Dicken $d < 3$ mm und nach DIN 1543 Grobbleche Dicken $d > 4,75$ mm. Für die Ultraschallprüftechnik sollten die Begriffe Grobblech und Feinblech zusätzlich auf die Ultraschallwellenlänge bezogen sein. Wird z.B. in ein austenitisches Grobblech der Dicke $d = 5$ mm mit einer Prüffrequenz von $f = 500$ kHz so eingeschallt, daß sich unter einem Winkel von $\beta = 45^\circ$ eine Transversalwelle ausbreiten sollte, so beträgt die Ultraschallwellenlänge

$\lambda = c/f = 6.1 \text{ mm}$ bei einer Weglänge zwischen beiden Oberflächen $x = d/\cos\beta = 7.1 \text{ mm}$ (Abb. 22). In diesem Fall entstehen wegen der Schwingungsbehinderungen an den Grenzflächen keine Transversalwellen mehr, sondern die viel komplizierteren Plattenwellen (Plattenwellendiagramm in /28/, S. 621); daher liegt ultraschalltechnisch eigentlich ein "Feinblech" vor. Wird dagegen eine Frequenz von $f = 25 \text{ MHz}$ verwendet, so ist die Wellenlänge λ nur noch $\lambda = 0.125 \text{ mm}$ und viel kleiner als die Weglänge zwischen den Oberflächen, so daß sich ungehindert freie Raumwellen ausbreiten können und der Begriff "Grobblech" auch ultraschalltechnisch gerechtfertigt ist.

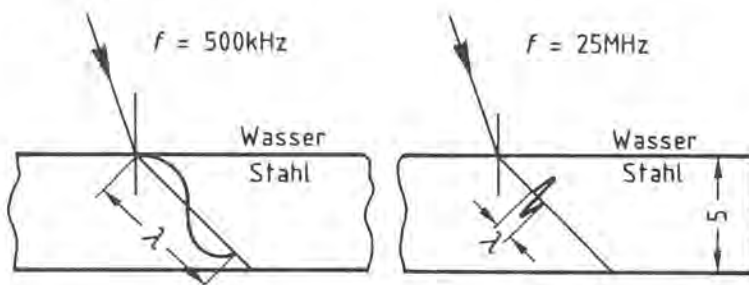


Abb. 22:

Schematische Darstellung der Größenverhältnisse zwischen Blechdicke und Ultraschallwellenlänge bei der Blechprüfung für 2 unterschiedliche Frequenzen

3.3.2 Streuungsmessungen an Grobblechen

Es soll nun auf die in Kap. 2.2.3 beschriebenen Streuungsmessung mit Transversalwellen nach /48, 49/ näher eingegangen und diskutiert werden, ob diese auch zur Korngrößenbestimmung in Feinblechen benutzt werden kann. In Abb. 11, S.17, wird in der schematischen Darstellung dieses Verfahrens gezeigt, daß das Rückstreusignal ein "Störecho" von der Probenunterseite aufweist /48/. Auch bei den in der Abb. 12 b, S.18, dargestellten Streukurven, die an Grobblechen erhalten wurden, sind diese Störechos in äquidistanten Abständen zu erkennen /19/; sie wurden auch bei eigenen Messungen beobachtet /59/.

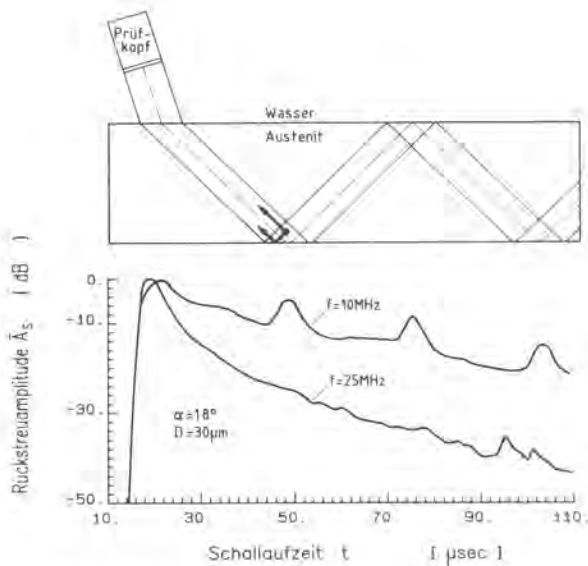


Abb. 23: Gemessene Streusignale $\bar{A}_S(t)$ von Transversalwellen in Grobblechen für zwei unterschiedliche Frequenzen mit schematischer Darstellung der Schallausbreitung (nach /59/)

Die Abb. 23 zeigt, daß bei der niedrigeren Frequenz von 10 MHz (D/λ -Verhältnis = 0.10) die Maxima der Rückstreumplituden bei solchen Schallaufzeiten auftreten, die man der Probenoberseite oder -unterseite zuordnen kann, also in dem Bereich, in dem das Schallbündel gespiegelt wird. Folgende experimentelle Randbedingungen sind bei diesen Rückstremessungen meist gegeben:

- Das Schallbündel ist angenähert parallel
- Der Ultraschallprüfkopf kann nur solche Ultraschallwellen empfangen, die ihn senkrecht treffen, also Schallwellen, die sich in der entgegengesetzten Richtung des ausgesendeten Impulses ausbreiten.
- Nach /19/ breiten sich die gestreuten Schallwellen im Prüfobjekt in alle Raumrichtungen aus.

Unter diesen Voraussetzungen können die Körner im Überschneidungsbereich des Schallbündels zweimal zum Prüfkopf zurückstreuen:

- a) Rückwärtsstreuung unter zweimaliger Ausnutzung der Reflexion (Hin- und Rückweg) an der Grenzfläche
- b) Seitwärtsstreuung unter nur einmaliger Ausnutzung der Reflexion (Hin- oder Rückweg)

So erklärt sich auch, daß die Maxima immer 6 dB (d.h. um den Faktor 2) über der eigentlichen erwarteten Streuamplitude liegen, wo außerhalb des Überschneidungsbereichs nur die Rückwärtsstreuung empfangen wird:

Nur durch die Existenz der spiegelnden Grenzfläche kann im Überschneidungsbereich der Schallbündel die Seitwärtsstreuung einen zusätzlichen Anteil zur Amplitude des empfangenen Rückstreusignals liefern. Für den in Abb. 23 dargestellten Fall des Einschallwinkels von $\beta = 45^\circ$ kann aus der 6 dB Amplitudenerhöhung geschlossen werden, daß die Streuanteile der 90° -Seitwärts- und der Rückstreuung gleich groß sind.

Das mit 25 MHz erhaltene Rückstreusignal in der Abb. 23 weist keine Maxima mehr auf. Bei dem größerem D/λ -Verhältnis von $D/\lambda = 0.25$ (obere Grenze des Rayleighschen Streubereiches) kommt die empfangene Rückstreuung hauptsächlich nur noch vom oberflächennahen Bereich, wie im vorigen Kapitel 3.2 dargestellt.

Werden Streuungsmessungen jedoch im Bereich der Rayleigh-Streuung durchgeführt, so kommt der empfangene Ultraschall aus größeren Tiefen, und die charakteristischen Maxima treten auf. Mit abnehmender Probendicke d rücken diese immer näher zusammen, so daß die Messung des Abfalls der Rückstreuamplitude mit der Laufzeit (Steigung) zur Korngrößenbestimmung schwieriger wird und schließlich nicht mehr möglich ist. Als untere Blechdickengrenze, bei der die Korngrößenbestimmung durch Messung des Abfalls der Rückstreuamplitude als noch möglich angesehen wird, wird mit Berücksichtigung der Impulslänge Δ eine Dicke von $d \approx 10$ mm angegeben /19, 52/. Eigene Untersuchungen über die Rückstreuung von Transversalwellen an dünneren Blechen /25, 60/ haben außerdem gezeigt, daß im Amplitudenspektrum der

Rückstreusignale von Transversalwellen Maxima und Minima auftreten, die von Blechdicke d und Einschallwinkel β abhängen (Abb. 24). Diese rühren von Interferenzerscheinungen aufgrund stehender Ultraschallwellen im Blech her. Die Länge des Zeitfensters Δt betrug bei der Messung $20 \mu\text{sec}$. Die Auswertung des Ultraschallrückstreusignals zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung wird durch dieses überlagerte Interferenzmuster so erschwert, (sowohl im Zeitbereich $\bar{A}_S(t)$ als auch im Frequenzbereich $d\bar{A}_S/df(f)$), daß der Rückstreueamplitudenverlauf $\bar{A}_S(t)$ von Transversalwellen zur Korngrößenbestimmung an Feinblechen praktisch nicht verwendet werden kann.

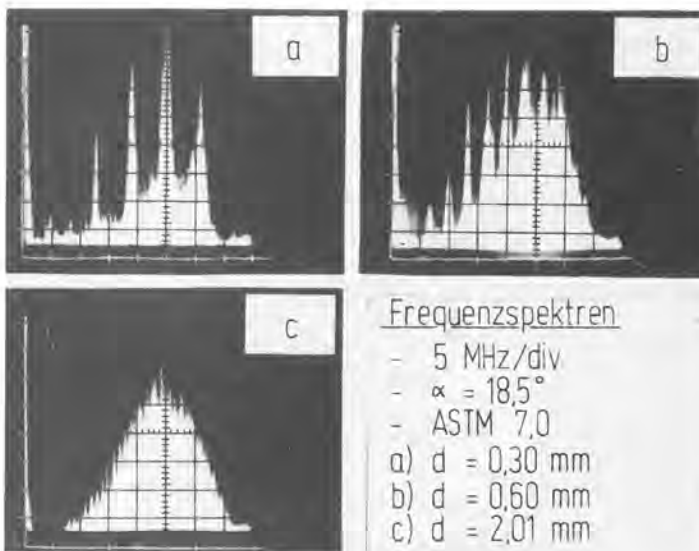


Abb. 24: Gemessene Amplitudenspektren der Rückstreusignale von Feinblechen unterschiedlicher Dicke beim Einschallwinkel $\beta = 45^\circ$

Mit Hilfe der Rückstreuung direkt eingeschallter Transversalwellen - und auch Longitudinalwellen, für welche dieselben Überlegungen gelten - kann also eine zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung in Feinblechen nicht durchgeführt werden. Die störenden Interferenzerscheinungen dürften jedoch

weitgehend unterdrückt werden, wenn die sich im Feinblech ausbreitenden Raumwellen (Transversal- und Longitudinalwellen) keine besondere Vorzugsorientierung haben und somit stehende Wellen vermieden werden. Dies kann durch die Anregung einer Rayleighschen Oberflächenwelle erreicht werden: Durch Streuung der Oberflächenwellen an diskreten Reflektoren (Nuten, Kerben) entstehen nämlich freie Raumwellen (d.h. Transversal- und Longitudinalwellen). Für beide Wellentypen wurden dazu in /61, 62/ die Richtcharakteristiken der Schallabstrahlung berechnet. Die Streuung einer Oberflächenwelle im zufällig orientierten polykristallinen Oberflächengefüge sollte ebenfalls zur Abstrahlung freier Raumwellen in das Blechinnere führen, allerdings ohne besondere Vorzugsrichtung. Im folgenden soll diese Möglichkeit der Erzeugung von Raumwellen näher untersucht werden. Dazu wird zunächst auf die Anregung von Ultraschallwellen in der Umgebung des kritischen Winkels α_k eingegangen (Erzeugung Rayleighscher Oberflächenwellen), und zwar für den Fall, daß sich der Prüfgegenstand völlig unter Wasser befindet.

3.4 Ausbreitung gestreuten Ultraschalls, vor allem bei Anregung in der Umgebung des kritischen Winkels

In Kap. 2.2.3 wurde bereits auf die Möglichkeit der Korngrößenbestimmung im Oberflächengefüge durch freie Rayleighsche Oberflächenwellen eingegangen. Diese werden durch einen Ultraschallwinkelprüfkopf mit einem Plexiglaskeil angeregt, wobei sich der Keilwinkel (Einfallswinkel α) aus der Gl.(24) berechnet. In der Ultraschallprüfung auf Materialfehler werden Oberflächenwellen kaum angewendet, da sie sehr stark durch Schmutz, Öl oder Ablagerungen bedämpft werden. Bei Anregung in Tauchtechnik, d.h. unter Wasser, bilden sich ebenfalls keine freien Oberflächenwellen aus, da die Oberflächenwelle durch das auf der Grenzfläche lastende Wasser dadurch bedämpft wird, daß laufend Schallwellen in das Wasser abgestrahlt werden

(Abb. 25). Nach /63/ steigt diese Dämpfung linear mit der Frequenz an, weil der in das Wasser abgestrahlte Anteil (Amplitude) pro Wellenlänge konstant ist. Eine Oberflächenwelle von 25 MHz hat daher nur noch eine Reichweite von wenigen mm .

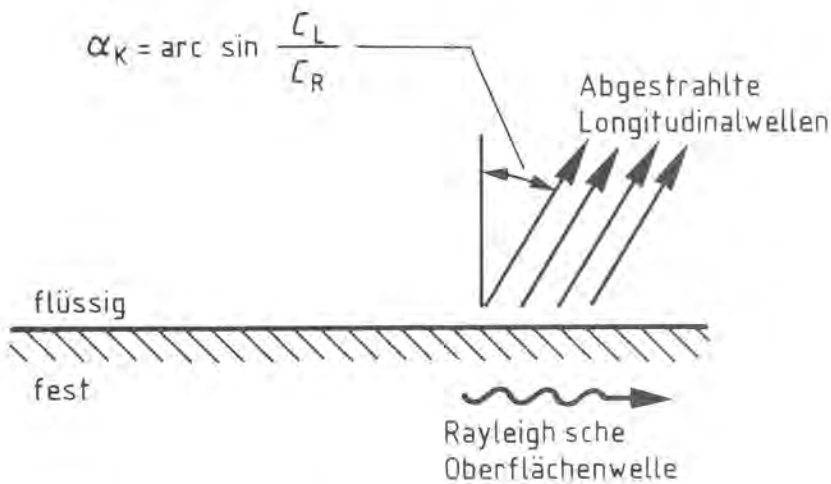


Abb. 25:
Dämpfung einer
Rayleighschen
Oberflächenwelle
durch Wasser
(nach /63/)

Die Beschreibung der Anregung von Rayleighschen Oberflächenwellen und deren Dämpfung durch Abstrahlung in das Wasser ist Gegenstand zahlreicher Arbeiten, von denen nur einige genannt sein sollen /64-76/. Diese Literatur ist unter dem Begriff "critical-angle reflectivity" zusammengefaßt, wobei sich der kritische Winkel α_k aus der Gl.(24), S. 20 berechnet, allerdings mit c_L als Schallgeschwindigkeit in Wasser. Die Abb. 26 zeigt schematisch, wie sich die Schalldruckverteilung $A_E(X_E)$ eines begrenzten einfallenden Schallbündels nach der Reflexion an der flüssig/fest-Grenzfläche beim kritischen Winkel verändert hat. Die empfangene Schalldruckverteilung $A_R(X_R)$ weist deutliche Minima auf, die aus der Interferenz der direkt reflektierten Schallwelle und der von der Oberfläche abgestrahlten resultieren. Dieses Phänomen wird in der Literatur "leaky wave" genannt. Abb. 26 zeigt auch deren experimentelle Bestätigung anhand schlierenoptischer Aufnahmen.

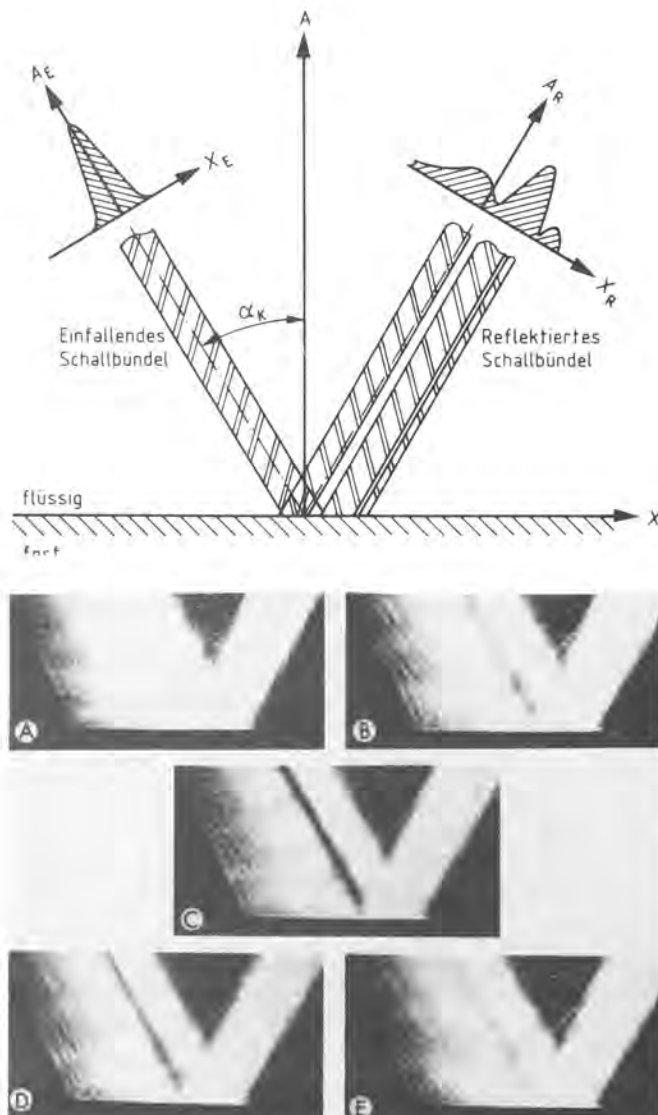


Abb. 26:

Schalldruckverteilung der einfallenden und reflektierten Welle beim kritischen Winkel α_k schematische Darstellung (nach /64/, schlierenoptische Darstellung nach /67/)

A: $\alpha = \alpha_k - 1^\circ$

B: $\alpha = \alpha_k - 0.5^\circ$

C: $\alpha = \alpha_k$

D: $\alpha = \alpha_k + 0.5^\circ$

E: $\alpha = \alpha_k + 1.0^\circ$

Hinweis: In den Schlierenbildern kommt das einfallende Schallbündel von rechts.

Mit einem besonders wichtigen Teilaspekt der "critical-angle reflectivity" haben sich vor allem Becker und Richardson /66, 69/, Mott /70/ sowie Ngoc und Mayer /67, 68/ auseinandergesetzt: Der Reflexionsfaktor R an einer Grenzfläche bei senkrechtem Einfall berechnet sich nach Gl. (35) aus den Wellenwiderständen W_2 und W_1 der beiden Medien. Für Wasser/Stahl ist bei einem Einfallswinkel $\alpha = 0^\circ$ der Reflexionsfaktor $R = 0.935$, d.h. 93.5% des einfallenden Schalldrucks werden reflektiert. Dieser Wert ändert sich für andere Einfallswinkel $0 < \alpha < \alpha_k$ kaum.

$$R = \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} \quad (35)$$

Die Abb. 27 zeigt, daß der Reflexionsfaktor R beim kritischen Winkel α_k plötzlich ein deutliches Minimum aufweist und fast zu Null wird. Das bedeutet, daß bei diesem Winkel der einfallende Schalldruck fast ausschließlich in die Rayleighsche Oberflächenwelle übergeht. Für einen schallstreuenden Werkstoff, z.B. im Bereich der Rayleigh-Streuung, muß dies beim kritischen Winkel α_k auch zu einer maximalen Amplitude der vom Gefüge rückgestreuten Schallwellen führen, wobei eine Proportionalität $\bar{A}_s \sim (1-R)$ vorliegen dürfte.

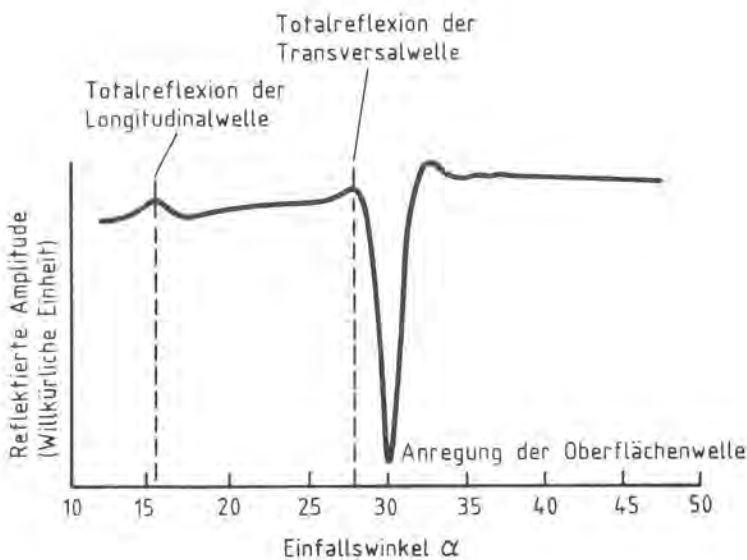
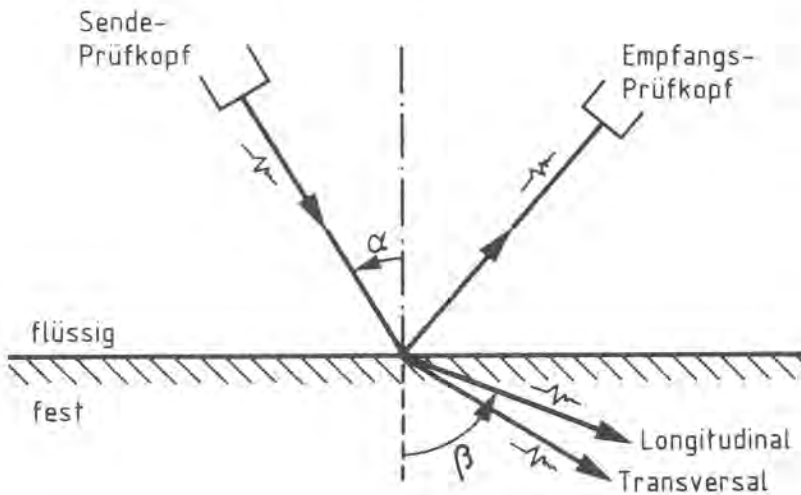


Abb. 27:

Gemessenes Minimum des Reflexionsfaktors R beim kritischen Winkel α_k . Messanordnung mit einem Ultraschallgoniometer (nach /77/)



Um dies zu bestätigen, wurden die mit einem 25 MHz-Prüfkopf erzeugten Rückstreusignale von einem austenitischen Feinblech der Korngröße $D=23 \mu\text{m}$ ($D/\lambda=0.19$) bei den Einfallswinkeln $\alpha=18^\circ$, $\alpha=29^\circ$ und $\alpha_K=31.5^\circ$ auf einem Oszilloskop dargestellt.

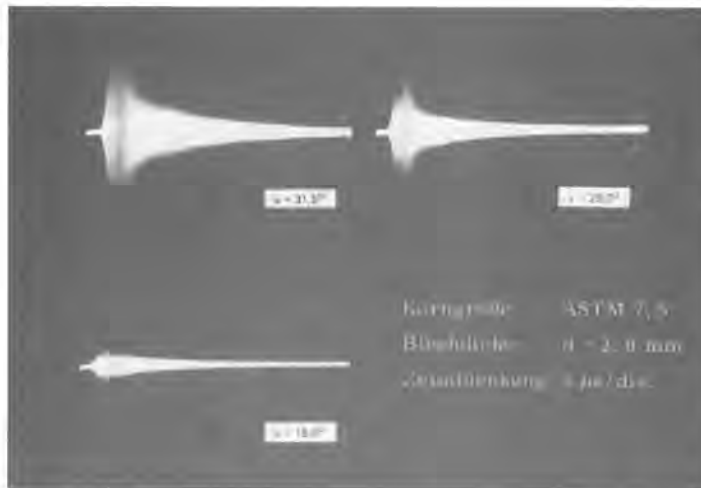


Abb. 28:

Gemessene Rückstreusignale eines austenitischen Feinbleches bei 3 unterschiedlichen Einfallswinkeln (Bleche befinden sich völlig unter Wasser)

Die Abb. 28 zeigt, daß die maximale Streuamplitude A_S im Falle des kritischen Einfallswinkels α_K ca. um den Faktor 5 größer ist als bei $\alpha=18^\circ$. Auf die besondere Struktur des Rückstreusignals beim kritischen Winkel wird im nächsten Kapitel eingegangen. Die Abhängigkeit der maximalen Streuamplitude \bar{A}_S vom Einfallswinkel α wurde zusätzlich an einem austenitischen Testblock (300x100x50 mm) mit dem in der Abb. 14, S. 23 dargestellten Meßaufbau gemessen.

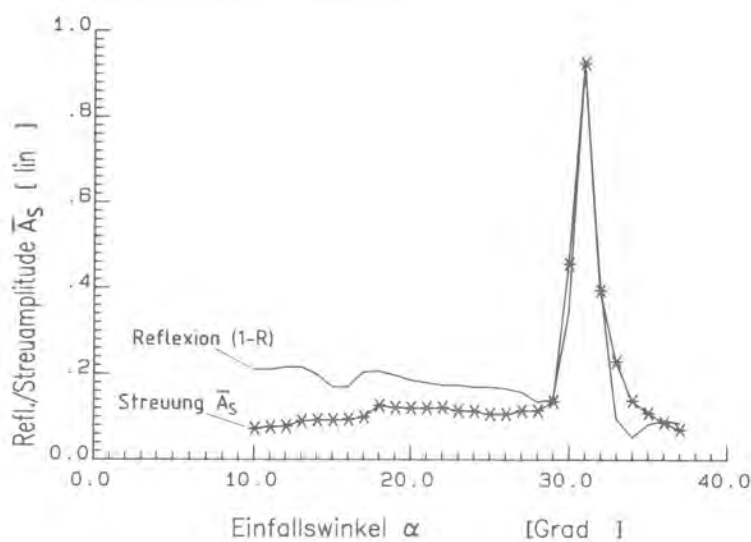


Abb. 29:

Gemessene Abhängigkeit der Rückstreumplitude \bar{A}_S vom Einfallswinkel α , gemessen an einem austenitischen Testblock, Korngröße $D = 100 \mu\text{m}$ Frequenz $f = 5 \text{ MHz}$ Der Kurvenzug "Reflexion" ist zum Vergleich als (1-R) aus der Abb. 27 übertragen worden.

Die Abb. 29 zeigt das deutliche Maximum der Streuamplitude bei $\alpha_k = 31^\circ$. Zusätzlich wurde in dieser Abb. der Verlauf des Reflexionsfaktors R über dem Einfallswinkel α aus der Abb. 27 eingetragen, allerdings als Wert $(1-R)$. Die Übereinstimmung der beiden Kurven, vor allem im Bereich von α_k , ist sehr gut. Es sei an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, daß bei unterschiedlichen Blechen oder Blöcken die kritischen Winkel α_k für Wasser/Austenit zwischen $30^\circ \leq \alpha_k \leq 32^\circ$ schwanken können (siehe Abb. 73, S. 98 in Kap. 5.4.3). Abhängig von den zulässigen Gehalten der Legierungselemente können für verschiedene Schmelzen die Schallgeschwindigkeiten c_L , c_T und c_R leicht differieren. Dies führt dann nach Gl. (24), S. 20 auch zu unterschiedlichen kritischen Winkeln α_k .

Eine Methode zur Berechnung von R stellen Becker und Richardson vor /66, 69/, wobei R lediglich aus dem Einfallswinkel α , den Dichten ρ und den Schallgeschwindigkeiten c der beteiligten Medien berechnet wird. Für Einfallswinkel, die größer sind als der Winkel der Totalreflexion der Transversalwelle (Gl.(27), S. 21), muß jedoch eine komplexe Schallgeschwindigkeit eingeführt werden. Deren imaginäres Glied enthält nun den Schallschwächungskoeffizienten κ im Werkstoff, so daß der Wert des Reflexionsfaktors R beim kritischen Winkel vom Werkstoff und somit auch von der Korngröße abhängen sollte. Dies soll nun kurz diskutiert werden. Die Abb. 30 zeigt die berechneten Reflexionsfaktoren R in der Umgebung des kritischen Winkels für 5 unterschiedliche Schwächungskoeffizienten κ^T für Transversalwellen.

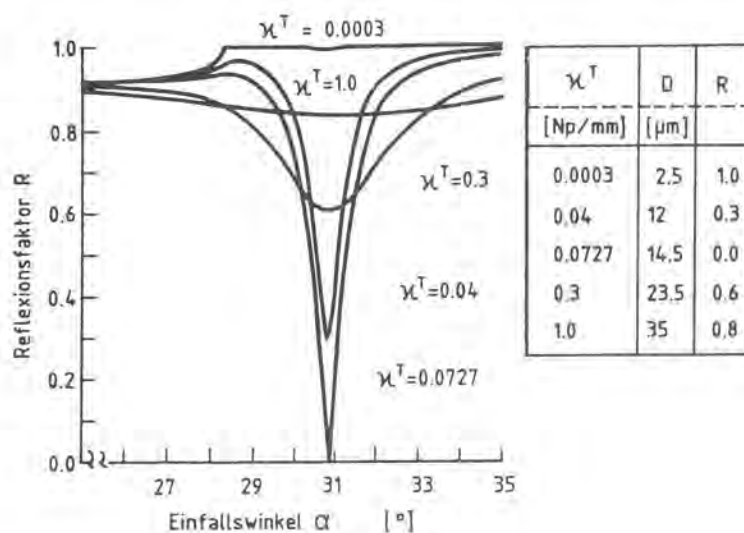


Abb. 30:
Berechnete Abhängigkeit der reflektierten Schallamplitude vom Einfallswinkel α in der Umgebung des kritischen Winkels α_k für unterschiedliche Schwächungskoeffizienten (nach /69/)

Es sollen nun nur die Reflexionsfaktoren beim kritischen Winkel α_K betrachtet werden:
 Bei $\kappa^T = 0.0727 \text{ Np/mm}$ ist der Reflexionsfaktor R am kleinsten. Für eine Prüffrequenz von $f = 25 \text{ MHz}$ errechnet sich daraus unter Vernachlässigung der Absorption nach Gl. (7), S. 9 eine Korngröße von $D = 14.5 \text{ }\mu\text{m}$. Bei dieser Korngröße sollte also gemäß $\bar{A}_S \sim (1-R)$ ein Maximum der Rückstreuamplitude vorliegen, wenn beim kritischen Winkel eingeschallt wird. Die aus den anderen κ^T -Werten zurückgerechneten Korngrößenwerte sind in der Tabelle in Abb. 30 aufgeführt, ebenso die zugehörigen Werte des Reflexionsfaktors R . In der Abb. 31 sind nun die Werte $(1-R)$ - proportional der Ultraschallrückstreuamplitude - vom kritischen Winkel aus der Abb. 30 über der Korngröße D aufgetragen.

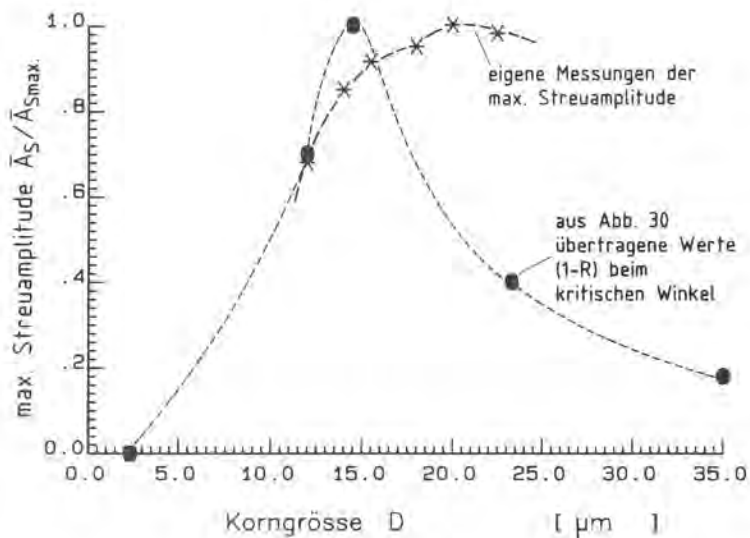


Abb. 31: Vergleich der in /69/ errechneten Abhängigkeit der maximalen Rückstreuamplitude von der Korngröße beim kritischen Winkel mit eigenen Messungen an dünnen Feinblechen ($d = 1 \text{ mm}$, Messung und Rechnung für 25 MHz)

Die berechnete Streuamplitude steigt danach bis zu $D = 14.5 \text{ }\mu\text{m}$ an und fällt dann wieder ab. Die experimentelle Verifikation dieses Sachverhaltes an austenitischen Feinblechen ist für sehr

kleine Korngrößen nicht durchführbar, da diese in der Praxis kaum feiner als $D \approx 9 \mu\text{m}$ auskristallisieren können. Daher beschränkt sich das Probenmaterial auf 6 Bleche im Bereich $12 < D[\mu\text{m}] < 23$. Die Streuamplitude \bar{A}_S im Maximum der empfangenen Rückstreusignale (mit der in Abb. 14 dargestellten Apparatur gemessen) beim kritischen Winkel stimmen schlecht mit den aus /69/ berechneten Werten überein und zeigen lediglich einen leichten Anstieg der Werte bis ca. $D = 20 \mu\text{m}$.

Der von Becker und Richardson vorhergesagte Effekt der Abhängigkeit des Reflexionsfaktors R von der Korngröße trifft für den hier interessierenden Korngrößenbereich anscheinend nicht zu. Dabei ist nicht sichergestellt, ob die für einen unendlichen Halbraum durchgeführten Berechnungen auch für dünne Feinbleche gelten. Die Abhängigkeit der maximalen Rückstreuamplitude \bar{A}_S vom Einfallswinkel α war für diese Bleche jedoch identisch mit der in der Abb. 29 an einem großen Block ($D=100\mu\text{m}$, $f=5\text{MHz}$) gemessenen.

Es muß nun nachgeprüft werden, ob die beim kritischen Winkel erzeugte Oberflächenwelle nicht nur zum Prüfkopf zurück streut (Abbn. 28, 29), sondern auch in das Werkstückinnere hinein. Dazu wurde der austenitische Stahlblock ($D=100\mu\text{m}$), wie in der Abb. 32 dargestellt, mit einem 5 MHz-Prüfkopf beim kritischen Winkel α_k beschallt und mit einem zweiten 5 MHz-Prüfkopf der gestreute Ultraschall empfangen. Wie bei den in Kap. 3.2 beschriebenen Messungen (Abb. 20, S. 31) mußte auch dazu durch Parallelverschiebung beider Prüfköpfe eine Ortsmittlung durchgeführt werden.

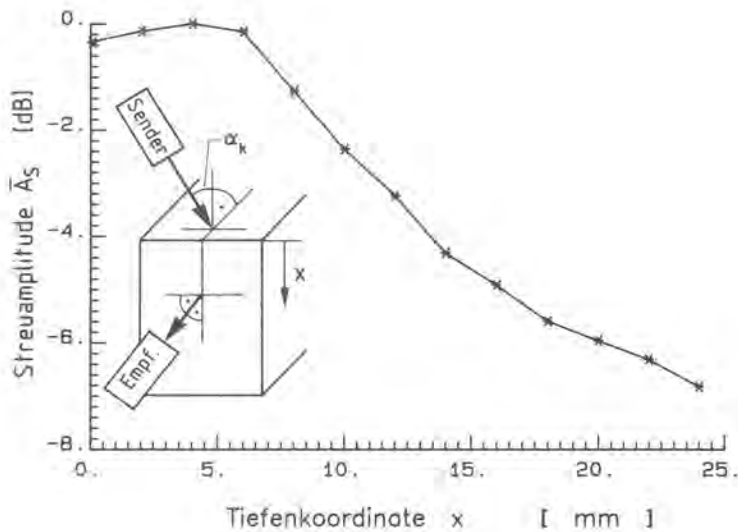


Abb. 32: Abfall der gemessenen Streuamplitude \bar{A}_S über der Tiefenkoordinate x , wenn mit $\alpha = \alpha_k = 31^\circ$ in einen austenitischen Stahlblock eingeschallt wird

Die Abb. 32 zeigt, daß tatsächlich noch in Tiefen $x > 20$ mm vom Gefüge gestreuter Ultraschall empfangen werden kann, obwohl so eingeschallt wurde, daß nur eine Oberflächenwelle erzeugt wurde. (Das Plateau am Anfang der Kurve hat seine Ursache in der Schallfeldcharakteristik des empfangenden Prüfkopfes; bei $x=0$ liegt die akustische Achse, erst bei $x=6$ mm empfängt der Prüfkopf mit dem gesamten Schallbündel). Daraus ergibt sich das in Abb. 33 dargestellte Modell: Die Rayleighsche Oberflächenwelle wird im Oberflächengefüge gestreut, so daß Schallwellen in das Werkstückinnere gelangen (wie auf S. 37 postuliert). Diese werden wiederum im Volumengefüge gestreut, wobei die Seitwärtsstreuung empfangen werden kann, wie in Abb. 32 dargestellt. Ob bei einer Rückstreuung mit einem Prüfkopf diese "Volumenstreuung" empfangen werden kann, und ob eine Vorzugsorientierung dieser gestreuten Schallwellen vorliegt, wird in Kap. 3.5.1 behandelt.

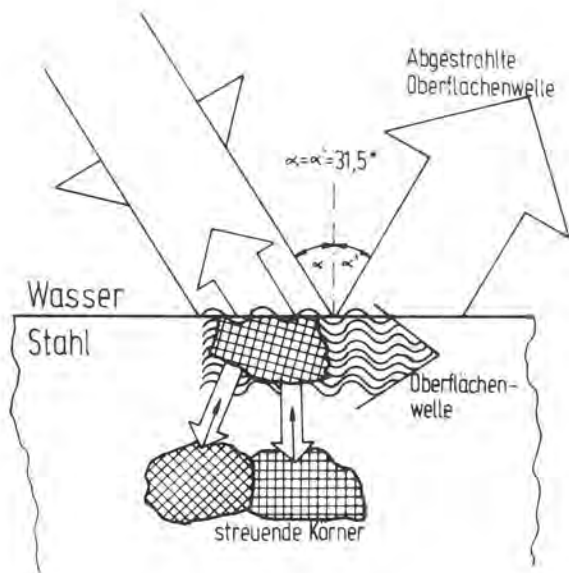


Abb. 33:
 Modell zur Schallausbreitung in streuenden Werkstoffen bei Anregung beim kritischen Winkel α_c

Es sei noch auf einen beobachteten Nebeneffekt hingewiesen: Bei der in Abb. 32 dargestellten Messung wurde eine maximale Streuamplitude dann beobachtet, wenn auch der Empfangsprüfkopf in einem kritischen Winkel α_c zur Oberfläche ausgerichtet wurde. Dies deckt sich mit einer schlierenoptischen Aufnahme (Abb. 34) aus einer älteren Arbeit /71/, in der festgestellt wird, daß eine sich ausbreitende Oberflächenwelle Schallwellen kegelmantelförmig (mit $2\alpha_c$ als Kegelwinkel) in das Wasser abstrahlt.

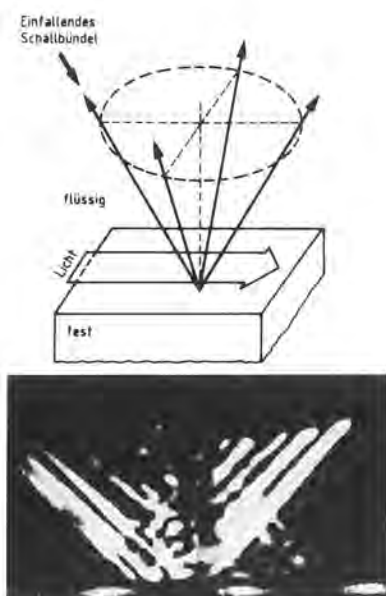


Abb. 34:
 Kegelige Abstrahlcharakteristik in das Wasser, verursacht durch eine Rayleighsche Oberflächenwelle (nach /71/)

Neuere Arbeiten /72-75/ beschäftigen sich eingehender mit diesem Effekt. Es wird festgestellt, daß bei der Anregung einer Oberflächenwelle eine "rück-reflektierte" Welle existiert, die sich in der entgegengesetzten Richtung zur einfallenden Welle ausbreitet, und daß anscheinend auch bei anderen Einfallswinkeln α immer Schallwellen unter dem kritischen Winkel α_k abgestrahlt werden. (Der in diesen Arbeiten verwendete Begriff "backscattering" hat in der englischsprachigen Literatur meist nicht die Bedeutung von "Gefügerückstreuung", sondern beschreibt eher jede Art von Reflexion oder Streuung an Grenzflächen). Die Arbeiten über die vielfältigen Phänomene der "critical angle-reflectivity" sind noch nicht abgeschlossen; eine zusammenfassende, in sich geschlossene Darstellung findet sich vor allem bei Bertoni und Tamir /76/.

3.5 Ultraschallstreuung in dünnen Blechen

3.5.1 Struktur des Streusignals

Im vorigen Abschnitt 3.4 wurde gezeigt, daß die Amplitude des empfangenen Streusignals maximal ist, wenn in einen Testkörper aus Stahl beim kritischen Winkel α_k eingeschallt wird. Ebenso weist dort der Reflexionsfaktor der Stahl/Wasser-Grenzfläche ein ausgeprägtes Minimum auf. Beides hat als gemeinsame Ursache, daß beim kritischen Winkel der Übergang des Schalldrucks (proportional der Amplitude) von Wasser in Stahl ein Maximum hat.

Weiterhin wurde gezeigt, daß die dabei entstehende Oberflächenwelle wegen der Abstrahlung des Ultraschalls in das Wasser nur eine sehr geringe Reichweite hat (wenige mm). Wegen der Streuung der Oberflächenwelle im Oberflächengefüge gelangen jedoch freie Raumwellen in das Volumen des Testkörpers, wie durch das in Abb. 32 dargestellte experimentelle Ergebnis nachgewiesen werden konnte. Nach Gl. (13), S. 10 sind diese Raumwellen vor allem Transversalwellen.

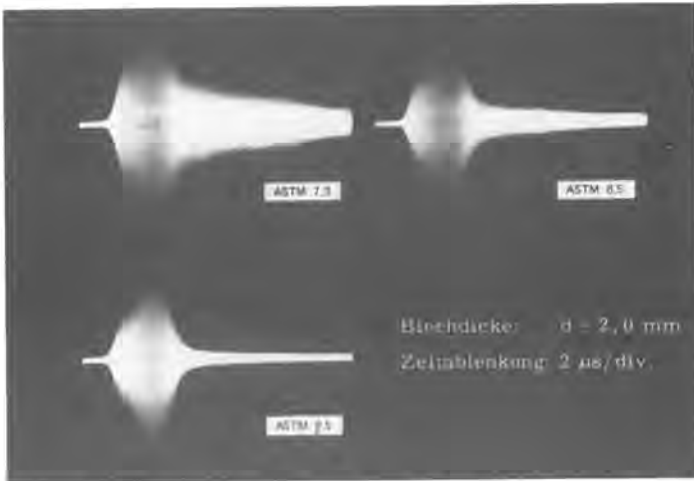


Abb. 35:
 Gemessene Rückstreusignale austenitischer Feinbleche gleicher Dicke, aber unterschiedlicher Korngröße

Abb. 35 zeigt die Streusignale von Blechen unterschiedlicher Korngröße, wenn sich die Bleche völlig unter Wasser befinden und beim kritischen Winkel α_k mit hohen Frequenzen (25 MHz) eingeschallt wird. Der Abstand zwischen Prüfkopf und Blech auf der akustischen Achse betrug $a = 18,5 \text{ mm} \hat{=} 25 \text{ } \mu\text{sec}$ Schalllaufzeit im Wasser; der Sendeimpuls ist nicht dargestellt. Neben der Tatsache, daß die Streuamplitude vor allem bei größeren Laufzeiten (hinterer Teil der Signale) mit der Korngröße ansteigt, fällt wie in Abb. 28, S. 41 die besondere Struktur der Rückstreusignale auf, die in Abb. 36 schematisiert dargestellt ist.

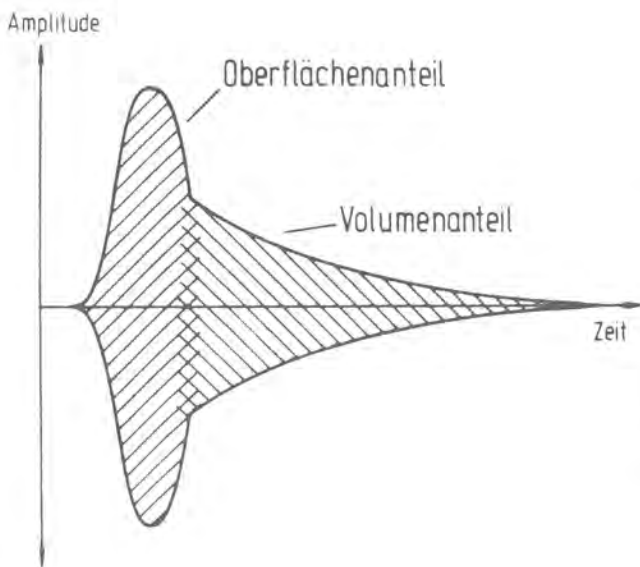


Abb. 36:
 Schematische Darstellung des Rückstreusignals eines austenitischen Bleches beim kritischen Einfallswinkel α_k

Der vordere Teil, der durch eine maximale Streuamplitude gekennzeichnet ist, ist das durch die Rückstreuung der gedämpften Oberflächenwelle verursachte Signal, während der hintere Teil das durch rückgestreute Raumwellen aus dem Blechvolumen erzeugte Signal ist. Diese Struktur zeigt sich auch bei den bandpaßgefilterten Streusignalen, die jedoch erst nach einer mit dem Rechner durchgeführten Ortsmittelung beobachtet werden kann (Abb. 15, S. 24). Das untere Signal $A_g(t)$ in der Abb. 15 ist noch völlig zerklüftet, kann jedoch durch die Ortsmittelung geglättet werden. Werden z.B. 256 einzelne Streusignale $A_g(t)$ ("A-Bilder") auf 1 m Blechlänge gemittelt, so ergibt sich das in Abb. 37 schematisch dargestellte Streusignal.

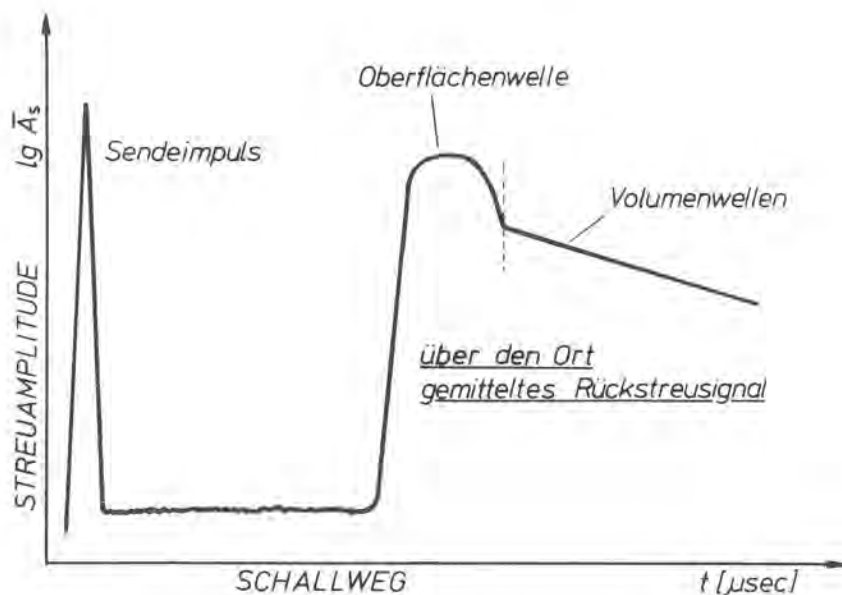


Abb. 37: Schematische Darstellung eines mit der in Abb. 14 dargestellten Apparatur gemessenen Rückstreusignals beim kritischen Einfallswinkel α_k

Die Tatsache, daß im Rückstreusignal die Streuung der gedämpften Oberflächenwelle zeitlich getrennt von der Rückstreuung aus dem Volumen empfangen werden kann, wird durch die nachfolgend beschriebenen Experimente bestätigt:

a) Mit Hilfe des in Abb. 14, S. 23 dargestellten Meßaufbaus wurde folgendes Experiment durchgeführt /59/: Abb. 38 zeigt, wie ein dünner Draht ($d = 30 \mu\text{m}$) unter dem kritischen Winkel $\alpha_k = 31.5^\circ$ durch das Schallfeld des Prüfkopfes hindurch bewegt wird (Abstand $a = 18.5 \text{ mm} \hat{=} \text{Abstand von der Blechoberfläche}$, siehe S. 48).

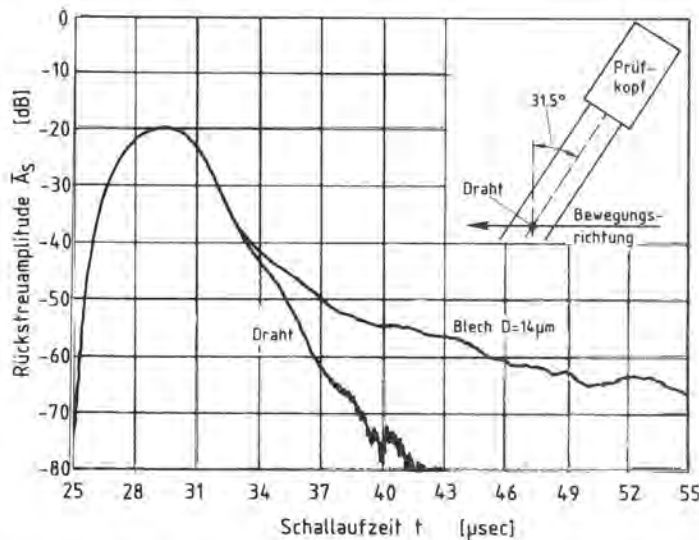


Abb. 38: Vergleich der gemessenen Echodynamik eines dünnen Drahtes mit dem Rückstreusignal eines austenitischen Feinbleches

Das empfangene Echo ändert sich wegen der nicht konstanten Schalldruckverteilung im Schallfeld sowohl in seiner Amplitude als auch wegen der dargestellten geometrischen Verhältnisse in seiner Laufzeit. Die so gemessene Echodynamik ist in der Abb. durch die mit "Draht" bezeichnete Kurve dargestellt. Das zum Vergleich mitaufgezeichnete Rückstreusignal eines Bleches zeigt, daß beide Kurven im vorderen Bereich, welchem die Rückstreuung der Oberflächenwelle zugeschrieben wird, identisch sind. Das bedeutet, daß im Oberflächenanteil des Signals nur Rückstreuung vom Oberflächengefüge empfangen wird, da der Amplitudenverlauf des Oberflächenanteils des Streusignals $\bar{A}_s(t)$ unter der vereinfachenden Annahme, daß die Reichweite der gedämpften Oberflächenwelle 0 mm ist, der Schalldruckverteilung des Schallfeldes im betrachteten Bereich entspricht.

b) In Abb. 39 ist dargestellt, wie mit einem sendenden Prüfkopf in ein 1 mm dickes Blech eingeschallt wird und mit einem zweiten Prüfkopf die nun vorwärts gestreuten Schallwellen empfangen werden, wobei der Winkel γ variiert wird. Das Ergebnis der Messung zeigt zunächst, daß im Bereich der Winkel $-40^\circ \leq \gamma \leq 40^\circ$ gestreuter Ultraschall empfangen werden kann mit zwei ausgeprägten Maxima bei den kritischen Winkeln $\pm 31^\circ$ und einem kleineren Maximum bei 0° .

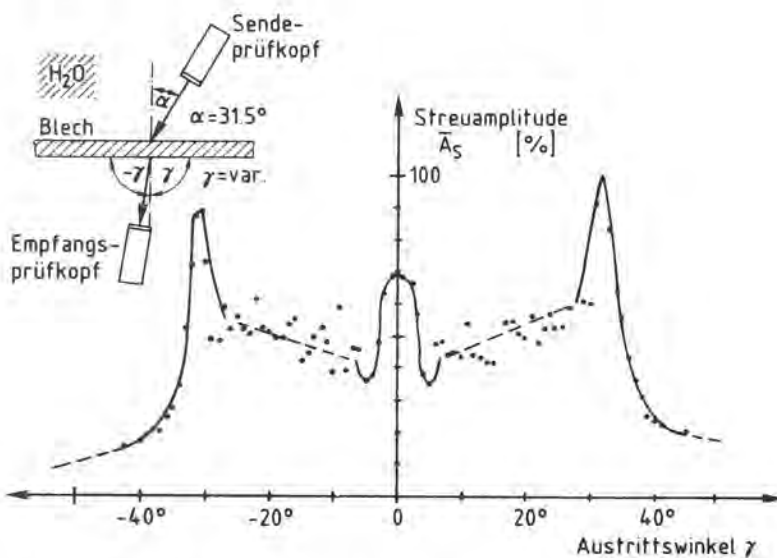


Abb. 39: Abhängigkeit der Amplitude vorwärts gestreuten Ultraschalls vom Austrittswinkel γ ; benutzte Meßanordnung

Der Bereich $-31^\circ < \gamma < 31^\circ$ beschreibt den Ausbreitungsbereich von Transversalwellen im Blech $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ mit Ausnahme von $\beta = 0^\circ$. (Eine senkrecht auf die Grenzfläche Stahl/Wasser fallende Transversalwelle kann nicht in das Wasser austreten). Dieses Experiment zeigt, daß auch die im Blechvolumen gestreuten Schallwellen beim "kritischen Empfangswinkel" von 31° zum Prüfkopf gelangen. Ähnlich wie bei der in Abb. 34, S. 46 gezeigten keglichen Abstrahlung in das Wasser existieren bei dieser Meßanordnung die beiden kritischen Empfangswinkel $\pm 31^\circ$. Wird vom Maximum bei $\gamma = 0^\circ$ abgesehen, das wahrscheinlich seine Ursache im Austritt

von Longitudinalwellen hat, aber nicht genau gedeutet werden kann, so ist die empfangene Streuamplitude zwischen $-30^\circ < \gamma < +30^\circ$ einigermaßen konstant; allenfalls ist ein minimaler Anstieg zu größeren Winkeln γ zu beobachten. Die beiden Maxima bei $\pm 31^\circ$ bedeuten nun nicht, daß im Blech bei $\beta = \pm 90^\circ$ generell eine Vorzugsrichtung der gestreuten Schallamplitude vorliegt, sondern diese Maxima sind nur durch die Existenz der Grenzfläche Wasser/Stahl möglich und rühren von den in Kap. 3.4 beschriebenen Besonderheiten der Schallausbreitung beim kritischen Winkel her (siehe z.B. Abb. 34). Zusätzlich soll bemerkt werden, daß wegen der Vielfachreflexionen der Schallwellen zwischen den Blechoberflächen bei der Streuung aus dem Volumen große Schalllaufzeiten möglich sind, so daß dieser rückgestreute Ultraschall zeitlich hinter den von der Oberfläche gestreuten Schallwellen beobachtet werden kann. Dies und die Abhängigkeit des Volumenanteils von der Blechdicke werden im Abschnitt 3.5.3 ausführlich behandelt.

Der Nachweis dafür, daß sich die Ultraschallwellen im Blechvolumen in allen Raumrichtungen $-90^\circ < \beta < 90^\circ$ ausbreiten und keine ausgeprägte Vorzugsrichtung des gestreuten Ultraschalls vorliegt, wird nicht nur durch die in Abb. 39 dargestellte Messung belegt, sondern ergibt sich auch aus der Messung der Amplitudenspektren der Volumenanteile von Streusignalen mit Hilfe der in Abb. 16, S. 25 dargestellten Apparatur: Die Abb. 40 zeigt, daß keine von der Blechdicke abhängigen Interferenzmaxima und -minima mehr auftreten (vgl. Abb. 24, S. 36, Rückstreuung von Transversalwellen).

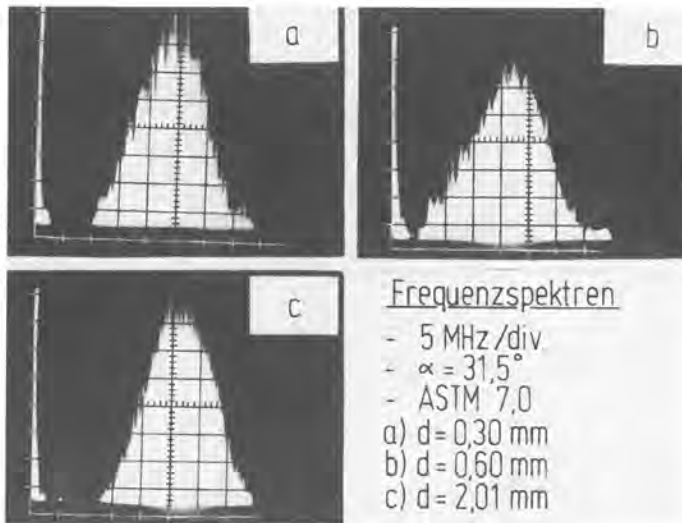


Abb. 40: Gemessene Amplitudenspektren des Volumenanteils der Streusignale von Blechen unterschiedlicher Dicke beim kritischen Einfallswinkel α_K

- c) Im letzten Experiment dieses Abschnitts sollen die Rückstreusignale von gedämpften und freien (ungedämpften) Oberflächenwellen miteinander verglichen werden. Abb. 41 zeigt, wie in einer Tauchtechnikanlage eine freie Oberflächenwelle erzeugt werden kann.

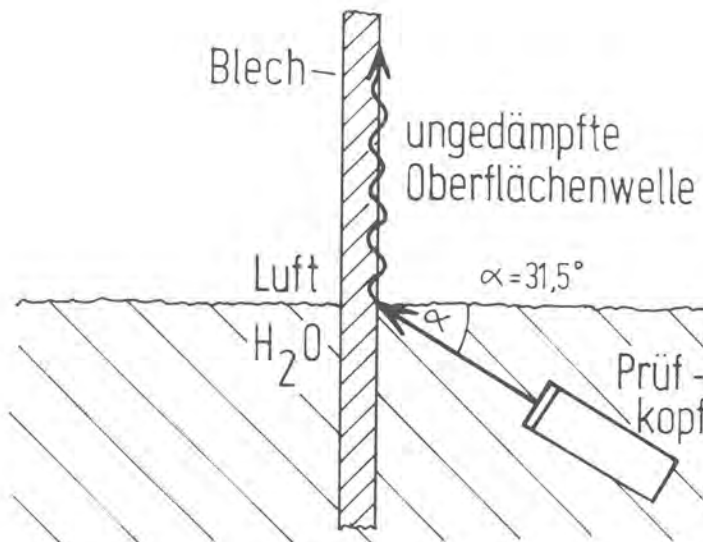


Abb. 41: Anregung einer ungedämpften Oberflächenwelle

Bei dieser Meßanordnung konnte keine Ortsmittelung (Bewegung des Prüfkopfes senkrecht zur dargestellten Ebene) durchgeführt werden, da beim Bewegen des Prüfkopfes die Wasser/Luft-Grenzfläche stark schwankte, was zu nicht auswertbaren Signalen führte. Daher werden die Streusignale nur qualitativ betrachtet.

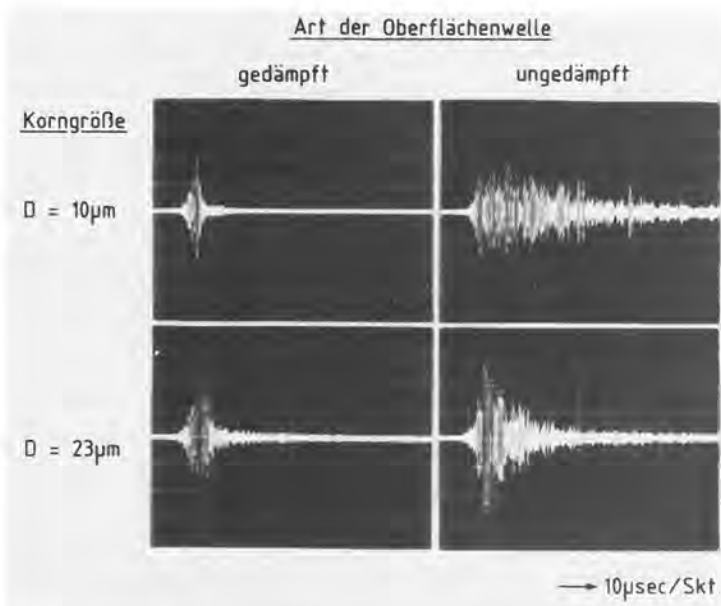


Abb. 42:
Gemessene Streusignale eines grobkörnigen und eines feinkörnigen Bleches bei Anregung mit gedämpften und ungedämpften Oberflächenwellen

Die Abb. 42 zeigt, daß offenbar sowohl beim fein- als auch beim grobkörnigen Blech die Volumenanteile der Streusignale durch die größere Amplitude der Rückstreuung der freien Oberflächenwelle verdeckt sind.

3.5.2 Einfluß der Korngröße auf das Streusignal

Wie in Abschnitt 3.5.1 gezeigt, weist der durch eine gedämpfte Oberflächenwelle erzeugte Rückstreusignalanteil aus dem Blechvolumen keine dickenabhängigen Interferenzerscheinungen auf, im Gegensatz zur Rückstreuung der direkt eingeschallten Transversalwelle (Kap. 3.3). Daher sollte eine Korngrößenbestimmung durch Messen der Streuamplitude im Volumenanteil des unter Wasser beim kritischen Winkel erzeugten Streusignals

möglich sein. Aus den Gln. (9), S. 9 und (19), S. 15 folgt für $x = 0$ (bzw. für kleine Schallaufwege):

$$\bar{A}_s(0) \sim \sqrt{D^3 f^4} \quad \longrightarrow \quad D \sim \sqrt[3]{\bar{A}_s^2} \quad (36)$$

Diese Aussage - Anstieg der Streuamplitude mit der Korngröße - ist qualitativ bereits in Abb. 35, S. 48 für die ungefilterten Streusignale bestätigt worden. Eine quantitative Aussage ist wiederum durch Messung mit Hilfe der in Abb. 14, S. 23 dargestellten Apparatur möglich. Abb. 43 zeigt die örtlich gemittelten Streusignale aus 5 Blechen mit unterschiedlicher Korngröße.

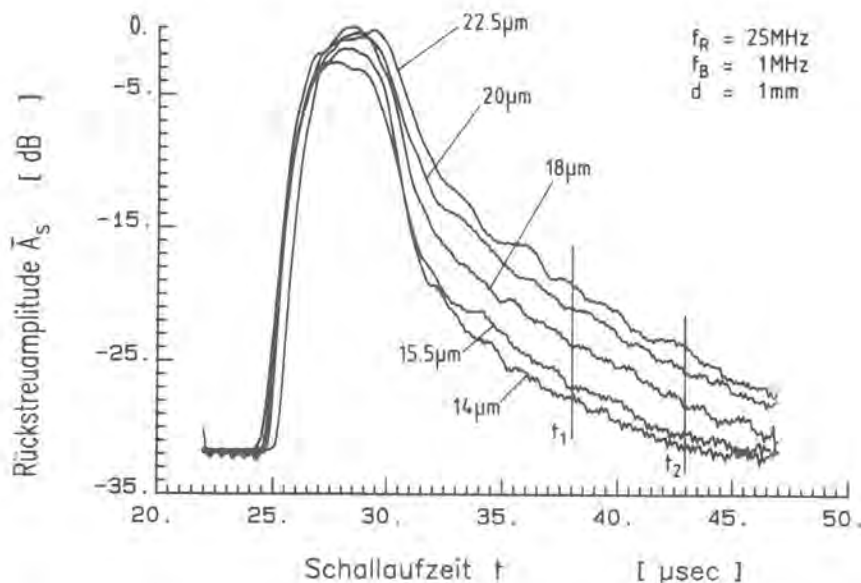


Abb. 43: Ortsgemittelte Rückstreusignale von Blechen gleicher Dicke, aber unterschiedlicher Korngröße

Alle Blechproben hatten die Abmessungen 650x200 mm, wobei die Dicke in diesem Fall $d = 1\text{ mm}$ betrug. Die dargestellten Streukurven sind das örtliche Mittel aus 1000 einzelnen Streusignalen, die hintereinander bei einer Verschiebung des Prüfkopfes von ca. 800 mm gemessen wurden. Mit Hilfe eines entsprechenden Auswerteprogrammes wird von jedem Rückstreu-

signal die mittlere Streuamplitude $\bar{A}_s(\Delta t)$ in einem wählbaren Auswertebereich $\Delta t = t_2 - t_1$ bestimmt. In Abb. 44 ist $(\bar{A}_s(\Delta t))^{2/3}$ aus der Abb. 43 für den Zeitbereich $t_1 = 13 \mu\text{sec}$ bis $t_2 = 18 \mu\text{sec}$ nach Signalanfang über der Korngröße D aufgetragen.

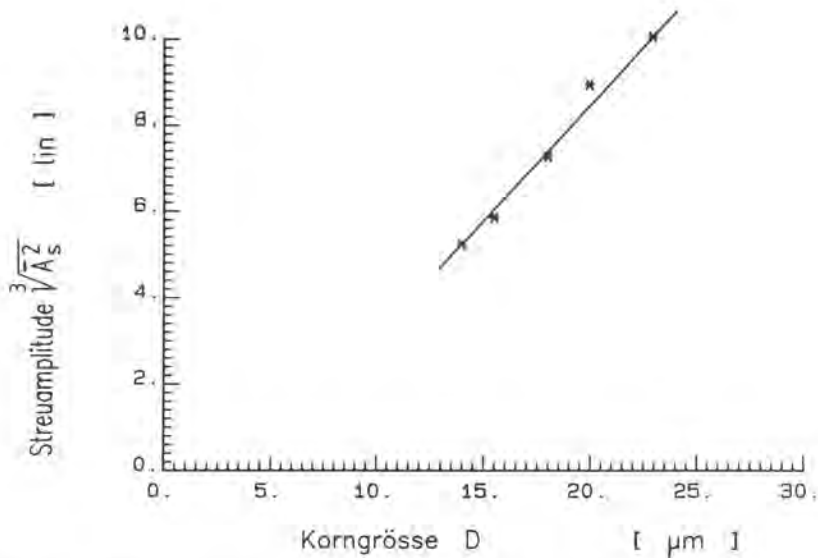


Abb. 44: Abhängigkeit der im Volumenanteil gemessenen Rückstreuamplitude von der metallografisch bestimmten Korngröße

Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang der Gestalt:

$$D = C_1 + C_2 (\bar{A}_s(\Delta t))^{2/3} \quad (37)$$

Genauigkeit sowie Grenzen dieses linearen Zusammenhanges werden in Kap. 5.5.1 diskutiert werden. Es wird festgestellt, daß die in einem Auswertebereich Δt gemessene ortsgemittelte Rückstreuamplitude $\bar{A}_s(\Delta t)$ von der Korngröße abhängt.

Es soll nun der in den Gln. (19), S. 15 bzw. (23), S. 16 theoretisch vorhergesagte Einfluß der Korngröße auf die Steigung (beschrieben durch den Schwächungskoeffizienten) des Amplitudenverlaufs $\bar{A}_s(t)$ des Volumenanteils des Rückstreusignals überprüft werden.

Dabei ist zu beachten, daß der Ultraschallschwächungskoeffizient κ (und auch Streu- und Absorptionskoeffizient) auf den Schallaufweg bezogen sind und daher die Einheit [1/mm] oder [dB/mm] haben, ebenso wie die von Fay angegebene Gl. (19) den Amplitudenverlauf $A_S(x)$ als Funktion des Schallaufweges angibt. Schallaufweg und Schallaufzeit sind über die Schallgeschwindigkeit c linear verknüpft ($x = c \cdot t$), wobei im Volumenanteil des Rückstreusignals die Transversalwellengeschwindigkeit c_T eingesetzt werden sollte. Analog zur Gl. (19) kann man für den Verlauf des Volumenanteils (zwischen t_1 und t_2) der in Abb. 43 dargestellten Rückstreusignale schreiben:

$$\bar{A}_S(t) = C \sqrt{\kappa_s \Delta} \cdot e^{-kt} \quad (38)$$

Dabei hat die Meßgröße k die Dimension [1/ μ sec] bzw. [dB/ μ sec] (wobei zur Verknüpfung dieser beiden Dimensionen der gleiche Faktor 8.69 wie in Gl. (14) gilt) und ist ein Koeffizient, der den Amplitudenabfall im gemessenen Rückstreusignal $\bar{A}_S(t)$ beschreibt. Die Abb. 45 zeigt nun, daß der mit Hilfe eines anderen Auswerteprogramms gemessene Amplitudenabfall k der Streusignale aus Abb. 43 im Auswertebereich Δt nicht von der Korngröße abhängt.

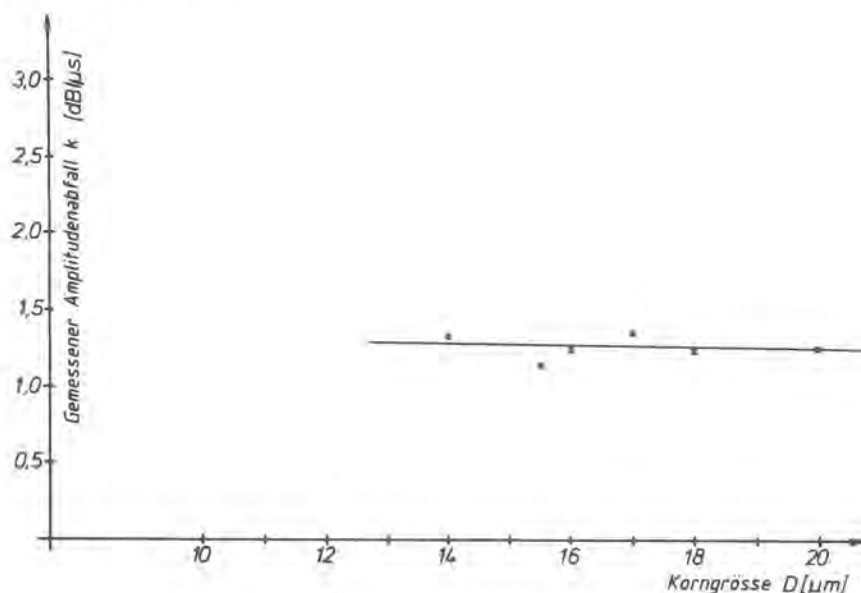


Abb. 45: Unabhängigkeit des gemessenen Amplitudenabfalls k im Volumenanteil der Rückstreusignale von der Korngröße

Entgegen der Gl. (23), S. 16 läßt sich daher eine Abhängigkeit des zu k proportionalen Schwächungskoeffizienten κ von der Korngröße D nicht erkennen. Dies dürfte in der Mehrfachstreuung begründet liegen.

Bei großen Streukoeffizienten κ_s kann die weitere Wechselwirkung des bereits gestreuten Ultraschalls mit dem Gefüge nicht mehr vernachlässigt werden /50, 78/; dieser Effekt wird Mehrfachstreuung genannt. Dabei werden im gemessenen Rückstreusignal höhere Streuamplituden A_s bei großen Schallaufzeiten t gemessen als im Modell der Einfachstreuung erwartet wird, denn entlang des in n Schritte Δx unterteilten Schallaufweges x wird immer wieder ein meßbarer Teil A_s addiert. Davon ausgehend resultiert das von Goebbels /50/ entworfene Modell in der Gl.

$$\bar{A}_{S, \text{Mehrfachstr}}(x) = C \cdot \sqrt{\kappa_s} \cdot e^{-\kappa x} \cdot (1 + C' \cdot e^{2\kappa_s x}) \quad (39)$$

Die Abb. 46 verdeutlicht den Unterschied des Verlaufs von Streusignalen bei angenommener Einfach- und Mehrfachstreuung.

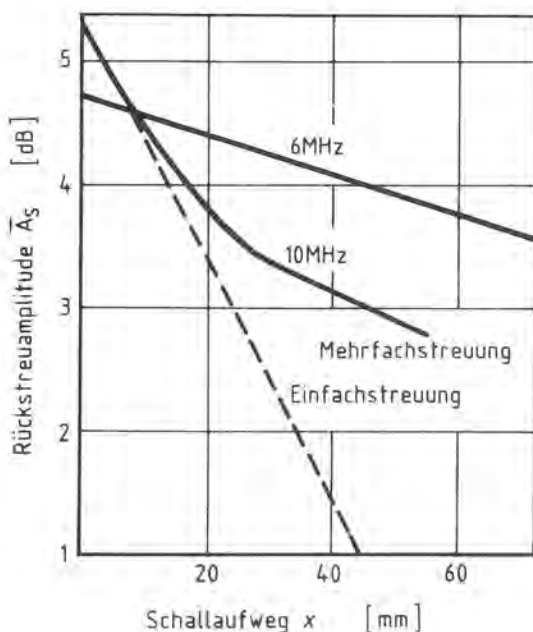


Abb. 46:

Rückstreumplitudenverlauf an einem austenitischen Stahl für 2 unterschiedliche Prüffrequenzen sowie Einfach- und Mehrfachstreuung (bei 6 MHz kommt die Mehrfachstreuung noch nicht vor bzw. fällt mit der Einfachstreuung zusammen)

(nach /50/)

Bei großen Laufwegen x verlaufen die Streusignale für 6 und 10 MHz bereits parallel (vgl. Abb. 43, S. 55); die Steigungen sind gleich. Die Gleichung (39), in der die Konstante C' im übrigen nicht näher spezifiziert wird, führt bei sehr großen Streukoeffizienten unter Vernachlässigung der Absorption jedoch zu Horizontalen bei großen Schalllaufwegen /58/.

Ein etwas anderer Ansatz wurde von Fay /78/ durchgeführt, bei dem, von einer punktförmigen Anregung des Ultraschalls ausgehend, die Mehrfachstreuung der vor- und rückgestreuten Schallwellen betrachtet wird. Zusätzlich wird der Fall der Mehrfachstreuung in dünnen Blechen diskutiert, wobei im Bereich des auf der Blechoberfläche einfallenden Schallbündels durch die spiegelnden Grenzflächen auch die vorwärts gestreuten Schallwellen immer wieder zum gemessenen Rückstreusignal beitragen. Dabei ist auch der Reflexionsfaktor R zu berücksichtigen.

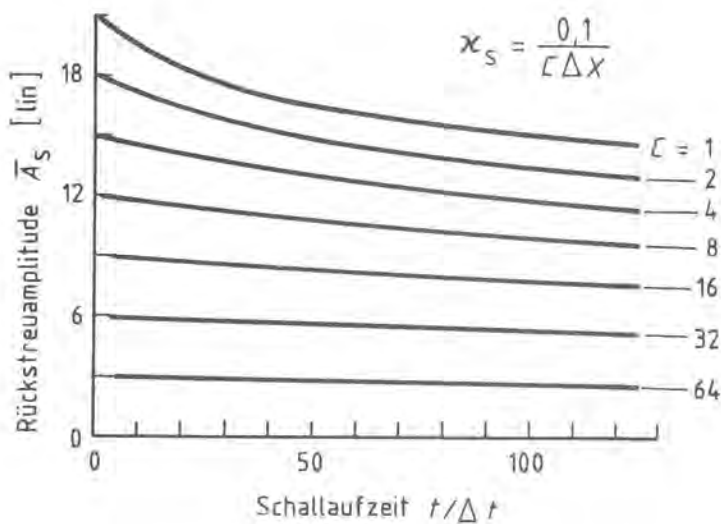


Abb. 47:
Berechnete Streuamplitude über der Schalllaufzeit für unterschiedliche Streukoeffizienten κ_S bei Mehrfachstreuung $\Delta t =$ Zeitintervall $\Delta x =$ Streuzentrenabstand
(nach /78/)

Die Abb. 47 zeigt theoretische Rückstreusignale für 7 unterschiedliche Streukoeffizienten κ_S . Die Streuamplitude steigt mit dem Streukoeffizienten an, der Amplitudenabfall ist jedoch für alle Kurven bei großen Schalllaufzeiten nahezu identisch, (Abb. 43, S. 55). Daher kann auch bei großen Schalllaufzeiten die

in Gl. (36), S. 55 angegebene Abhängigkeit beobachtet werden.
- Außerdem gehen bei diesem Ansatz die theoretischen Streusignale nicht in Horizontalen über.

3.5.3 Einfluß der Blechdicke auf das Streusignal

Nachdem festgestellt wurde, daß die Rückstreumplitude $\bar{A}_S(\Delta t)$ im Volumenanteil der Rückstreusignale von Blechen, die unter Wasser in Tauchtechnik geprüft werden, mit der Korngröße nach Gl. (37), S. 56 ansteigt, soll der Einfluß der Blechdicke auf die Streusignale bei der gewählten Meßanordnung untersucht werden.

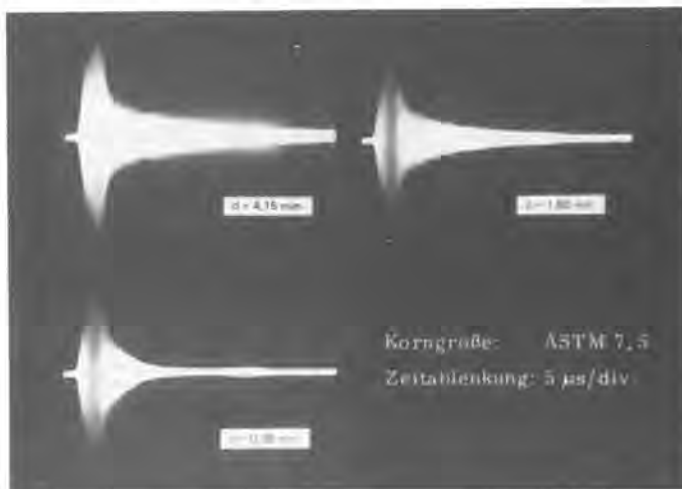


Abb. 48a:

Gemessene Rückstreusignale austenitischer Feinbleche mit gleicher Korngröße aber unterschiedlicher Dicke

Abb. 48a zeigt, daß die Rückstreumplitude bei Blechen konstanter Korngröße mit abnehmender Dicke als Funktion der Schalllaufzeit schneller abnimmt. Mit Hilfe der gefilterten, gleichgerichteten und gemittelten Streusignale ist wiederum eine im Rahmen der 8-Bit-Auflösung des Transientenrecorders genaue quantitative Bestimmung des Streuamplitudenabfalls k möglich (Abb. 48b).

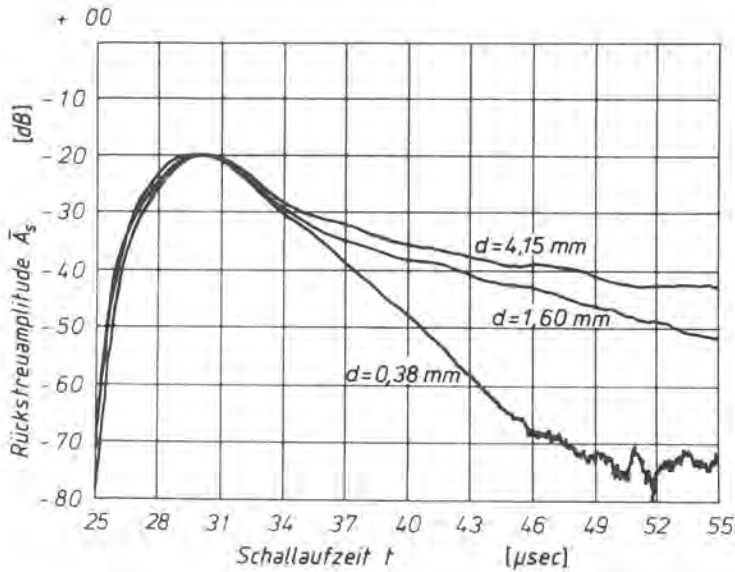


Abb. 48b: Ortsgemittelte Rückstreusignale austenitischer Feinbleche mit gleicher Korngröße aber unterschiedlicher Dicke

In der halblogarithmischen Darstellung wird der starke Einfluß der Blechdicke auf die Streusignale besonders deutlich; trotz gleicher Korngröße der verwendeten Bleche. Abb. 49 zeigt nun die gemessenen Steigungen k , die für 7 Bleche über dem Kehrwert der Blechdicke d aufgetragen sind. Jeder Meßpunkt stellt den Mittelwert aus 3 Einzelmessungen dar.

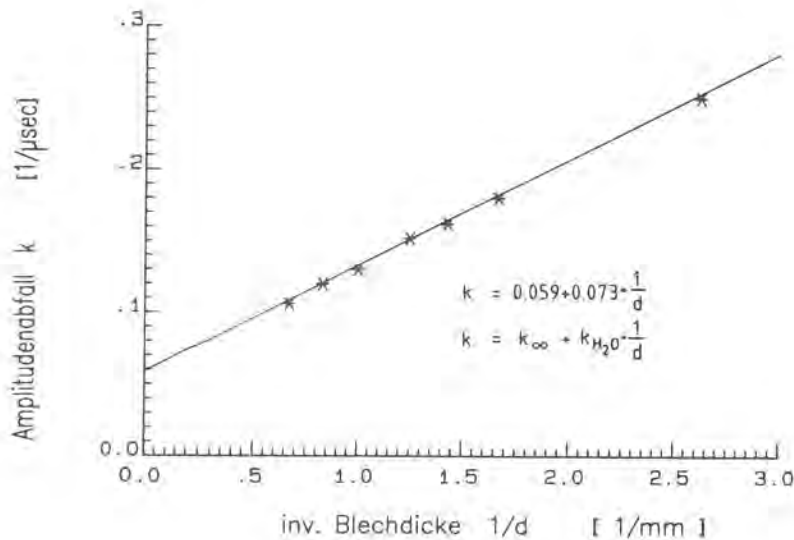


Abb. 49: Gemessener Amplitudenabfall im Volumenanteil von Streusignalen als Funktion des Kehrwertes der Blechdicke

Dabei wird eine Abhängigkeit

$$k [\mu\text{sec}^{-1}] = k_{\infty} [\mu\text{sec}^{-1}] + k_{\text{H}_2\text{O}} [\text{mm}/\mu\text{sec}] \cdot \frac{1}{d} [\text{mm}^{-1}] \quad (40)$$

festgestellt. k_{∞} stellt den durch Schwächung verursachten Amplitudenabfall der Streusignale eines unendlich dicken Bleches dar, die Konstante $k_{\text{H}_2\text{O}}$ wird im folgenden diskutiert werden. ($k_{\text{H}_2\text{O}}$ hat zwar die Dimension einer Schallgeschwindigkeit, ist aber nur als Proportionalitätsfaktor zu verstehen, ähnlich wie der E-Modul mit der Dimension einer Spannung.) Dazu folgende Betrachtung:

Für die Amplitude einer Rückwandeckhofolge aus einer planparallelen Platte, wie in Abb. 7, gilt:

$$A(x) = C \cdot e^{-\kappa x} \cdot R^{n-1} \cdot F(x) \quad (41)$$

(vgl. Gl. (17), S. 12)

Es wird nun der Fall betrachtet, daß das Schallbündel ca. 6 mm Durchmesser hat und unter $\alpha = 31^\circ$ auf das Blech einfällt. Ist die Reichweite der Oberflächenwelle annähernd 0 mm, so wird die empfangene Rückstreuung hauptsächlich aus dem Bereich direkt unter dem "Einschallfleck" herrühren (Abb. 50):

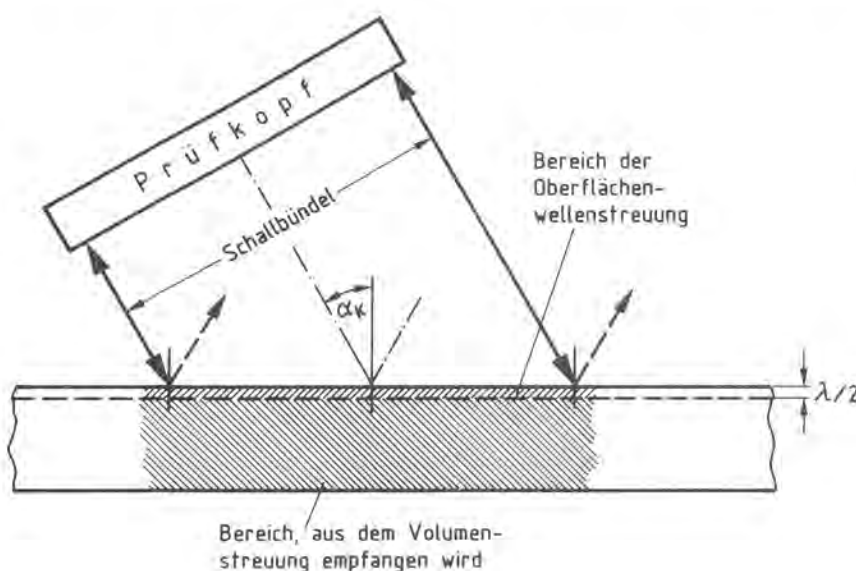


Abb. 50:
Schematische Darstellung des Gebietes, aus dem Ultraschallrückstreuung empfangen wird

Wird angenommen, daß sich die gestreuten Schallwellen im Volumen senkrecht zur Blechoberfläche ausbreiten, dann kann die Gl. (41) zur Beschreibung des in den Bildern 48a und b dargestellten Effektes der Abhängigkeit des Amplitudenabfalls von der Blechdicke verwendet werden. Bei dem Schallbündeldurchmesser von ca. 6 mm im Nahfeld und Blechdicken $d < 2$ mm können die Schallausbreitungsverluste $F(x)$ vernachlässigt werden, da das betrachtete Volumenlement eine größere Ausdehnung in den beiden Richtungen senkrecht zur angenommenen Schallausbreitung besitzt als in dieser Richtung selbst.

Für die angenommene Ausbreitung der gestreuten Schallwellen senkrecht zur Blechoberfläche gilt für den Zusammenhang zwischen Schallweg x , Anzahl der Reflexionen n und Blechdicke d

$$x = n \cdot d \quad (42)$$

Für den Reflexionsfaktor R gilt bei großem n - d.h. bei großem Schallweg x und kleiner Blechdicke d - die Näherung

$$R^{n-1} \approx R^n \quad (43)$$

Daher kann die Gl. (41) folgendermaßen umgestellt werden:

$$\bar{A}_s(x) = C \cdot e^{-kx} \cdot e^{\ln R \cdot n} \quad (44)$$

Mit der Gl. (42) wird daraus:

$$\bar{A}_s(x) = C \cdot e^{-(k - \ln R/d)x} \quad (45)$$

Der Volumenanteil der gemessenen Rückstreusignale (Abb. 48b) ist mit Hilfe der in Gl. (40) gemessenen Abhängigkeit beschreibbar durch

$$\bar{A}_s(t) = \bar{A}_s(0) \cdot e^{-(k_\infty + k_{H_2O}/d)t} \quad (46)$$

Die theoretisch ermittelte Gl. (45) und die durch Messung erhaltene Gl. (46) sind nun formal identisch. Daher können aus dem in der Abb. 49 dargestellten Meßergebnis Rückschlüsse auf den Schwächungskoeffizienten κ und den Reflexionsfaktor R getroffen werden, indem die Größe k_∞ in den Schwächungskoeffizienten κ umgerechnet wird und die Größe k_{H_2O} in einen Reflexionsfaktor R .

$$\kappa = k_\infty + k_{H_2O}/d = 0.059 + 0.073/d \quad (47)$$

Besteht das Rückstreusignal aus Longitudinalwellen, so wird mit $c_L = 5.8 \text{ mm}/\mu\text{sec}$ daraus

$$\kappa = k_\infty/c_L = 1.02 \cdot 10^{-2} [\text{mm}^{-1}] \quad (48)$$

sowie

$$-\ln R = k_{H_2O}/c_L = 1.26 \cdot 10^{-2} [\cdot/\cdot] \quad (49)$$

Daraus berechnet sich ein Reflexionsfaktor von $R = 0.987$, der in der Größenordnung des bekannten Reflexionsfaktors einer Wasser/Stahl-Grenzfläche von $R = 0.935$ liegt. Der Unterschied ergibt sich aus der zu Beginn dieser Betrachtungen getroffenen vereinfachenden Annahme, daß sich der Schall senkrecht zur Oberfläche ausbreitet. Außerdem ist für die gestreuten Transversalwellen, die bei senkrechtem Auftreffen auf die Grenzfläche nicht in das Wasser austreten, der Reflexionsfaktor $R = 1.0$. In der Umgebung des Winkels $\beta = 0$ wird aber auch für die Transversalwellen der Reflexionsfaktor $R < 1.0$, so daß der beobachtete Wert von $R = 0.987$ das Resultat verschiedenster Effekte sein dürfte.

Bereits 1950 wurde in /79/ dargelegt, daß der Verlauf von Ultraschallsignalen aus einer Platte entscheidend von einer seitlichen Schallabstrahlung in das Wasser abhängen kann. Daher mußte dieser Einfluß für das hier vorliegende Meßproblem näher untersucht werden. Aus der gemessenen Übereinstimmung zwischen k_{H_2O} und dem Reflexionsfaktor wird geschlossen, daß die Ursache der Abhängigkeit des Amplitudenabfalls der Rückstreusignale von der Blechdicke das Abstrahlen des Schalls in das umgebende Wasser ist. Wird z.B. in der Abb. 48a das am 1.6 mm dicken Blech erhaltene Rückstreusignal betrachtet, so hat dieses eine Dauer von ca. 50 μ sec. Diese Dauer entspricht einem Vielfachen der Blechdicke. Die gestreuten Schallwellen werden zwischen den beiden Grenzflächen immer wieder hin und her reflektiert, wobei ein geringer Schallanteil austritt. Bei einem dünnen Blech werden die beiden Oberflächen häufiger getroffen als bei einem dicken Blech, so daß durch den häufigeren Schallaustritt die Rückstreumplitude schneller abfällt. Daher hat das Rückstreusignal des 0.38 mm dicken Bleches nur noch eine Dauer von ca. 20 μ sec. Eine Möglichkeit zur Korrektur des störenden Einflusses der Blechdicke auf den Amplitudenverlauf des Rückstreusignals wird im nächsten Kapitel beschrieben.

4. Meßmethode zur zerstörungsfreien Korngrößenmessung an Feinblechen

Bevor in Kap. 5 der Aufbau und die Arbeitsweise einer Meßapparatur zur Korngrößenbestimmung an der Durchlaufglühanlage beschrieben wird, soll zunächst das Prinzip der Meßmethode dargestellt werden, die aus den im Kap. 3 beschriebenen Erkenntnissen entwickelt wurde.

4.1 Prinzip der Korngrößenbestimmung durch Vergleichsmessung an austenitischen Feinblechen; Korrektur der Blechdicke

Der in Abschnitt 3.5.1 definierte Volumenanteil der empfangenen Streusignale von austenitischen Blechen wird durch zwei Parameter beeinflusst:

- Bei konstanter Blechdicke wird der Streuamplitudenverlauf $\bar{A}_S(t)$ bei Korngrößenveränderungen gemäß Gl. (36) in der Amplitudenrichtung parallelverschoben (Abb. 43, S. 55),
- die Steigung k von $\bar{A}_S(t)$ ist nach Gl. (40), S. 62, von der Blechdicke abhängig, bei dünnen Blechen fällt die Streuamplitude \bar{A}_S schneller über der Zeit ab (Abb. 49, S. 61).

Eine zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen ist also möglich, da die Streuamplitude $\bar{A}_S(\Delta t)$ im Auswertebereich Δt gemäß Gl. (37), S. 56 von der Korngröße abhängt. An einem Ensemble von Blechen bekannter Korngröße können nun durch mehrere Einzelmessungen die Zahlenwerte C_1 und C_2 für die Gl. (37) ermittelt werden (Diskussion in Kap. 5.5.1), und aus dieser Kalibriergleichung kann die Korngröße D durch Messung von $\bar{A}_S(\Delta t)$ berechnet werden. Dabei ist aber noch eine Methode zur Korrektur des Einflusses der Blechdicke notwendig, die im folgenden vorgestellt werden soll:

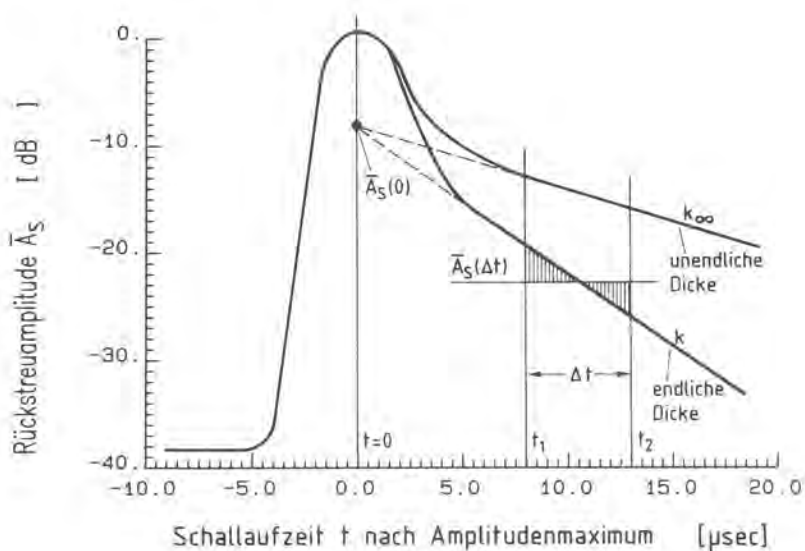


Abb. 51:
Schematische ortsgemittelte Rückstreusignale von 2 Blechen gleicher Korngröße aber endlicher und unendlicher Dicke

In Abb. 51 ist schematisch aufgezeichnet, wie sich das Rückstreusignal bei gleicher Korngröße für unterschiedliche Blechdicken ausbildet. Das Streusignal der Steigung k_∞ stellt dabei das Signal eines unendlich dicken Bleches dar, das Signal mit der Steigung k stammt von einem Blech endlicher Dicke d . Beide Kurven können durch eine Gleichung des Typs

$$\bar{A}_s(t) = \bar{A}_s(0) \cdot e^{-kt} \quad (50)$$

beschrieben werden. $\bar{A}_s(0)$ ist das vom Oberflächenanteil verdeckte Maximum des Volumenanteils. Für das unendlich dicke Blech gilt dabei $k = k_\infty$ und für den Wert k des unendlich dicken Bleches die Gl. (47), S. 64. Die ortsgemittelte Amplitude $\bar{A}_s(\Delta t)$ wird dabei zur Korngrößenbestimmung bei jedem der z. B. 1000 Meßorte (siehe S. 55) zwischen den Grenzen t_1 und t_2 durch Aufsummieren der einzelnen digitalen Amplitudenwerte des Signals und arithmetische Mittelwertbildung im Zeitbereich gemessen. (Aus der Taktfrequenz des verwendeten Transientenrekorders von 20 MHz ergibt sich eine Wandelrate von 50 nsec pro digitalem Einzelwert (sample). Der Zeitbereich von z.B. $\Delta t = 1 \mu\text{sec}$ wird also in 20 digitale Einzelwerte aufgeteilt.) Dies kann beschrieben werden durch

$$\bar{A}_s(\Delta t) = (\bar{A}_s(0) \int_{t_1}^{t_2} e^{-kt} \cdot dt) / \Delta t \quad (51)$$

und unter Ausnutzung der Gl. (47) auf S. 64 durch

$$\bar{A}_s(\Delta t) = (\bar{A}_s(0) \int_{t_1}^{t_2} e^{-(k_\infty + k_{H_2O}/d)t} dt) / \Delta t \quad (52)$$

Da die Zahlenwerte für k_∞ und k_{H_2O} bekannt sind, können die Streuamplituden $\bar{A}_s(\Delta t)$ von Blechen unterschiedlicher Dicke mit Hilfe eines Faktors M auf das Signal eines unendlich dicken Bleches $\bar{A}_{s\infty}(\Delta t)$ normiert werden. Es wird angesetzt:

$$\bar{A}_{s\infty}(\Delta t) = M \cdot \bar{A}_s(\Delta t) \quad (53)$$

Dieser Normierungsfaktor M berechnet sich nun aus:

$$M = \frac{\bar{A}_{S_{\infty}}(\Delta t)}{A_S(\Delta t)} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} e^{-k_{\infty} t} dt}{\int_{t_1}^{t_2} e^{-(k_{\infty} + k_{H_2O}/d)t} dt} \quad (54)$$

Die Lösung der Integrale ergibt

$$M = \left(1 + \frac{k_{H_2O}}{k_{\infty} \cdot d}\right) \cdot \frac{e^{-k_{\infty} t_1} - e^{-k_{\infty} t_2}}{e^{-(k_{\infty} + k_{H_2O}/d)t_1} - e^{-(k_{\infty} + k_{H_2O}/d)t_2}} \quad (55)$$

Für eine vorgegebene Blechdicke d kann aus dieser Gl. (55) mit den Zahlenwerten aus Gl. (47) der Normierungsfaktor M berechnet werden, so daß eine Korngrößenbestimmung für Bleche aller Dicken möglich ist. Abb. 52 zeigt den berechneten Faktor M als Funktion der Blechdicke.

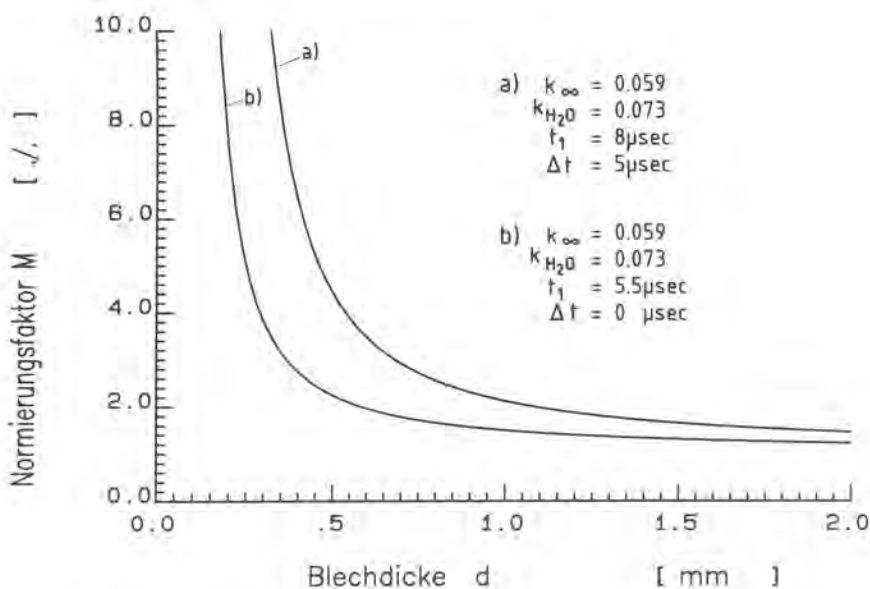


Abb. 52: Berechnete Abhängigkeit des Normierungsfaktors M von der Blechdicke für zwei unterschiedliche Auswertebereiche der gemessenen Rückstreuamplitude im Volumenanteil

M strebt für dicke Bleche den Wert 1 an. Bei der Kurve a), die zuerst betrachtet werden soll, wurde $t_1 = 8 \mu\text{sec}$ gewählt und $t_2 = 13 \mu\text{sec}$, wobei der Ursprung $t = 0$ beim Amplitudenmaximum festgelegt wurde, wie in Abb. 51 dargestellt. Die Grenze t_1 sollte so groß gewählt werden, daß sie nicht mehr im Oberflächenanteil des Signals liegt; t_2 so klein, daß bei sehr dünnen Blechen ($d < 0.3 \text{ mm}$) noch eine ausreichende Streuamplitude meßbar ist. Ist t_2 zu groß, so wird dort nur noch elektrisches Rauschen erfaßt.

Es soll nun die Dauer Δt des Auswertebereiches $\Delta t = t_2 - t_1$ diskutiert werden. Die Gl. (55) wird dazu nach Δt aufgelöst: Nach einigen Zwischenrechnungen ergibt sich

$$M = \left(1 + \frac{k_{\text{H}_2\text{O}}}{k_{\infty}d}\right) \cdot e^{\frac{k_{\text{H}_2\text{O}}t_1}{d}} \cdot \frac{1 - e^{-k_{\infty}\Delta t}}{1 - e^{-(k_{\infty} + k_{\text{H}_2\text{O}}/d)\Delta t}} \quad (56)$$

Wegen der eben diskutierten Forderung, t_1 groß zu wählen und t_2 klein, ist es von Vorteil, mit kleinen Auswertebereichen Δt zu arbeiten. Dazu soll der Fall $\Delta t \rightarrow 0$ behandelt werden: Für $\Delta t = 0$ ergibt sich in der Gl. (56) der unbestimmte Ausdruck $0/0$. Dieser Ausdruck kann durch Anwendung der L'Hospital'schen Regel gelöst werden, bei der Zähler und Nenner des Bruches getrennt nach Δt differenziert werden:

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1 - e^{-k_{\infty}\Delta t}}{1 - e^{-(k_{\infty} + k_{\text{H}_2\text{O}}/d)\Delta t}} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{k_{\infty}e^{-k_{\infty}\Delta t}}{(k_{\infty} + k_{\text{H}_2\text{O}}/d)e^{-k_{\infty}\Delta t}} \\ &= k_{\infty} / (k_{\infty} + k_{\text{H}_2\text{O}}/d) \end{aligned} \quad (57)$$

Das ergibt in Gl. (56) eingesetzt für den Normierungsfaktor M bei $\Delta t = 0$

$$\begin{aligned} M_{\Delta t=0} &= \left(1 + \frac{k_{\text{H}_2\text{O}}}{k_{\infty}d}\right) \cdot e^{\frac{k_{\text{H}_2\text{O}}t_1}{d}} \cdot \frac{k_{\infty}}{k_{\infty} + k_{\text{H}_2\text{O}}/d} \\ &= e^{k_{\text{H}_2\text{O}}t_1/d} \end{aligned} \quad (58)$$

Dieser inzwischen sehr einfache Ausdruck kann auch erhalten werden, wenn direkt in den in Gl. (54), S. 68 getroffenen Ansatz eine Zeit t_1 eingesetzt wird anstelle des Integrals für den Bereich von t_1 bis t_2 . Dann vereinfacht sich die Gl. (54) zu

$$M = e^{-k_{\infty} t_1} / e^{-(k_{\infty} + k_{H_2O}/d) t_1} = e^{k_{H_2O} t_1 / d} \quad (59)$$

und mit den Werten von $k_{H_2O} = 0.073$ und z.B. $t_1 = 5.5 \mu\text{sec}$ zu

$$M = e^{0.4/d} \quad (60)$$

Diese Funktion ist als Kurve b) in der Abb. 52 dargestellt.

Abschließend soll an einem Beispiel verdeutlicht werden, wie der Normierungsfaktor M von der Länge des Auswertebereiches Δt abhängt.

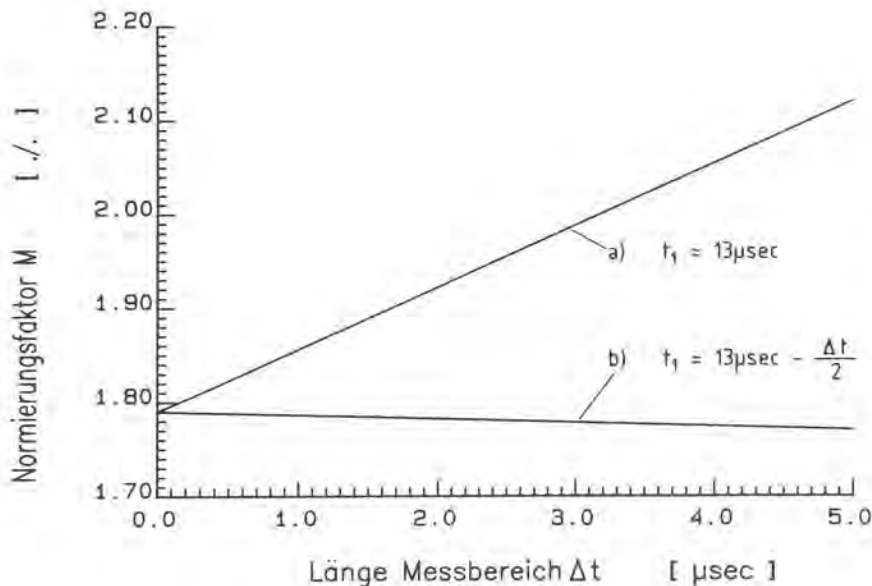


Abb. 53:
Berechnete Abhängigkeit des Normierungsfaktors M von der Länge des Auswertebereiches Δt ; berechnet nach Gl. (56) bzw. Gl. (58) für $\Delta t = 0$

Wird der Anfang des Auswertebereiches zeitlich konstant gehalten (Kurve a)) so steigt der Faktor M mit größer werdendem Δt an. Dies ist plausibel, da die Rückstreuamplitude $\bar{A}_S(t)$ eines Bleches endlicher Dicke bei größeren Schalllaufzeiten t kleiner wird. Wird dagegen die Mitte des Auswertebereiches zeitlich konstant gehalten (Kurve b), so bleibt M fast konstant. Es muß natürlich darauf geachtet werden, daß der Anfang t_1 nicht in den Oberflächenanteil des Rückstreusignals gelangt, was in der

Rechnung nicht berücksichtigt ist. (Die Ursache dafür, daß M auch im Falle b) nicht völlig von Δt unabhängig ist, liegt darin, daß $\bar{A}_g(\Delta t)$ durch arithmetische Mittelwertbildung aus einer nicht-linearen Funktion, nämlich einer Exponentialfunktion gebildet wird.)

Nach dieser Abhandlung über eine Methode zur Korrektur des Blechdickeneinflusses auf das Streusignal, kann nun auf das eigentliche Prinzip der zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung eingegangen werden. Diese wird durch eine Vergleichsmessung an Kalibrierblechen bekannter Korngröße und Dicke ermöglicht (Abb. 44, S. 56). Dabei wird die gemessene Streuamplitude $\bar{A}_g(\Delta t)$ mit dem für die jeweilige Dicke d gültigen Faktor M multipliziert, der Ausdruck $(\bar{A}_g(\Delta t) \cdot M)^{2/3}$ gebildet und aus den Einzelmessungen mittels Regressionsrechnung die Geradengleichung

$$D = C_1 + C_2 \cdot (\bar{A}_g(\Delta t) \cdot M)^{2/3} \quad (61)$$

bestimmt. Die Konstante C_1 hat dabei die Dimension einer Korngröße [μm] und C_2 als Proportionalitätsfaktor die Dimension $[(\text{mV})^{3/2}]$, wenn die Streuamplitude A_g z.B. als elektrische Spannung in [mV] vorliegt. C_2 hat in der Gl. (61) wegen des neu eingeführten Faktors M einen anderen Zahlenwert als in der Gl. (37), S. 56. Zur Korngrößenbestimmung an Blechen unbekannter Korngröße wird unter Kenntnis der Konstanten C_1 , C_2 und der Blechdicke d (aus der nach Gl. (55) der Normierungsfaktor M berechnet wird) die Streuamplitude $\bar{A}_g(\Delta t)$ gemessen und mittels der Gl. (61) die Korngröße D berechnet. Betrachtungen zur Genauigkeit dieses Meßprinzips werden im nächsten Kapitel 4.2 sowie im Kap. 5.5 bei der Diskussion des endgültigen Meßsystems an der Glühlinie durchgeführt.

4.2 Diskussion von Einflußparametern und Fehlergrößen

Auf das nach Gl. (61) erhaltene Meßergebnis wirken mehrere Einflußparameter ein:

- a) Genauigkeit der metallographischen Korngrößenbestimmungen an den Kalibrierblechen zur Bestimmung einer Kalibriergeraden wie in Abb. 44, S. 56
- b) Akustische Kopplung Prüfkopf/Blech (Abstand, Einfallswinkel)
- c) Wirkungsgrad der Apparatur, beschrieben durch den Wirkungsgrad des Prüfkopfes (sog. Einfügungsdämpfung), sowie durch die Geräteverstärkung

zu a) Abb. 54 zeigt, daß bei der metallographischen Korngrößenbestimmung nach dem Linienschnittverfahren stets eine Reststreuung der Meßergebnisse bleibt, auch wenn über sehr viele Körner gemittelt wird. Diese Reststreuung, quantitativ durch die Standardabweichung beschreibbar, wächst mit der mittleren Korngröße und beträgt bei $D = 13,8 \mu\text{m}$ ca. $0,5 \mu\text{m}$ und bei $D = 28,6 \mu\text{m}$ ca. $1,5 \mu\text{m}$. Da die zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung nach Gl. 61 mit Kalibrierblechen bekannter Korngröße durchgeführt wird, ist eine Angabe über den Fehler der Ultraschallmessung nur unter Berücksichtigung der Meßfehler bei der metallographischen Korngrößenbestimmung möglich. Das wird in den Kapiteln 5.5.1 und 6.2 näher erörtert.

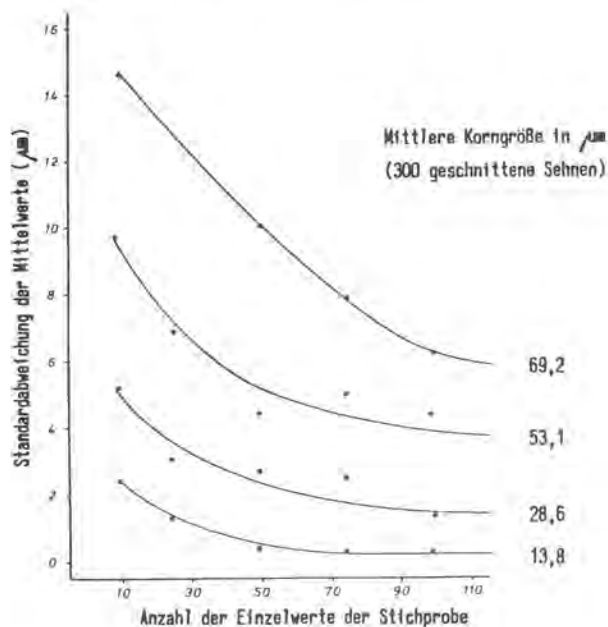


Abb. 54:
Standardabweichung der Mittelwerte von Stichproben in Abhängigkeit von der geschnittenen Sehnenzahl bei austenitischen Stählen unterschiedlicher Korngröße (nach /4/)

zu b) Der verwendete Prüfkopf hat bei einer Mittenfrequenz von 25 MHz und einem Schwingerdurchmesser von 6 mm eine Nahfeldlänge von ca. 170 mm. Da nach dieser Entfernung der Ultraschall auch im Medium Wasser schon erheblich geschwächt ist, muß im Nahfeld gemessen werden. Bei allen Versuchen wurde die Entfernung zwischen Prüfkopf- und Blechoberfläche in der akustischen Achse auf $a = 18.5$ mm eingestellt. Diese Entfernung entspricht ca. 0.1 Nahfeldlängen. Nach Abb. 8 nimmt in diesem Entfernungsbereich die Schallamplitude mit der Entfernung stetig ab, so daß Abstandsänderungen zu Änderungen in der Rückstreuamplitude führen. In Abb. 55 ist die gemessene Rückstreuamplitude \bar{A}_S als Funktion des Abstandes aufgetragen.

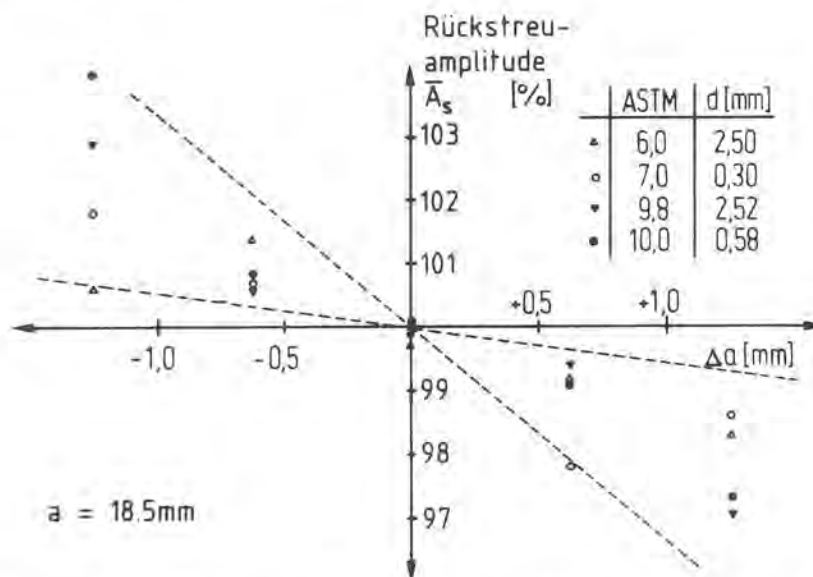


Abb. 55: Änderung der Streuamplitude als Funktion des Abstandes, gemessen an Blechen unterschiedlicher Korngröße und Dicke

Bei Abstandsänderungen $\Delta a = \pm 1$ mm ist der Meßfehler $< 3\%$. Wesentlich stärker ausgeprägt ist der Meßfehler bei Änderungen des Einfallswinkels, d.h. bei Abweichungen vom kritischen Winkel. In Kap. 3.4 wurde gezeigt, daß die Rückstreuamplitude beim kritischen Winkel maximal

ist. Abb. 56 verdeutlicht dabei, daß eine Abweichung vom kritischen Winkel von $\Delta\alpha = \pm 1^\circ$ bereits zu einer Erniedrigung der Streuamplitude von 30% führen kann. Das bedeutet aber für die Praxis, daß der Einfallswinkel sehr konstant gehalten werden muß, während sich geringe Abstandsschwankungen kaum auf das Meßergebnis auswirken.

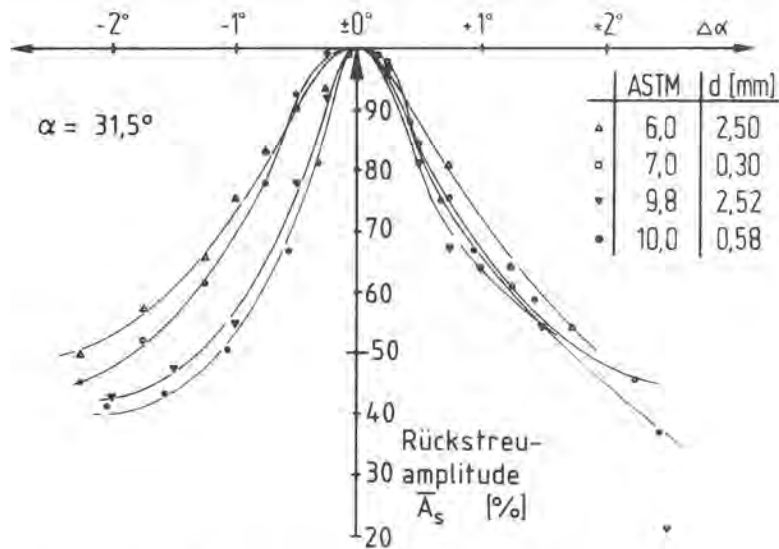


Abb. 56: Änderung der Streuamplitude als Funktion des Einfallswinkels, gemessen an Blechen unterschiedlicher Korngröße und Dicke

Ebenso können Schmutz und Gasblasen im Wasser sowie Ablagerungen aus dem Wasser auf dem Prüfkopf zu einer geringeren Rückstreuamplitude aus dem Blech führen, so daß die Messung einen zu kleinen Wert der Korngröße ergibt.

- zu c) Der Prüfkopf wandelt durch den piezoelektrischen Effekt einen elektrischen Nadelimpuls in der Größenordnung von 200 V Spitzenspannung in einen akustischen Ultraschallimpuls um. Dieser Effekt ist reversibel, wobei das empfangene Ultraschallsignal eine maximale Spannung in der Größenordnung von 100 mV hat. Der Wirkungsgrad eines Prüfkopfes wird prinzipiell durch das Verhältnis: empfangene Spannung/anregende Spannung beschrieben und "Einfügungsdämpfung" genannt (aus dem englischen Begriff

"insertion loss"). Der Wirkungsgrad ist z.B. vom Schwingermaterial sowie von der Bedämpfung abhängig. Bei handelsüblichen Prüfköpfen differiert dieser dabei stark, so daß die Gl. 61, S. 71 nur für einen einzigen Prüfkopf gilt und außerdem auch nur für eine konstante Geräteverstärkung. Wirkungsgrad und Empfangsverstärkung sind bei der Aufnahme der Kalibrierkurven vor allem für den Wert der Konstanten C_2 aus der Gl. 61 verantwortlich. Bei der Anwendung dieser Meßmethode in der Praxis sind daher konstante Verstärkungseigenschaften des Meßsystems unerlässlich und gegebenenfalls in regelmäßigen Abständen zu überprüfen.

4.3 Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Meßmethode für Messing- und Bronzebleche

Die Größe des Streukoeffizienten κ_s im Bereich der Rayleigh-Streuung nach den Gln. (6) und (7) hängt mit Ausnahme der Prüffrequenz f nur von Materialkenngrößen ab (Dichte ρ , Korngröße D , elastische Anisotropie ν , Schallgeschwindigkeiten c_L und c_T). Die Methode der Streuungsmessung zur Korngrößenbestimmung ist für alle polykristallinen Stoffe mit genügend großer elastischer Anisotropie anwendbar, d.h. nicht nur für austenitische Stähle, sondern z.B. auch für Messing, gilt aber streng genommen nur für einphasige Gefüge. Zur Bestätigung wurden Streuungsmessungen an Messing- und Bronzeblechen der quasi-einphasigen Legierungen CuZn 30 und CuSn 6 sowie an der 2-phasigen Legierung CuZn 37 mit dem in Abb. 14, S. 23 dargestellten Meßaufbau durchgeführt. Dazu standen zu jeder Legierung Blechproben mit den Dicken 0.5, 1.0 und 2.0 mm zur Verfügung. Für jede Blechdicke wurden 4 Proben mit unterschiedlichen Korngrößen im Bereich von $5 < D[\mu\text{m}] < 65$ hergestellt.

Wegen der geringeren Oberflächenwellengeschwindigkeit in Messing von $c_R = 1.91 \text{ mm}/\mu\text{s}$ und in Bronze von $c_R = 2.03 \text{ mm}/\mu\text{s}$

ergaben sich die kritischen Winkel $\alpha_K = 51^\circ$ bzw. $\alpha_K = 47^\circ$. Wegen des flacheren Schalleinfalls erstreckt sich aus geometrischen Gründen der Anteil der rückgestreuten Oberflächenwelle im Streusignal auf einen längeren Zeitbereich als bei den austenitischen Blechen (Abb. 38, S. 50). Daher müssen für die Auswertegrenzen t_1 und t_2 (Abschnitt 3.5.3) größere Werte angesetzt werden ($t_1 = 15 \mu\text{sec}$, $t_2 = 20 \mu\text{sec}$ nach Signalanfang). Zur Ermittlung und Korrektur des Einflusses der Blechdicke auf das Streusignal muß der Reflexionsfaktor R der Metall/Wasser-Grenzfläche betrachtet werden. Dieser ist bei Messing $R \approx 0.92$ und bei Bronze $R \approx 0.93$. Diese Werte sind mit denen von Stahl ($R = 0.935$) fast identisch. Daher gelten auch hier die im Kap. 3.5.3 getroffenen Überlegungen, und es wurde bei den hier untersuchten Blechen ein aus der Gl. (55), S. 68, berechneter Faktor M zur Dickenkorrektur verwendet.

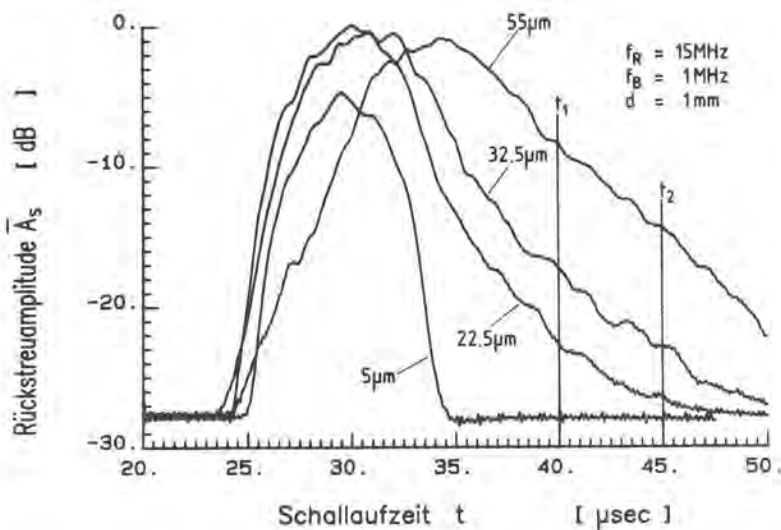


Abb. 57: Ortsgemittelte Rückstreusignale von 4 Blechen aus Messing CuZn 30 mit gleicher Dicke, aber unterschiedlicher Korngröße

Abb. 57 zeigt beispielhaft die Rückstreusignale von 4 Blechen unterschiedlicher Korngröße der Legierung CuZn 30 ($d = 1 \text{ mm}$). Bei der verwendeten Prüffrequenz von $f = 15 \text{ MHz}$ war beim Blech der Korngröße $55 \mu\text{m}$ die Grenze des Rayleighschen Streubereichs mit $D/\lambda \approx 0.35$ überschritten. Beim feinkör-

nigsten Blech, bei dem im Beispiel der Abb. 57 aus dem Volumenbereich mit der verwendeten Geräteverstärkung keine Ultraschallstreuung mehr zu messen ist, beträgt $D/\lambda \approx 0.04$. Für die Bleche mit den Korngrößen $D = 55, 33, 23 \mu\text{m}$ zeigt sich der erwartete Anstieg der Streuamplitude mit wachsender Korngröße im Volumenanteil.

In Abb. 58 ist für alle verwendete Bleche dargestellt, daß ein Ansteigen der Streuamplituden mit der Korngröße gemäß der Gl. (61) vorliegt, so daß eine zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung auch an rekristallisationsgeglühten Blechen aus anderen Materialien durchgeführt werden kann, sofern das Verhältnis D/λ im Rayleigh-Bereich liegt. - Aufwendiger dürfte allerdings die Anwendung der Meßmethode an Aluminiumblechen sein, das eine ausgeprägt kleine elastische Anisotropie hat. Daher dürften gemessene Rückstreusignale eine außerordentlich geringe Amplitude aufweisen, so daß zusätzliche apparative Maßnahmen getroffen werden müssen, z.B. um das elektrische Rauschen zu vermindern oder die Geräteverstärkung zu erhöhen.

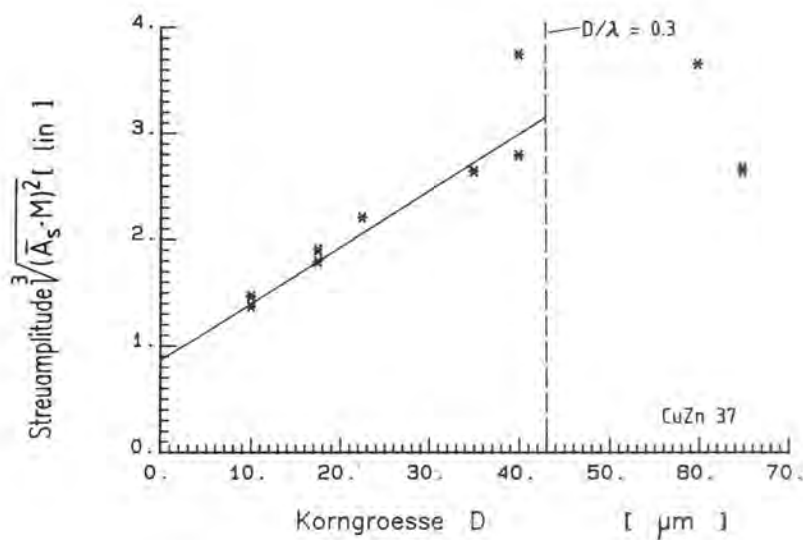
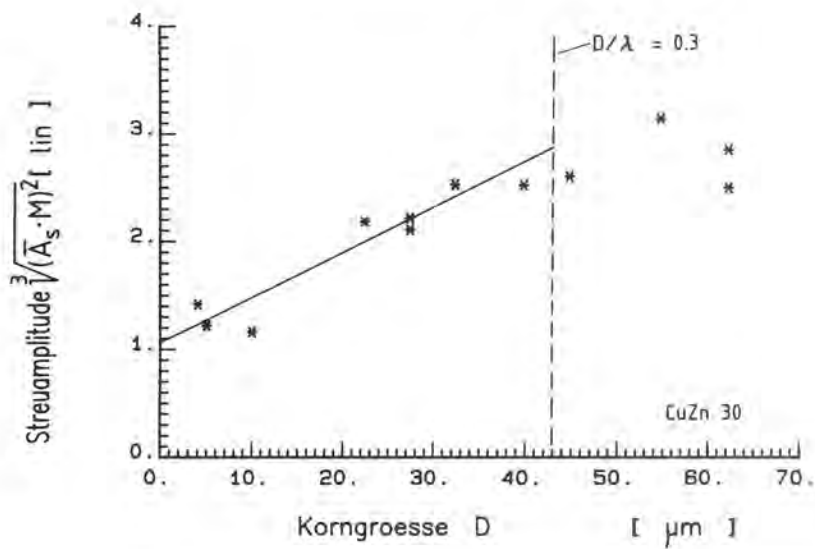
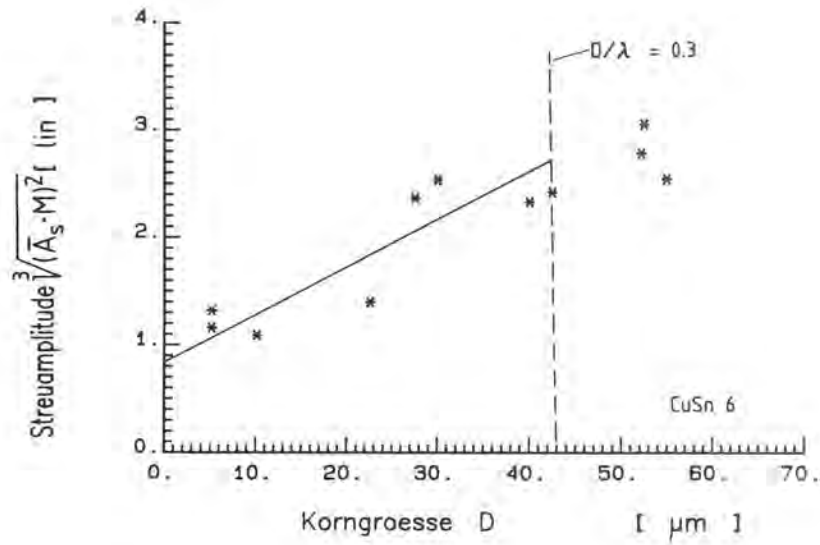


Abb. 58: Gemessene Abhängigkeit der Rückstreuamplitude von der Korngröße bei Bronze- und Messingblechen unterschiedlicher Dicke

5. Meßsystem zur kontinuierlichen zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an austenitischen Bändern in einer Durchlaufglühanlage

5.1 Randbedingungen und Zielsetzung

Das Meßsystem wird ausschließlich an einer Durchlaufglühanlage für austenitische Bänder eingesetzt. Diese haben, abhängig vom Chargengewicht und von der Dicke d , eine Länge l zwischen ca. $800 < l[\text{m}] < 4000$ bei einer Breite b zwischen $80 < b[\text{cm}] < 120$. Die Korngröße ist in der Regel über der Breite konstant /80/. Nach dem Abrollen von einer Haspel werden die Bänder durch einen etwa 30 m langen Ofen geführt, in dem die Abschlußglühung bei einer Temperatur von ca. $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ erfolgt. Die Glühzeit wird dabei durch die Bandgeschwindigkeit v vorgegeben, die $15 < v [\text{m}/\text{min}] < 40$ betragen kann. Durch die Glühung verzundern die Bleche an der Oberfläche stark. Dieser Zunder wird in einer ca. 100 m langen Beizstrecke chemisch entfernt. Die Bandgeschwindigkeit wird dabei abhängig von der Dicke so gewählt, daß einerseits beim Glühen die gewünschte Korngröße erreicht wird und andererseits die Bänder ausreichend sauber gebeizt werden. Bei nachlassender Qualität der Beize muß oft langsamer gefahren werden. Dadurch erhöht sich die Glühzeit, wodurch das Gefüge zu grobkörnig werden kann. Noch vorhandene Zunderpartikel werden in einer Bürstmaschine entfernt. Danach werden die Bänder heißdampfgetrocknet und wieder aufgerollt. Der Anfang eines neuen Bandes wird an das Ende des alten Bandes angeschweißt, so daß ein kontinuierlicher Glühprozeß vorliegt, der nur von Wartungsarbeiten oder Störfällen unterbrochen ist. Beim Anschweißen kommt es manchmal zu einem kurzzeitigen Bandstillstand (ca. 20 sec).

Das Meßsystem zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung am Band muß daher ebenfalls kontinuierlich mit sofortiger Ausgabe der Korngrößenwerte als Meßschrieb $D = f(t)$ oder $D = f(l)$ arbeiten. Dies wird durch ein vollautomatisch ohne manuelle Eingriffe arbeitendes System erreicht. Dazu gehört:

- a) daß alle zeitlich nicht veränderlichen Parameter des Meßprozesses wie Auswertebereich Δt im Rückstreusignal, Einfluß der Blechdicke auf das Streusignal, Mittelungsbedingungen usw. bekannt sind,
- b) daß zeitlich veränderliche Parameter wie Blechdicke, Abstand Prüfkopf-Blech, optimaler Einfallswinkel α_K (der z.B. von der Legierung abhängt), erkannt und korrigiert werden müssen,
- c) daß eine übersichtliche Meßwertausgabe erfolgt, z.B. Korngröße D über der Bandlänge l

Das in Kap. 3.1 (Abb. 14, S. 23) beschriebene Meßsystem und das in Kap. 4.1 beschriebene Meßprinzip sind an diese Anforderungen anzupassen, wie in den folgenden Abschnitten dargelegt wird.

5.2 Mechanisch-akustischer Teil des Meßsystems

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, müssen der Abstand zwischen Prüfkopf und Bandoberfläche und vor allem der Einfallswinkel α_K konstant sein. Zulässige Abstandsschwankungen liegen im Bereich von ± 1 mm, zulässige Schwankungen um den kritischen Winkel α_K bei $\pm 0.2^\circ$. Um dies zu erreichen, werden die Bänder mit Hilfe einer Umlenkrolle in ein Wasserbecken geleitet. Das Wasser dient zur akustischen Ankopplung. Die Bänder liegen straff an der Umlenkrolle ($\varnothing = 600$ mm), so daß das Band sich relativ zum Prüfkopf nicht bewegen kann. Das Wasserbecken befindet sich hinter der Bürsteinrichtung, so daß die Bandoberflächen bereits sauber sind und die Bänder Raumtemperatur haben. Der Prüfkopf wird von einer schrittmotorgesteuerten Manipulationseinrichtung unter Wasser geführt und schallt von unten auf die tiefste Stelle des an der Rolle anliegenden Bandes (Abb. 59). Der Einfallswinkel α ist dabei in der Richtung der Rollennachse veränderbar (nicht in der Bandrichtung). Abb. 60 zeigt, daß bei einer Einfallswinkeländerung $\Delta\alpha$ auch eine Abstandsänderung Δa auftritt, die jedoch nachgeregelt werden kann.

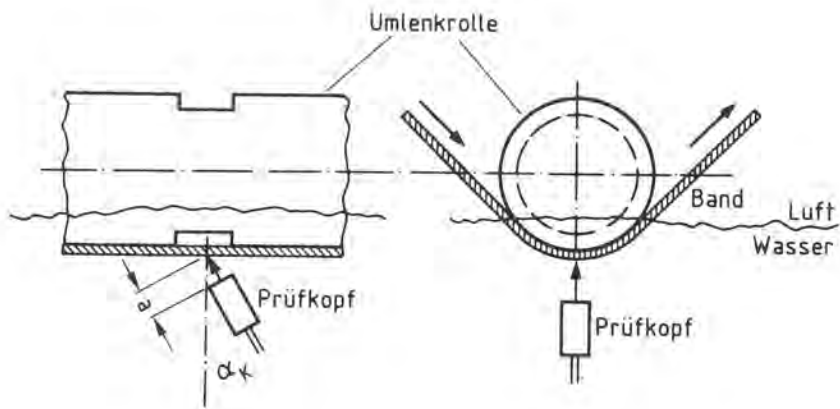


Abb. 59:
Prinzipielle Anordnung von Prüfkopf und Band an der Umlenkrolle (maßstäblich verzerrt)

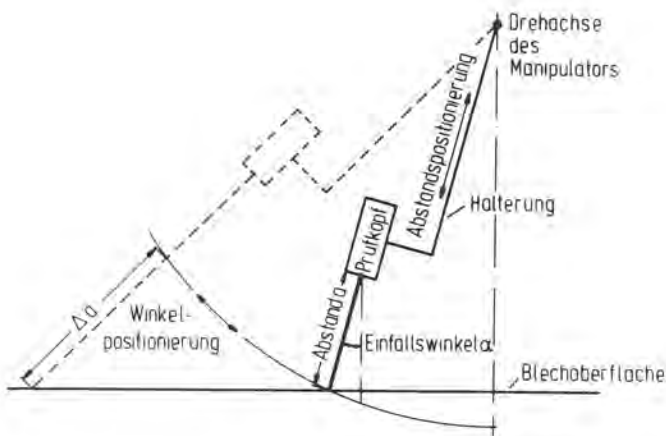


Abb. 60:
Darstellung der geometrischen Verhältnisse Manipulator/Prüfkopf/Blechoberfläche

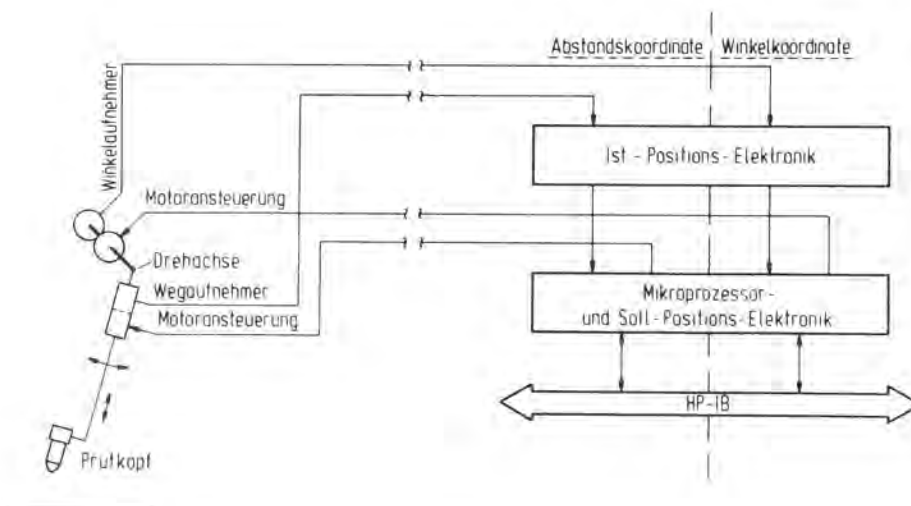


Abb. 61:
Übersicht über das Manipulationssystem

Der schematische Aufbau des Manipulationssystems ist in Abb. 61 dargestellt, die für diesen Aufbau entwickelte Abstandsnachregelung im Anhang A2. An der Stelle der beschallten Fläche in der Mitte des Bandes wurde ein 50 mm breiter Schlitz in der Führungsrolle angebracht, so daß sich auch an der Rückseite des Bandes an der Meßstelle Wasser befindet. Dadurch ist der Reflexionsfaktor an beiden Bandoberflächen gleich.

Der Prüfkopfmanipulator gestattet folgende Operationen:

- Änderung des Einfallswinkels in bezug zur Normalen auf der Blechoberfläche im Bereich zwischen 27° und 45° mit einer Auflösung und Genauigkeit von < 0.1 Grad.
- Änderung des Abstandes zwischen Prüfkopf und Blechoberfläche im Bereich zwischen 10 mm und 25 mm bei einem Winkel von ca. 31° mit einer Auflösung und Genauigkeit von ≤ 0.1 mm.
- Bedienung sowohl im Handbetrieb als auch im ausschließlich rechnergesteuerten Betrieb. Die Ankopplung des Manipulatorsystems an den steuernden Rechner zur Korngrößenbestimmung erfolgt über einen IEC-Bus (IEEE 488, HP-IB).
- Nach dem Erreichen einer vorgegebenen Sollposition oder im Fehlerfall wird durch das Manipulationssystem eine Bedienungsanforderung (SRQ) an den Rechner ausgegeben.
- Der Status des Manipulationssystems ist jederzeit vom Rechner detektierbar.

Als Prüfkopf wurde ein 25 MHz-Tauchtechnik Prüfkopf verwendet, der über ein 2 m langes doppelt abgeschirmtes 50 Ω -Kabel mit dem Ultraschallgerät verbunden ist. Der Prüfkopf wird im Anhang A1 näher spezifiziert.

5.3 Elektronischer Teil des Meßsystems

Abb. 62 zeigt das Blockschaltbild des gesamten Meßsystems zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung. Es besteht im

wesentlichen aus vier Gruppen,

- dem mechanisch-akustischen Teil (Bandführung, Prüfkopfmanipulation),
- der Analogelektronik (Ultraschallgeräte, Ultraschallanalysator),
- dem CAMAC-System als Rechnerschnittstelle zur Eingabe und Ausgabe analoger Daten,
- dem Prozeßrechner.

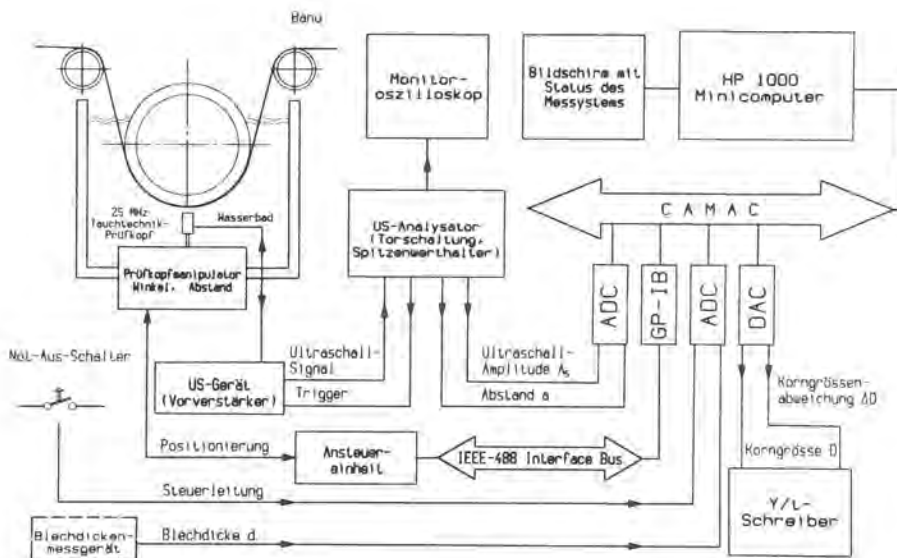


Abb. 62.: Blockschaltbild des Meßsystems zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung in austenitischen Bändern an einer Durchlaufglühanlage

Direkt am Tauchbecken befinden sich der Prüfkopfmanipulator und ein Ultraschallgerät (Panametrics 5052 PR), das als Sender und als Vorverstärker für die vom Prüfkopf empfangenen Ultraschallstreuungssignale dient. Nach der Vorverstärkung hat das Rückstreuungssignal eine Maximalspannung von ca. 2 V und läßt sich daher störungsfrei durch ein doppelt abgeschirmtes Kabel über 25 m Strecke übertragen, wo es von einem zweiten Ultraschallgerät empfangen wird. Die auf dieser Strecke stattfindende Dämpfung (bei dem verwendeten Kabeltyp vernachlässigbar frequenzabhängig) des hochfrequenten Ultraschallsignals muß bei der Kalibrierung des Meßsystems natür-

lich berücksichtigt werden. Das elektrische Rauschen wird durch die doppelte Schirmung weitgehend unterdrückt. Durch einen Ausreißertest im Meßprogramm, der in Kap. 5.4.2 beschrieben wird, und durch die Ortsmittelung der Meßwerte werden eventuelle Störsignale (z.B. von den Schaltrelais der Bürstmaschine) zusätzlich eliminiert.

Aus betriebstechnischen Gründen befindet sich die restliche Apparatur in einem von der Meßstelle ca. 25 m entfernten Schalthaus. Das vorverstärkte Rückstreusignal wird dort auf das zweite Ultraschallgerät gegeben (Panametrics 5052 UA), das nur als Empfänger arbeitet und eine Torschaltung besitzt sowie einen Spitzenwerthalter zur Messung der Amplitude im durch die Torschaltung ausgeblendeten Auswertebereich Δt . Mit Hilfe dieses Ultraschallgerätes kann bereits an dieser Stelle des Meßsystems die Streuamplitude A_S aus dem Volumenanteil des Streusignals ausgeblendet und zur Berechnung der Korngröße benutzt werden. Der im Meßaufbau nach Abb. 14, S. 23 benutzte Transientenrecorder und der als Bandpaßfilter benutzte Spektrumanalysator werden nicht mehr benötigt.

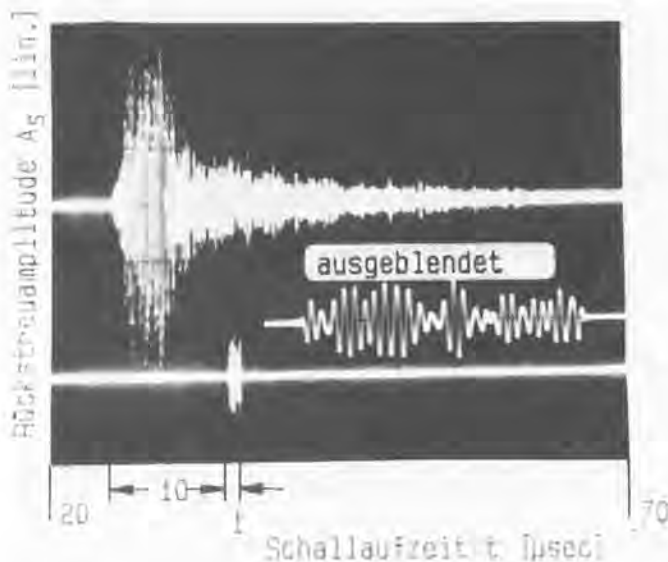


Abb. 63:

Typisches Rückstreusignal $A_S(t)$ eines austenitischen Bleches; Lage des Auswertebereiches Δt 10 μsec nach Signalanfang bei einer Länge von $\Delta t = 1 \mu\text{sec}$ (Auswertebereich Δt zusätzlich gespreizt dargestellt mit einer Zeitbasis von 0.2 $\mu\text{sec/Skt.}$)

Abb. 63 zeigt ein Streusignal und die zeitliche Lage des Tores (Auswertebereich). Im ausgeblendeten Bereich Δt wird vom Spitzenwerthalter die maximale Streuamplitude A_S gemessen, wobei das Streusignal und die zeitliche Lage des ausgeblendeten Bereichs Δt auf dem Monitoroszilloskop kontrolliert werden. Die zeitliche Lage, d.h. der Abstand des Tores vom Anfang des Streusignals ($10 \mu s$) wird durch eine geräteinterne Triggerschaltung konstant gehalten. Der wesentliche Unterschied zu den in Kap. 3 und Kap. 4 durchgeführten Messungen ist nun, daß im Bereich Δt keine arithmetische Mittelwertbildung über der Zeit mehr erfolgt (dies kann nur durch ein Rechnerprogramm erfolgen, nachdem das gesamte Rückstreusignal $A_S(t)$ bandpaßgefiltert und vom Transientenrekorder in den Rechner übertragen wurde). Es wird lediglich ein Amplitudenwert vom geräteinternen Spitzenwerthalter gemessen, nämlich die maximale Amplitude A_S im Auswertebereich Δt . Die Dauer des Auswertebereiches von nur $1 \mu s$ sowie die Tatsache, daß nur ein Amplitudenwert gemessen wird, ermöglichen es, die einfache Gl. (60), S. 70, zur Blechdickenkorrektur anzuwenden, da die Länge des Auswertebereiches in erster Annäherung $\Delta t = 0$ ist. Natürlich muß zur Korngrößenbestimmung weiterhin eine Ortsmittelung erfolgen; diese Problematik wird unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilungen der Streuamplituden als Funktion des Ortes (Bandlängenkoordinate 1) im Kap. 5.4.2 diskutiert werden. Die weiteren Betrachtungen werden zeigen, daß auch nach dieser Vereinfachung des Meßsystems (Messung der Streuamplitude bereits analog in einem sehr kleinen Auswertebereich Δt) gleichwertige Ergebnisse erhalten werden.

Der Spitzenwerthalter kann noch 30 MHz schnelle Signale verarbeiten und gibt eine amplitudenproportionale Spannung von 0-10 V aus. In Abb. 64 ist der Spannungswert des Spitzenwerthalters über der Amplitude eines Ultraschallsignals dargestellt. Die Amplitude wurde am Bildschirm eines Oszilloskops abgelesen. Die Kennlinie des Spitzenwerthalters ist bis zu einer Spannung von 800 mV herab völlig linear.

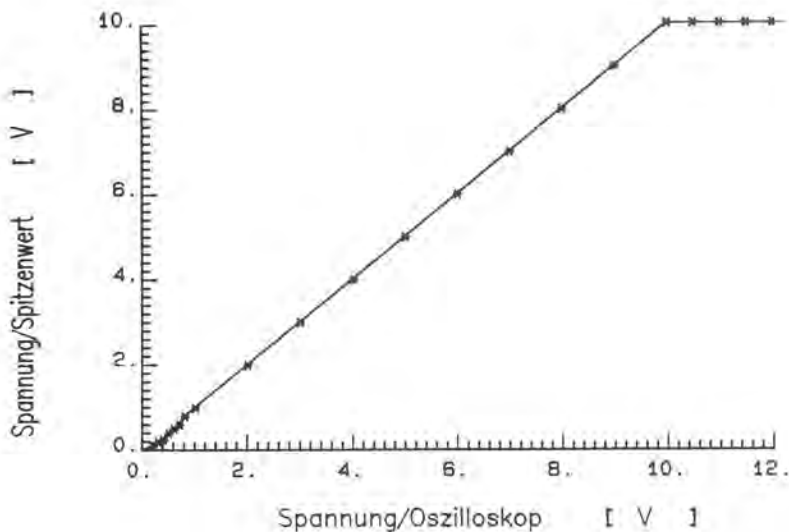


Abb. 64: Gemessene Kennlinie des Spitzenwerthalters im verwendeten Ultraschallgerät.

Neben der Streuamplitude A_S kann mit dem Ultraschallgerät der Abstand zwischen Prüfkopf und Blechoberfläche gemessen werden, welcher der Zeit zwischen dem synchronisierendem Sendeimpuls und dem Anfang des Rückstreusignals proportional ist. Die zu dieser Laufzeitmessung nötige Gerätemodifikation wird im Anhang A2 beschrieben.

Die analogen Gleichspannungswerte für den Spitzenwert der Ultraschallamplitude A_S im Auswertebereich des Rückstreusignals und für den Abstand zwischen Prüfkopf und Blech werden in ein 10 Bit Analog-Digital-Converter-Modul (ADC) des CAMAC-Systems gegeben. Das CAMAC-System, das im Anhang A1 eingehend beschrieben wird, dient als Schnittstelle zum Prozeßrechner. Über einen weiteren ADC wird der Wert für die Blechdicke erfaßt, die betriebsintern gemessen wird, sowie die Stellung eines Not-Aus-Schalters, der sich am Tauchbecken befindet. Bei Betätigung dieses Schalters wird der Prüfkopf sofort vom Band weg in eine Schutzposition verfahren. Die Ausgabe des Korngrößenwertes sowie der Korngrößenabweichung (dies ist eine wichtige Entscheidungsgröße, die zur Durch-

führung der automatischen Winkeloptimierung erforderlich ist und im Abschnitt 5.4.3 beschrieben wird) erfolgt über einen 10-Bit Digital-Analog-Converter auf einen y/t-Schreiber. Neben diesen Modulen zur Meßwertein- und -ausgabe befindet sich im CAMAC-System ein Modul zur Kopplung des Prozeßrechners mit dem Prüfkopfmanipulator über den IEC-Bus (HP-IB). Über die Ansteuereinheit ist den in Kap. 5.2 dargestellten Spezifikationen entsprechend hand- oder rechnergesteuerter Betrieb des Manipulators möglich.

Das Kernstück des Korngrößenmeßsystems stellt der steuernde Prozeßrechner dar. Wie bei der in Kap. 3.1 beschriebenen Meßeinrichtung wird ein Prozeßrechner der Fa. Hewlett Packard (HP 1000; 21/MX-F) benutzt, jedoch mit einem speicherorientierten Echtzeit-Betriebssystem (RTE-MIII). Die Meß- und Steuerperipherie wird über das CAMAC-System an den Rechner gekoppelt. Zur Darstellung des aktuellen Status des Meßsystems wurde ein Bildschirmsichtgerät (HP 2648A Terminal) verwendet. Die in diesem Terminal integrierten Laufwerke für Minimagnetbandkassetten werden zum Laden des Betriebssystems und des Meßprogramms benutzt.

5.4 Meßprogramm

5.4.1 Struktur des Meßprogrammsystems

Das Korngrößenmeßprogramm, das in FORTRAN 4X geschrieben wurde, hat im wesentlichen folgende Aufgaben zu erfüllen:

- a) laufende Ortsmittelung von gemessenen Streuamplitudenwerten A_g zur Bildung eines Wertes \bar{A}_g ,
- b) Berechnung des Normierungsfaktors M aus dem gemessenen Wert der Blechdicken d zur Korrektur des Einflusses der Blechdicke auf das Meßergebnis,
- c) Berechnung der Korngröße D gemäß Gl. (61, S. 71) aus C_1 , C_2 , \bar{A}_g und M und Ausgabe auf einen Schreiber über den Digital-Analog-Converter,
- d) Winkelnachregelung (Messung bei α_K),

e) Laufende Überprüfung der Meß- und Ergebniswerte, ob diese "sinnvoll" sind (Plausibilitätskontrolle).

Besonders die Lösung der letzten Aufgabe ist kennzeichnend für den vollautomatischen Betrieb der Anlage. Falls z.B. die Blechdicke plötzlich den Wert $d=0$ mm annimmt, der auf ein Versagen des Blechdickenmeßgerätes schließen läßt, wird die Korngrößenmessung unterbrochen und eine Störmeldung ausgegeben. Nach Beseitigung des Fehlers am betrieblichen Blechdickenmeßgerät, das auf der Messung des Abstandes zweier Rollen basiert, zwischen denen das Band läuft, und Übernahme eines gültigen Wertes in das Korngrößenmeßsystem startet der Meßvorgang sofort wieder.

Abb. 65 zeigt schematisch die Struktur des Meßprogramm-systems. Es besteht aus mehreren Einzelprogrammen, die einen definierten Programmablaufzyklus durchlaufen. Alle Einzelprogramme greifen dabei auf einen gemeinsamen Datenbereich zu (System Common), in dem Meß-, Ergebnis- und Steuerdaten enthalten sind. Nach dem Laden aller Einzelprogramme in den Prozeßrechner wird über ein Initialisierungsprogramm zunächst der Bildschirm mit der Darstellung des Systemstatus aktiviert und das Eingabeprogramm gestartet. Bei diesem einmaligen Vorgang am Beginn der Messung werden Daten eingegeben wie: Prüfkopf-Nummer, Konstanten C_1 und C_2 , Entscheidungskriterien für den Ausreißertest usw. Danach beginnt die Korngrößenmessung, wobei 4 Einzelprogramme gleichzeitig, jedoch mit unterschiedlicher Priorität arbeiten. Höchste Priorität besitzt das Meß-, Auswerte- und Ausgabeprogramm, so daß über den ADC alle 10 msec ein neuer Streuamplitudenwert A_s gemessen wird. Im gleichen Takt erfolgt auch die Ergebnisausgabe. Der Status des Meßsystems wird über das Bildschirm-ausgabeprogramm dagegen nur im 2 sec-Takt auf dem Bildschirm erneuert. Das CAMAC-Interrupt-Programm koordiniert rechnerintern den Zeitpunkt, wann die unterschiedlichen Module im CAMAC-System angesprochen werden, und das Manipulator-Programm wird beim Betätigen des Not-Aus-Schalters aktiviert oder wenn eine Winkeloptimierung eingeleitet werden soll. Die Entscheidungskriterien dazu werden in Abschnitt 5.4.3 behandelt.

Die Einzelprogramme sind dabei so miteinander verzahnt, daß der Meßzyklus kontinuierlich endlos abläuft. Die Messung offensichtlich falscher Werte, wie $A_s = 0V$, führt zwar zu einer Störmeldung und Unterbrechung der Korngrößenbestimmung, aber nicht zur Unterbrechung des Programmablaufzyklus.

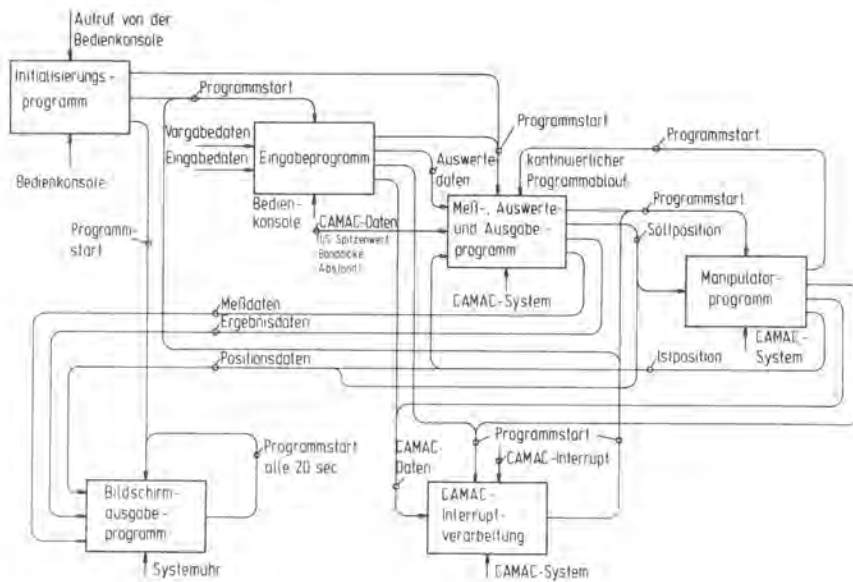


Abb. 65:
Struktur des
Meßprogramm-
Systems

5.4.2 Korngrößenbestimmung aus den vorhandenen Meßdaten

Nach Gl. (61), S. 71 wird die Korngröße aus folgenden Werten bestimmt:

- mittlere Streuamplitude \bar{A}_s , berechnet aus Werten der Einzelamplitude A_s
- Faktor M, durch den der Einfluß der Blechdicke korrigiert wird, berechnet nach der Gl. (60), S. 70
- Konstanten C_1 und C_2 , die die lineare Abhängigkeit zwischen D und $(\bar{A}_s \cdot M)^{2/3}$ beschreiben und die bei der Kalibrierung durch Messung an Blechen aus der laufenden Produktion erhalten werden, bei denen die Korngröße metallographisch bestimmt worden ist.

Während die Größen A_s und d mit dem Banddurchlauf veränderlich sind und laufend gemessen werden, sind C_1 und C_2 konstant, wenn die Verstärkungseigenschaften des Systems und der Wirkungsgrad des Prüfkopfes auch konstant bleiben. In

Abb. 66 ist nun der Datenfluß schematisch dargestellt, beginnend beim ursprünglichen Meßwert, der Amplitude des Streusignals A_s und endend beim Ergebnis der Auswertung, dem Wert für die Korngröße D . Die einzelnen Algorithmen werden im folgenden erläutert. Es handelt sich im wesentlichen um Mittelwertbildung, Ausreißertest, Berechnung des Faktors zur Blechdickenkorrektur. Der Algorithmus zur Bestimmung einer mittleren Korngrößenabweichung wird bei der Optimierung des Einfallswinkels benötigt und erst in Kap. 5.4.3 dargestellt.

Datenfluß bei der Korngrößenbestimmung mit dem Prototypmeßsystem

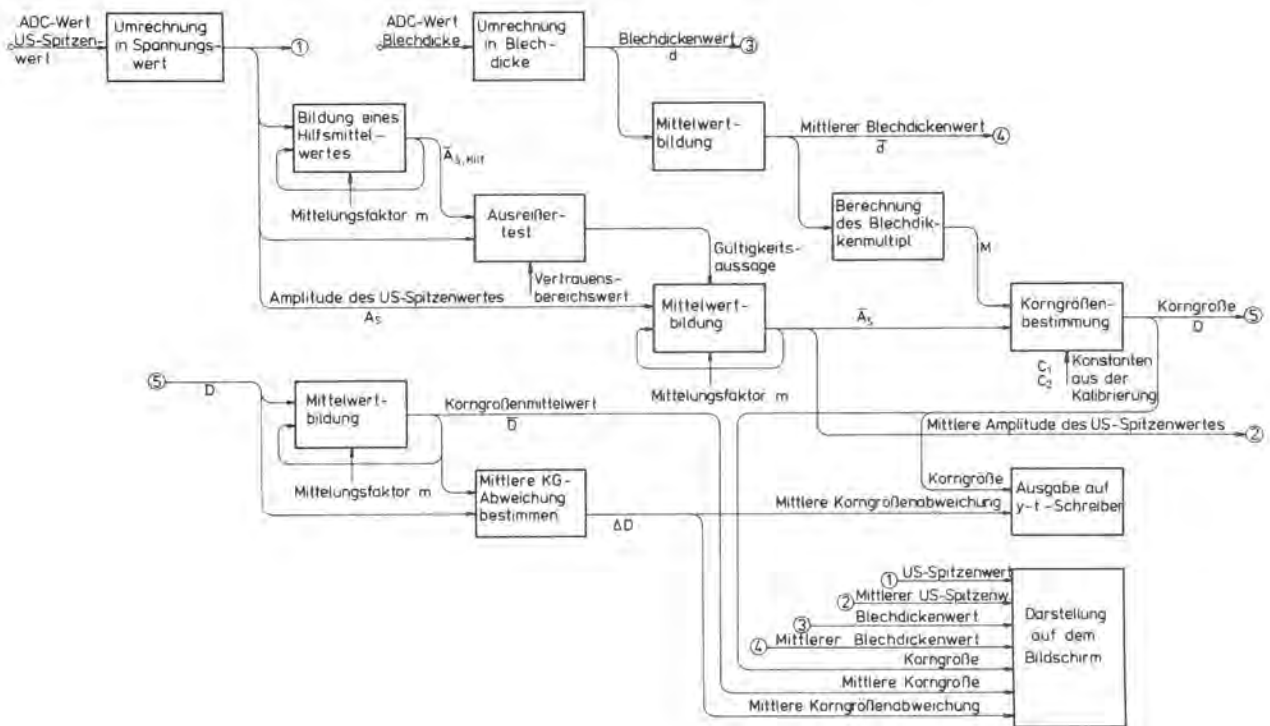


Abb. 66: Schematische Darstellung des Datenflusses bei der Korngrößenbestimmung an der Glühlinie.

a) Mittelwertbildung

Über den Analog/Digital-Wandler (ADC) erhält man, gegeben durch den Takt des Programmablaufzyklus, alle 10 msec einen neuen Wert der Streuamplitude A_s in Form einer zwischen 0 und 10 V liegenden Gleichspannung. Bei einer Bandgeschwindigkeit

keit von $v = 18 \text{ m/min}$ entspricht dies Längenintervallen von $\Delta l = 3.0 \text{ mm}$. In Abb. 67 wird für ein Blech der Korngröße $D=23 \text{ }\mu\text{m}$ gezeigt, wie der Einzelmeßwert A_S als Funktion der Ortskoordinate l schwankt.

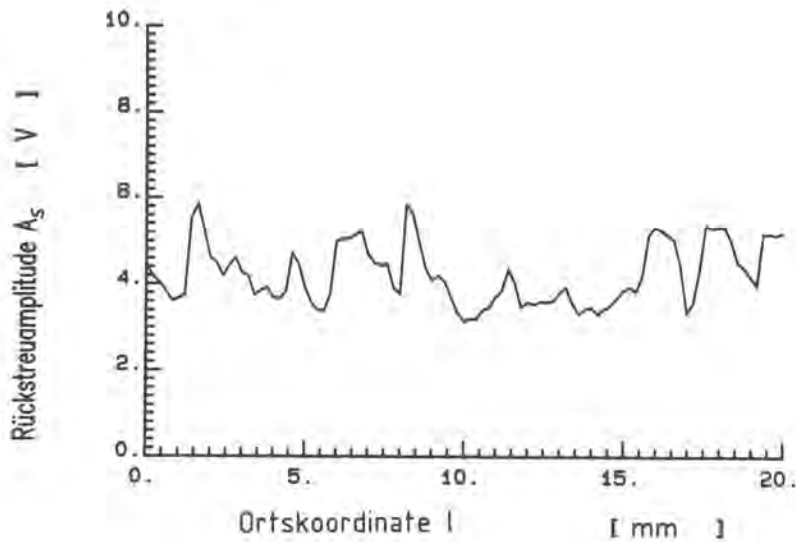


Abb. 67: Schwankung der gemessenen Streuamplituden A_S als Funktion der Ortskoordinate l bei einem Blech der Korngröße $D = 23 \text{ }\mu\text{m}$ und der Dicke $d = 1 \text{ mm}$

Auf einer Strecke von 20 mm wurde im Labor alle 0.2 mm ein Einzelmeßwert aufgenommen, wobei dieses Abtastraster fein genug ist, um alle Schwankungen der Streuamplitude A_S zu erfassen. In Abb. 68 ist für 5 Bleche mit unterschiedlichen Korngrößen sowie für das elektrische Rauschen dargestellt, wie die Einzelmeßwerte A_S schwanken. Dazu wurden über eine Strecke von ca. 1 m 30000 Streuamplitudenwerte A_S aufgenommen und mit Hilfe eines Auswerteprogrammes als Histogramm mit einer Balkenbreite von 0.1 V dargestellt.

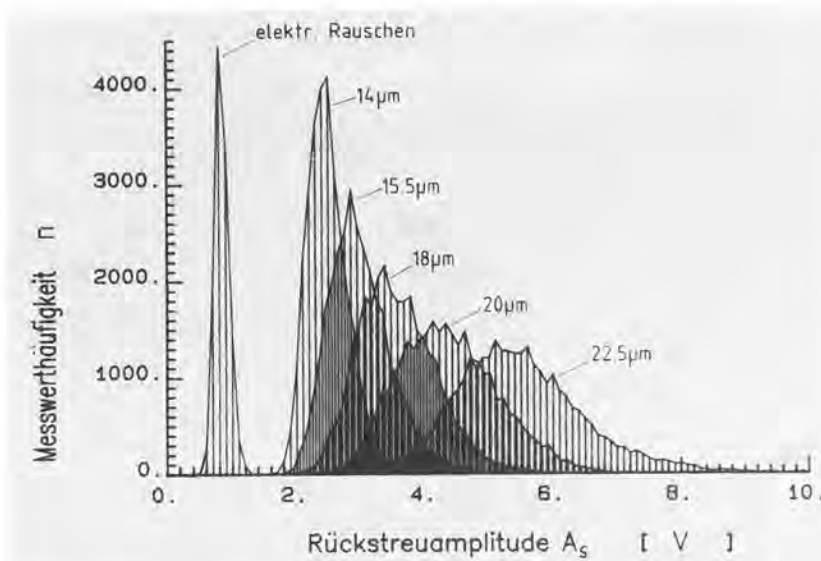


Abb. 68: Häufigkeitsverteilungen der unter den in Abb. 63 dargestellten Bedingungen gemessenen Streuamplitudenwerte A_s bei Blechen unterschiedlicher Korngröße ($d = 1 \text{ mm}$)

Die örtliche Schwankung der Einzelmeßwerte A_s im mm-Bereich ist nun nicht repräsentativ für örtliche Schwankungen der Korngröße im Makrogefüge, sondern resultiert aus Interferenzen der gestreuten Wellen im Bereich des Schallbündels /19, 81/, siehe Abb. 50, S. 62. Eine Aussage über die Korngröße im Gefüge kann daher nur über eine größere Länge, z.B. 2 cm wie in Abb. 67, und auch erst nach einer Ortsmittelung erfolgen. Da das Band mit konstanter Geschwindigkeit unter dem Prüfkopf durchläuft, ist die Mittelung über einen bestimmten Zeitraum eine Ortsmittelung der Meßwerte. Eine zum Ausgleich statistischer Schwankungen von Meßwerten sehr gut geeignete Methode zur Mittelwertbildung aus laufend anfallenden Daten wird in /82/ beschrieben: Es handelt sich um die "Mittelwertbildung mit eingefrorenem Korrekturfaktor", wobei im Takt der Eingabe der Einzelmeßwerte A_s auch die geglätteten Mittelwerte \bar{A}_s ausgegeben werden. Bei diesem Algorithmus, der ein digitales Tiefpaßfilter darstellt, werden die Einzelwerte A_s zur Bildung des Mittelwertes \bar{A}_s nicht diskret zusammengefaßt, sondern nur 2 Werte, nämlich der aktuelle Meßwert A_s und der alte Mittelwert $\bar{A}_s \text{ alt}$ vom vorigen Meßtakt, werden gewichtet bewertet:

$$\bar{A}_{S\text{ neu}} = (A_S + \bar{A}_{S\text{ alt}} \cdot (m-1)) / m \quad (62)$$

m ist dabei der "eingefrorene Korrekturfaktor" oder Mittelungsfaktor. $m = 1$ bedeutet, daß überhaupt nicht gemittelt wird. Wird $m = 100$ gewählt, so wird ein neuer Amplitudenwert A_S nur noch sehr schwach bei der Bildung von $\bar{A}_{S\text{ neu}}$ bewertet; d.h. \bar{A}_S hat nur noch eine geringe Schwankungsbreite. In Abb. 69, einem Meßschrieb für die Korngröße über der Meßzeit von der Glühlinie, ist der Einfluß des Mittelungsfaktors m auf das Meßergebnis deutlich zu erkennen.

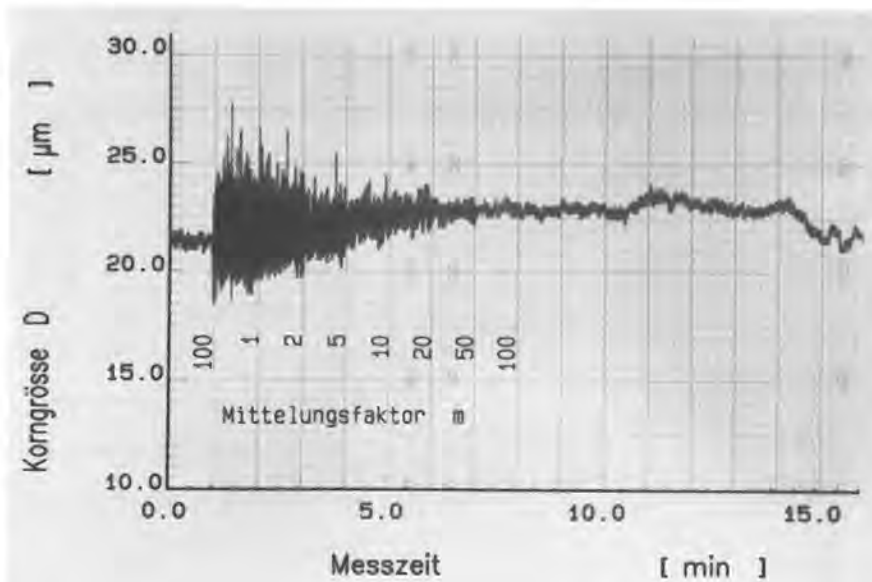


Abb. 69:
Korngößenmeßschrieb von der Glühlinie mit zwischenzeitlicher Variation des Mittelungsfaktors m .

Bei einem Faktor von $m = 100$ ist die Schwankungsbreite um den Korngrößenmittelwert ca. $\pm 0.25 \mu\text{m}$. Bei $m = 1$, d.h. ohne Mittelung, werden scheinbare Korngrößenschwankungen bis zu $5 \mu\text{m}$ auf dem Schrieb vorgetäuscht. Der Mittelungsfaktor m wurde mit $m = 100$ so gewählt, daß einerseits die statistischen Amplitudenschwankungen ausreichend geglättet werden, aber nicht echte Korngrößenschwankungen, die in der Praxis bedeutend langsamer auftreten, im schnellsten beobachteten Fall etwa mit $\Delta D = 0.2 \mu\text{m}$ pro m Bandlänge (siehe Abb. 96, S. 122, Ausschnitt a). Es sei dazu erwähnt, daß der in Gl. (62) dargestellte Algorithmus eines digitalen Tiefpasses bei einem Mittelungsfaktor von $m = 100$ spätestens nach ca. 500 Einzelwerten A_S immer auf den echten Mittelwert \bar{A}_S eingeschwungen ist, d. h. bei einem Meßtakt von 10 msec spätestens nach 5 sec.

Die Unterdrückung der Meßwertschwankungen kann auch anders beschrieben werden: Abb. 70 zeigt für ein Blech der Korngröße $D = 20 \mu\text{m}$ den Einfluß des Mittelungsfaktors m auf die Schwankungsbreite der ortsgemittelten Streuamplitude \bar{A}_S . Diese wird sehr anschaulich durch den Variationskoeffizienten V ausgedrückt:

$$V = (s_{\bar{A}_S} / \bar{\bar{A}}_S) \cdot 100 \quad [\%] \quad (63)$$

$\bar{\bar{A}}_S$ ist der arithmetische Mittelwert aus $n = 30000$ Einzelwerten \bar{A}_S . Die Anzahl n ist dabei unabhängig vom gewählten eingefrorenen Korrekturfaktor m . Ebenso ist $\bar{\bar{A}}_S$ bei identischer Verteilung der Einzelwerte A_S nicht von m abhängig, und daher gilt $\bar{\bar{A}}_S \equiv \bar{\bar{A}}_S$.

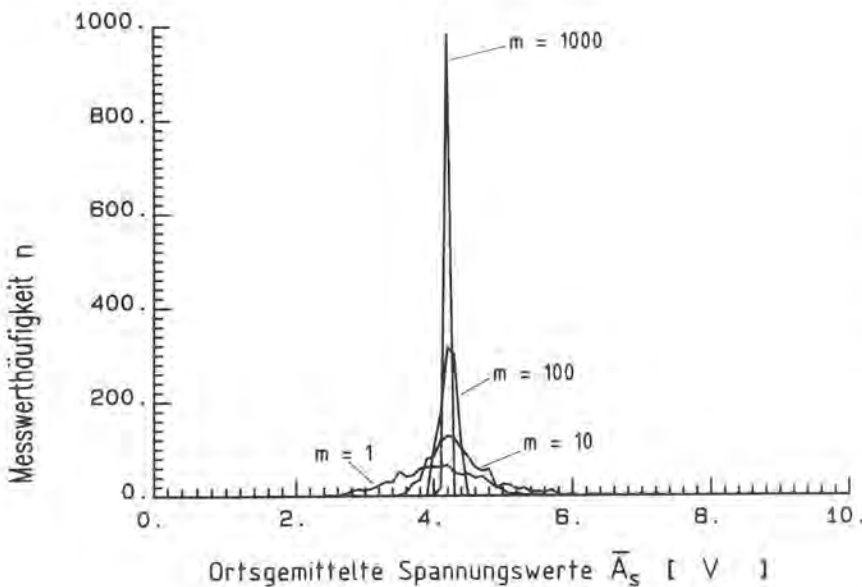


Abb. 70:

Gemessener Einfluß des Mittelungsfaktors m auf die Schwankungsbreite der ortsgemittelten Spannungswerte \bar{A}_S bei einem Blech der Korngröße $D = 20 \mu\text{m}$

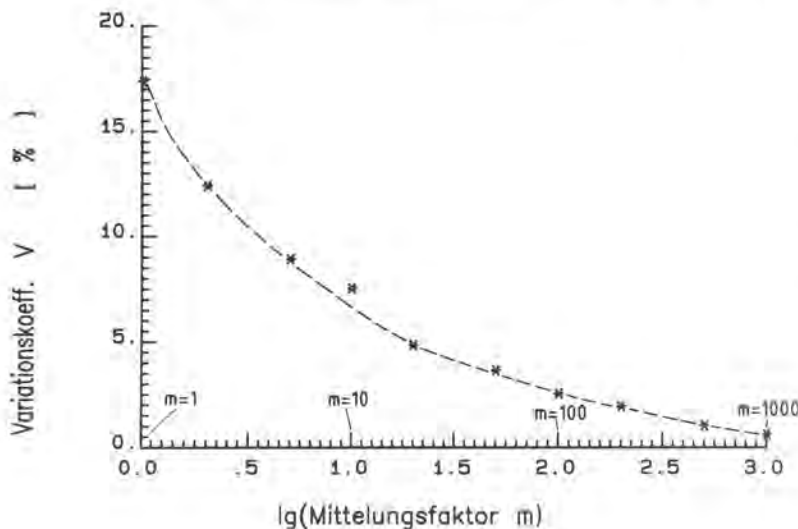


Abb. 71:

Abhängigkeit der gemessenen Variationskoeffizienten V vom Mittelungsfaktor m

Die Standardabweichung s wird dabei durch das Auswerteprogramm nach der üblichen Formel

$$s_{\bar{A}_s} = \left(\frac{\sum \bar{A}_s^2 - (\sum \bar{A}_s)^2/n}{n-1} \right) \quad (64)$$

berechnet. In Abb. 71 ist für die Messung aus der Abb. 70 (Band mit der mittleren Korngröße $D = 20 \mu\text{m}$) der Variationskoeffizient als Funktion des Mittelungsfaktors m dargestellt. Wie zu erwarten ist die Meßwertstreuung ohne Mittelung ($m = 1$) groß ($V \approx 18 \%$), bei einem Wert von $m = 100$ ist die Schwankungsbreite der nun geglätteten Werte erheblich kleiner ($V \approx 2.5 \%$).

Dieser Algorithmus zur Mittelwertbildung wurde an mehreren Stellen des Meßprogramms eingesetzt, u.a. auch um den Wert der Blechdicke d zu glätten, da auch die Blechdicke mit einer Schwankungsbreite im 1/100-mm-Bereich erfaßt wurde, die durch das eingesetzte Meßgerät gegeben ist.

b) Ausreißertest

Um den Einfluß auftretender elektrischer Störimpulse mit Spannungen $\gtrsim 8 \text{ V}$ im Ultraschall-Streusignal zu unterdrücken, z.B. durch die nahegelegene Bürstmaschine, wird zu jedem gemessenen Wert der Streuamplitude A_s ein Ausreißertest durchgeführt. Dazu wird zunächst nach Gl. (62) ein Hilfsmittelwert $\bar{A}_{s\text{Hilf}}$ gebildet. Ist der neu gemessene Amplitudenwert A_s größer als $(\bar{A}_{s\text{Hilf}} + 2.5)$, so wird dieser Wert A_s verworfen und nicht zur Bildung von \bar{A}_s zugelassen, dem Mittelwert, aus dem die Korngröße D berechnet wird. Das konstante Kriterium $A_s > \bar{A}_{s\text{Hilf}} + 2.5$ wurde in Laborversuchen empirisch ermittelt; um zusätzliche Rechenzeit zu vermeiden, wurde auf die Anwendung eines in der Statistik üblichen Kriteriums verzichtet (z.B. $A_s > \bar{A}_{s\text{Hilf}} + 4 \cdot s_{\bar{A}_{s\text{Hilf}}}$). Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß diese sowie die im folgenden beschriebenen Maßnahmen in einem Flußdiagramm in der Abb. 87, S. 114 zusammengefaßt sind.

c) Blehdickenkorrektur

Wie in der Abb. 63, S. 84 des Abschnitts 5.3 gezeigt, ist der durch die Torschaltung ausgeblendete Auswertebereich Δt des Streusignals mit $1 \mu s$ Dauer so klein gewählt, daß die Blehdickenkorrektur nach der einfachen Gl. (60), S. 70 durchgeführt werden kann. In der Praxis führte die Blehdickenkorrektur nach dieser Gleichung bei Blechen der Dicken $d < 0.6 \text{ mm}$ jedoch stets zu größeren Korngrößenwerten als metallografisch ermittelt. Diese Aussage gilt auch für die Blehdickenkorrektur mit Hilfe der für endliche Werte Δt gültigen Gl. (55), S. 68, wie daraufhin mit der in Abb. 14, S. 23 dargestellten Meßeinrichtung nachgewiesen werden konnte. Daher wurde die Blehdickenkorrektur an der Durchlaufglühanlage nach der empirisch ermittelten Gleichung

$$M = 1.5 \cdot e^{-d} + 1.0 \quad (65)$$

durchgeführt. Beide Gln. (60) und (65) sind in der Abb. 72 dargestellt.

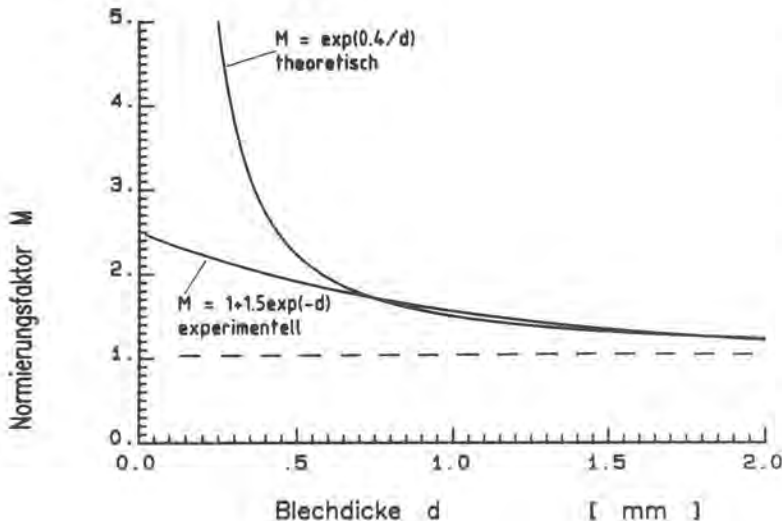


Abb. 72:
Vergleich des theoretisch ermittelten Normierungsfaktors M mit dem experimentell ermittelten als Funktion der Blechdicke

Der Grund für die schlechte Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis bei sehr dünnen Blechen könnte evtl. in den in Kap. 3.5.3 beschriebenen Vereinfachungen liegen, die bei der

Entwicklung des Formalismus zur Blechdickenkorrektur getroffen wurden. Diese angenommenen Vereinfachungen waren:

- Divergenz des Schallbündels vernachlässigbar,
- Ausbreitung der gestreuten Schallwellen senkrecht zu den Blechoberflächen,
- Betrachtung des Reflexionsfaktors nur für Longitudinalwellen.

Eine genaue Erklärung der Ursache dieser Nicht-Übereinstimmung, jedoch nur bei dünnen Blechen $d < 0.6$ mm, steht noch aus.

Auch durch die empirisch ermittelte Gl. (65) ist die Blechdickenkorrektur einfach durchzuführen. Die Rechenzeit für eine Exponentialfunktion ist mit 72 msec jedoch noch recht groß und verlangsamt den gesamten Meßtakt. Daher wurde im Computerprogramm eine Wertetabelle für die Gl. (65) erstellt, bestehend aus 191 Einzelwerten im Bereich von 0.1 bis 2.0 mm und mit einer Abstufung von 0.01 mm. Die Zugriffszeit des Rechners auf diese Tabelle ist erheblich kürzer als das Berechnen der Exponentialfunktion, so daß ein Meßtakt von ca. 10 msec erzielt werden konnte, in dem alle Messungen, Berechnungen und Ausgaben von Werten enthalten sind.

d) Berechnung der Korngröße

Die Korngrößenbestimmung erfolgt nun gemäß Gl. (66), wobei C_1 und C_2 konstant vorliegen und die Korngröße D im selben Takt ausgegeben wird, in dem A_s und d gemessen sowie \bar{A}_s und M berechnet werden.

$$D = C_1 + C_2 \cdot (\bar{A}_s \cdot M)^{2/3} \quad (66)$$

5.4.3 Automatische Winkeloptimierung

Da der optimale Einfallswinkel α_k von der Schallgeschwindigkeit c_R abhängt (Gl.(24), S. 20), sind bei Bändern mit unterschiedlichen Legierungsgehalten auch unterschiedliche kritische

Winkel zu erwarten. Abb. 73 zeigt die an der Glühlinie gemessenen Werte α_k von 40 Bändern. Mit Ausnahme des Bandes bei $\alpha_k = 32^\circ$ (X 5 CrNiMo 18 10, Werkstoff-Nr. 1.4401) und bei $\alpha_k = 32,1^\circ$ (X 10 CrNiTi 18 9, Werkstoff-Nr. 1.4541) hatten alle Bänder die Qualität X 5 CrNi 18 9, Werkstoff-Nr. 1.4301.

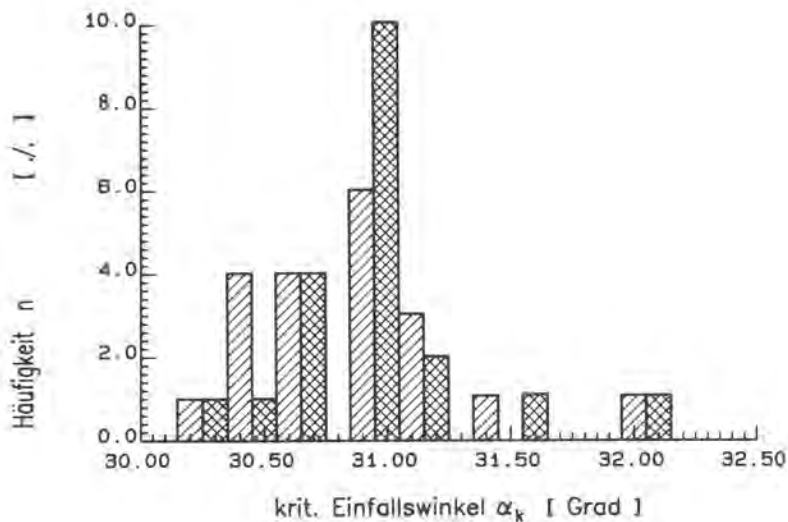


Abb. 73:
Häufigkeit der
bei 40 Bändern
aufgetretenen
kritischen
Winkel α_k

Der Winkelbereich $30,2 < \alpha_k [^\circ] < 32,1$ entspricht nach Gl. (24) einem Schallgeschwindigkeitsbereich der Oberflächenwelle von $2,94 > c_R [\text{mm}/\mu\text{sec}] > 2,79$. Bei einem neuen Band muß also überprüft werden, ob der eingestellte Einfallswinkel α_k noch optimal ist, d.h. eine maximale Rückstreuamplitude A_S gemessen wird. Abb. 74 zeigt anhand eines Meßschriebes von einem 1 mm dicken Band der Länge 1800 m, wie sich der Meßwert für die Korngröße durch einen falschen Einfallswinkel verringert. Ausgehend von einem Einfallswinkel von $\alpha = \alpha_k - 1,5^\circ$ bei $l = 980$ m wurde der Winkel α in Schritten von $0,1^\circ$ bis zu $\alpha = \alpha_k + 1,5^\circ$ an der Stelle $l = 1320$ m verändert. Jede Winkelposition wurde 20 sec. beibehalten.

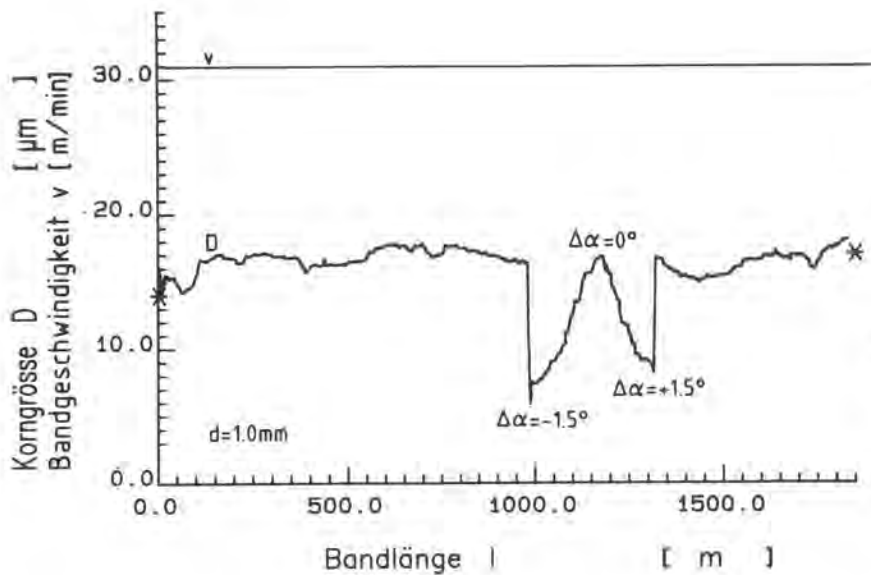


Abb. 74:
Einfluß des Einfallswinkels α auf das Meßergebnis (vgl. Abb. 56, S. 74)

Zur Winkeloptimierung wurde ein Algorithmus erstellt, der nach einem iterativen Verfahren arbeitet, das in Abb. 75 dargestellt ist: Von einem Einfallswinkel α aus wird der Prüfkopf zunächst mit einer Schrittweite von 1° zu einem kleineren Winkel verfahren. Ist bei diesem Winkel die gemessene Rückstreuamplitude größer, so würde der Prüfkopf mit derselben Schrittweite in die gleiche Richtung verfahren und erneut gemessen und verglichen. Ist die gemessene Amplitude kleiner, so wird die Verfahrerrichtung umgedreht und die Schrittweite auf 0.5° verkleinert. Diese Prozedur wiederholt sich, bis bei der kleinsten Schrittweite von 0.1° das Maximum der Rückstreuamplitude erreicht ist.

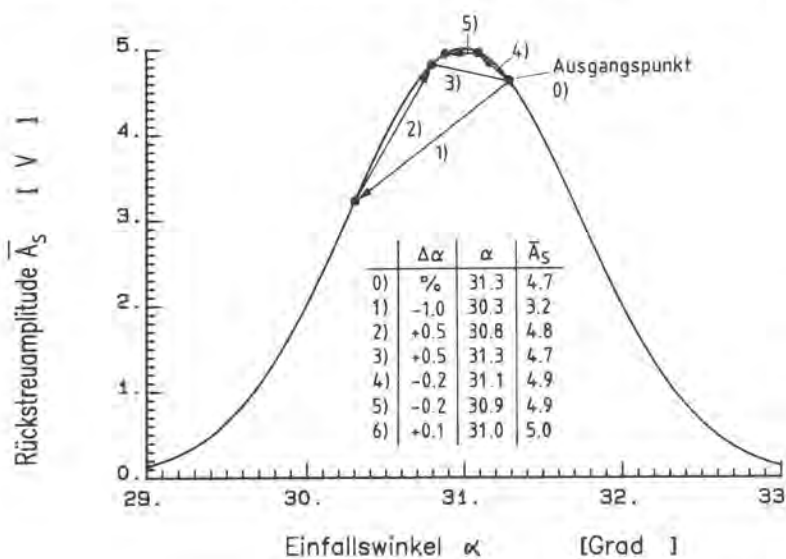


Abb. 75.:
Iteratives Verfahren zur Bestimmung des kritischen Winkels ($\alpha_K = 31^\circ$ in diesem Beispiel)

Bei jedem Einfallswinkel α treten die Streuamplitudenwerte A_S mit einer Schwankungsbreite auf, so daß auch bei der Winkeloptimierung für jede feste Winkelposition über einen gewissen Zeitraum eine Ortsmittelung durchgeführt werden muß. Dazu wird - anders als bei der laufenden Korngrößenmessung - eine bestimmte Anzahl n von Amplitudenwerten A_S aufaddiert und der arithmetische Mittelwert \bar{A}_S gebildet. Die Anzahl n kann vorgewählt werden. In der Abb. 76 ist die Dauer der Winkeloptimierung über der Anzahl n der pro Winkelposition gemessenen Einzelwerte A_S aufgetragen. Wird pro Winkel nur ein Amplitudenwert gemessen, so ist die Optimierungsdauer natürlich am kürzesten und wird lediglich durch die Geschwindigkeit der Manipulation bestimmt.

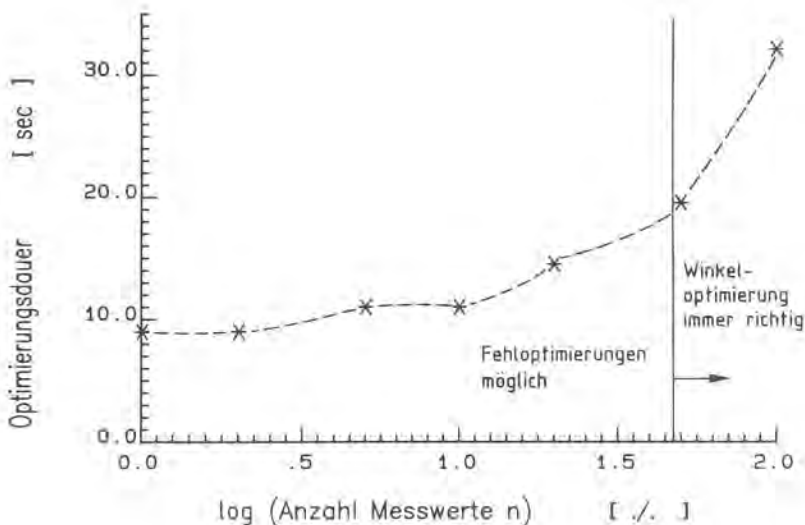


Abb. 76:
Dauer der Winkeloptimierung bei unterschiedlicher Anzahl n von Einzelmeßwerten der Streuamplitude A_S

Da der einzelne Amplitudenwert A_S jedoch eine viel zu unzuverlässige Größe darstellt, ergaben sich bei $n = 1$ fast ausschließlich Fehlpositionierungen bei der Winkeloptimierung. Erst als 50 Einzelwerte gemittelt wurden ($\log 50 = 1.7$) gab es kein falsches Optimierungsergebnis mehr, und es wurde immer der kritische Winkel erreicht. Die Optimierungsdauer beträgt dann allerdings 20 sec. Bei einer maximalen Bandgeschwindigkeit von $v = 40$ m/min entspricht dies einem Bandabschnitt von ca. 14 m, dessen Korngrößenwerte nicht erfaßt werden können. -

Die Entscheidungskriterien, die zu einer Winkeloptimierung führen, werden im Abschnitt 5.5.3 erläutert.

5.5 Einstellung und Arbeitsweise des Meßsystems

Bevor im Kap. 6. die Messungen an der Durchlaufglühanlage und ihre Ergebnisse beschrieben werden, soll zunächst die Arbeitsweise des Meßsystems verdeutlicht werden:

5.5.1 Kalibrierung und Einstellung des Meßsystems

Vor den Messungen an der Glühlinie muß das Meßsystem im Labor einmal kalibriert werden, z.B. an 5 Blechen mit bekannter, vorher metallographisch bestimmter Korngröße der Dicke $d = 1 \text{ mm}$. Mit Ausnahme des Prüfkopfmanipulators, der fest an der Durchlaufglühanlage installiert ist, wird dazu die in Abb. 62, S. 83 dargestellte Apparatur benutzt.

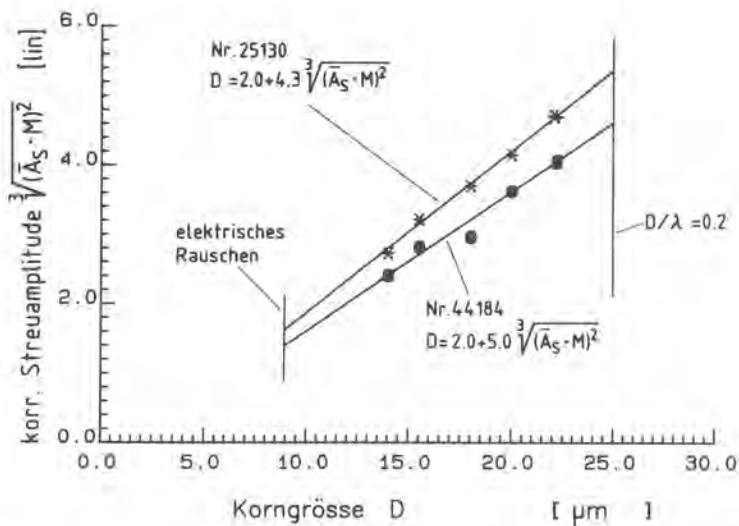


Abb. 77:

Kalibriergeraden zweier Prüfköpfe, erhalten aus den gemessenen Rückstreuamplituden von 5 Blechen bekannter Korngröße und nachfolgender linearer Regressionsrechnung

Abb. 77 zeigt die gemessenen Kalibriergeraden für 2 Prüfköpfe mit leicht unterschiedlichem Wirkungsgrad. Die untere Gültigkeitsgrenze dieser Geraden liegt bei $D \cong 9 \mu\text{m}$, verursacht durch das elektrische Rauschen mit einer gemessenen scheinbaren Streuamplitude von ca. 0.9 V (Abb. 68, S. 92). Die obere Gültigkeitsgrenze von ca. $25 \mu\text{m}$ liegt in der Grenze des

Rayleighschen Streubereiches von $D/\lambda \approx 0.2$ begründet (Abschnitt 2.2.1). Eine genauere Betrachtung der Gültigkeitsgrenzen unter Einbeziehung der Blechdicke sowie der Geräteverstärkung wird im folgenden durchgeführt.

In der Abb. 68, S. 92 sind die Verteilungen der gemessenen Amplitudenwerte A_s für 5 Bleche unterschiedlicher Korngröße dargestellt. Mit dem arithmetischen Mittelwert \bar{A}_s der gemessenen Einzelwerte A_s wächst auch dessen Standardabweichung s . Dies ist quantitativ in Abb. 78 dargestellt.

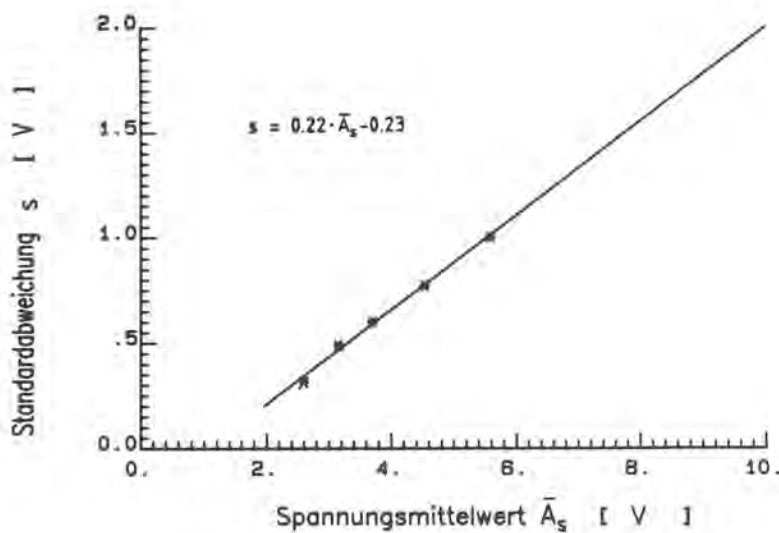


Abb. 78:
Standardabweichung s
der Einzelmeßwerte A_s
als Funktion
des gemessenen
Spannungsmittelwertes
 \bar{A}_s für 5 Bleche
unterschiedlicher
Korngröße
(siehe Abb. 68, S. 92)

Die durch Regressionsrechnung ermittelte Geradengleichung (67) wurde bis zu einem Spannungsmittelwert von 10 V extrapoliert.

$$s_{A_s} = 0.22 \bar{A}_s - 0.23 \quad (67)$$

Der in der Meßapparatur benutzte Spitzenwerthalter sowie der Analog/Digital-Wandler (ADC) haben jedoch nur einen Meßbereich von 0 - 10 V, wobei im Meßprogramm Streuamplitudenwerte > 10 V gleich 0 V gesetzt wurden. Das bedeutet, daß bei Spannungsmittelwerten $\bar{A}_s \gtrsim 6$ V die gesamte Verteilung der Streuamplituden A_s vom ADC nicht mehr gemessen werden kann, so daß sowohl bei der arithmetischen als auch für die laufende Mittelung ein

falscher Mittelwert \bar{A}_S berechnet wird, wie die Abb. 79 verdeutlicht.

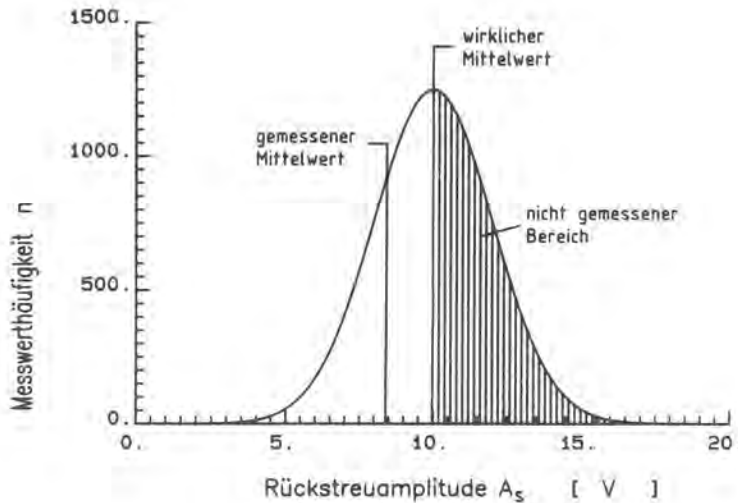


Abb. 79:

Angenommene Normalverteilung der Streuamplituden A_S mit einem Mittelwert $\bar{A}_S = 10$ V. Gemessener Mittelwert bei 8.4 V durch Meßbereichsbegrenzung $0 < A_S [V] < 10$

Dies ist quantitativ unter Annahme normal verteilter Meßwerte A_S anhand der Gl. (67) berechnet und in Abb. 80 dargestellt worden. Der maximal meßbare Spannungsmittelwert beträgt $\bar{A}_S = 8.7$ V, auch wenn der wirkliche Mittelwert viel größer ist. Bis zu 6.5 V besteht eine völlige Übereinstimmung zwischen wirklichem und gemessenem Spannungsmittelwert, bei gemessenen 7.1 V beträgt der Fehler 1 %, bei 8.2 V 10 %.

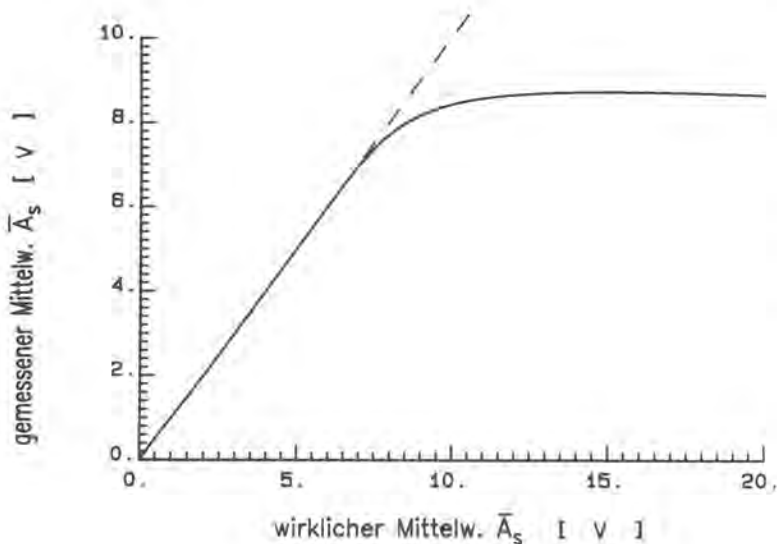


Abb. 80:

Berechnung zum Wert des gemessenen Mittelwertes \bar{A}_S einer Streuamplitudenverteilung als Funktion des wirklichen Mittelwertes \bar{A}_S für den Meßbereich $0 < A_S [V] < 10$

Das bedeutet für die Praxis, daß die Geräteverstärkung so einzustellen ist, daß diese meßtechnische Obergrenze des ortsgemittelten Streuamplitudenwertes \bar{A}_S mit der Obergrenze des Rayleighschen Streubereiches von $D/\lambda \approx 0.2$ zusammenfallen sollte. Dabei ist jedoch zusätzlich der Einfluß der Blechdicke d zu betrachten, denn bei gleicher Korngröße D ist der Mittelwert der Streuamplitude \bar{A}_S bei einem dünnen Blech kleiner. Abb. 81 faßt alle Einflußgrößen zusammen und stellt den Dynamikbereich der Korngrößenbestimmung bei der gewählten Geräteverstärkung dar, berechnet aus der Gl. (65), S. 96 sowie der in Abb. 77 angegebenen Gleichung für den Prüfkopf Nr. 44184. Es zeigt sich, daß bei dünneren Blechen grobkörnigeres Gefüge (z.B. mit einer 1%igen Abweichung vom echten Spannungsmittelwert) meßtechnisch erfaßt werden kann als bei dickeren Blechen, verursacht durch den höheren Streuamplitudenmittelwert \bar{A}_S beim dickeren Blech.

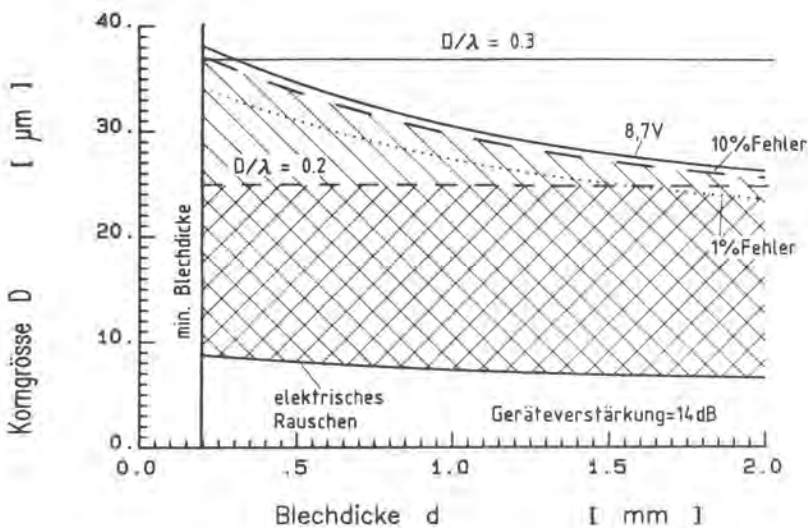


Abb. 81:

Diagramm zur Abschätzung des Dynamikbereiches der Korngrößenmessung

////= mit Berücksichtigung des Rayleigh-Streubereiches;

\\/= ohne Berücksichtigung des Rayleigh-Streubereiches

Allerdings muß noch der Gültigkeitsbereich der Rayleigh-Streuung in Betracht gezogen werden: Bei $D/\lambda \leq 0.2$ kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, daß eine lineare Abhängigkeit zwischen der Korngröße D und der Streuamplitude $(\bar{A}_S)^{2/3}$

gemäß Gl. (66) vorliegt; der Bereich $0,2 \lesssim D/\lambda \lesssim 0,3$ stellt einen Übergangsbereich zur stochastischen Streuung dar.

Ebenso stellt die untere Grenze in Abb. 81, verursacht durch das elektrische Rauschen, keine Gerade dar. Dies ergibt sich aus der Multiplikation des zugehörigen Spannungsmittelwertes mit dem Normierungsfaktor M zur Blechdickenkorrektur, der mit wachsender Blechdicke kleiner wird. Die Abb. 82 zeigt die gemessene Abhängigkeit der Amplitude des elektrischen Rauschens von der eingestellten Geräteverstärkung. Diese Abhängigkeit ist bei dem verwendeten Gerätesystem wegen der hohen eingestellten Geräteverstärkung nicht linear. Dies ist wichtig, wenn der Einfluß der Verstärkung auf den Dynamikbereich der Korngrößenbestimmung betrachtet werden soll.

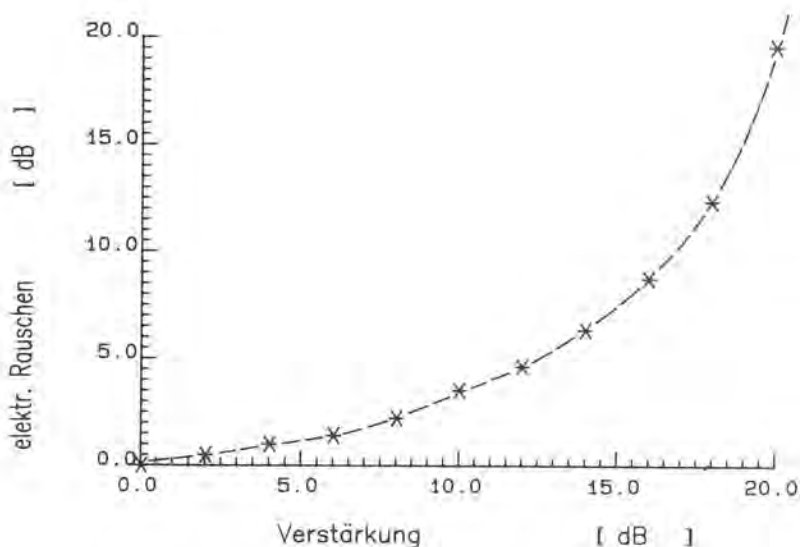


Abb. 82:

Gemessener zeitlicher Mittelwert der Amplitude des elektrischen Rauschens der Meßapparatur nach Abb. 62, S. 83, als Funktion der eingestellten Geräteverstärkung

Abb. 83 zeigt - im Vergleich mit der Abb. 81 - den Dynamikbereich, wenn die optimale Verstärkung um 4 dB zu niedrig bzw. zu hoch eingestellt wurde. In beiden Fällen ist die Untergrenze der Korngrößenbestimmung, verursacht durch das elektrische Rauschen, leicht angestiegen. Bei zu hoher Geräteverstärkung senkt sich die Obergrenze, bei geringerer Verstärkung wird sie angehoben. Mit der Zielsetzung, daß Bleche im Korngrößenbereich von $10 \leq D [\mu\text{m}] \leq 25$ gemessen werden sollen, wurde die Geräteverstärkung entsprechend Abb. 81 eingestellt.

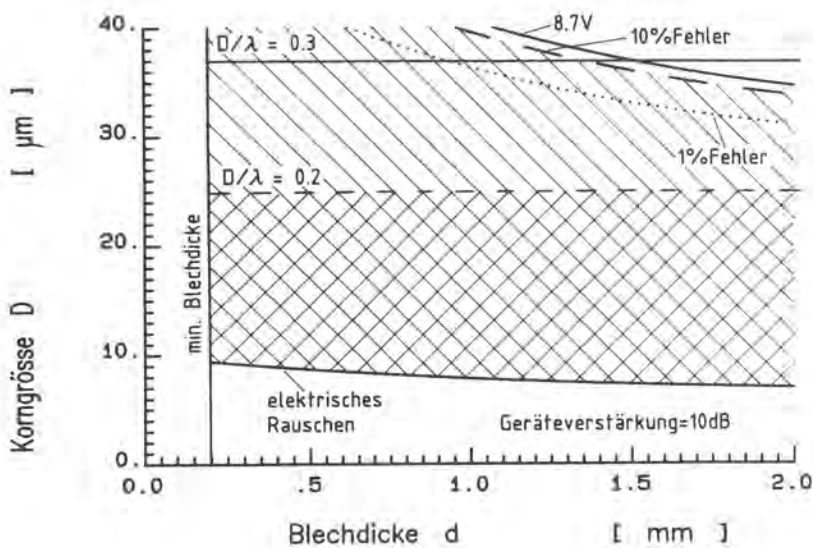
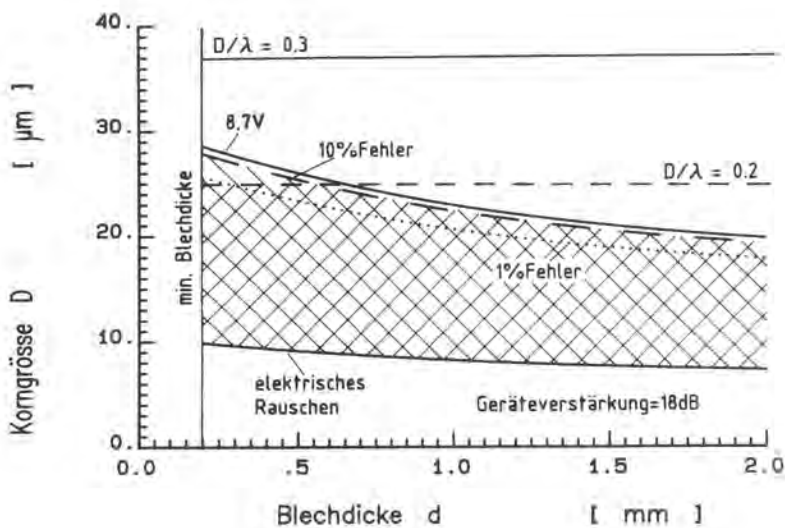


Abb. 83:
wie Abb. 81,
oben:
Gerätever-
stärkung zu
niedrig



unten:
Gerätever-
stärkung zu
hoch

Bei dieser Geräteverstärkung wurde versucht, im Labor die Genauigkeit des Korngrößenmeßsystems zu überprüfen. Dazu wurde mit den fünf Kalibrierblechen aus der Abb. 77, S. 101, durch zehn Einzelmessungen pro Blech die Kalibriergerade ermittelt und danach an den gleichen Blechen jeweils zehnmal die Korngröße mit Ultraschall bestimmt. Jedesmal wurde der kritische Winkel neu eingestellt.

Zunächst soll die Ermittlung der Kalibriergeraden diskutiert werden. In der Abb. 84a sind für die benutzten 5 Kalibrierbleche die Mittelwerte $(\overline{A_s} \cdot M)^{2/3}$ aus den 10 Einzelmessungen

von $(\bar{A}_s \cdot M)^{2/3}$ über der vorher metallographisch bestimmten Korngröße aufgetragen; ebenso sind die Standardabweichungen dieser Mittelwerte als Balken eingezeichnet, entsprechend dem sogenannten Standardfehler des arithmetischen Mittelwertes. Wird die lineare Abhängigkeit der gemessenen Streuamplituden $(\bar{A}_s \cdot M)^{2/3}$ von der metallographisch bestimmten Korngröße D durch eine Regressionsrechnung ermittelt, so wird dabei vorausgesetzt, daß diese Korngröße D eine fehlerfrei vorgegebene Größe darstellt. Die Abb. 54, S. 72, zeigte jedoch für die Korngrößenbestimmung nach dem Linienschnittverfahren, daß stets eine Reststreuung des Meßergebnisses Korngröße bleibt, auch wenn über sehr viele Körner gemittelt wird. Daher liegt bei der Ermittlung der Kalibriergeraden eine Korrelationsproblematik vor, die sehr viel aufwendiger zu behandeln ist. Da die gesamte Verteilung der metallographischen Korngrößenwerte eines Bleches um ihren Mittelwert aber nicht bekannt ist, kann streng genommen die Genauigkeit des Ultraschall-Meßsystems auch nicht abgeschätzt werden.

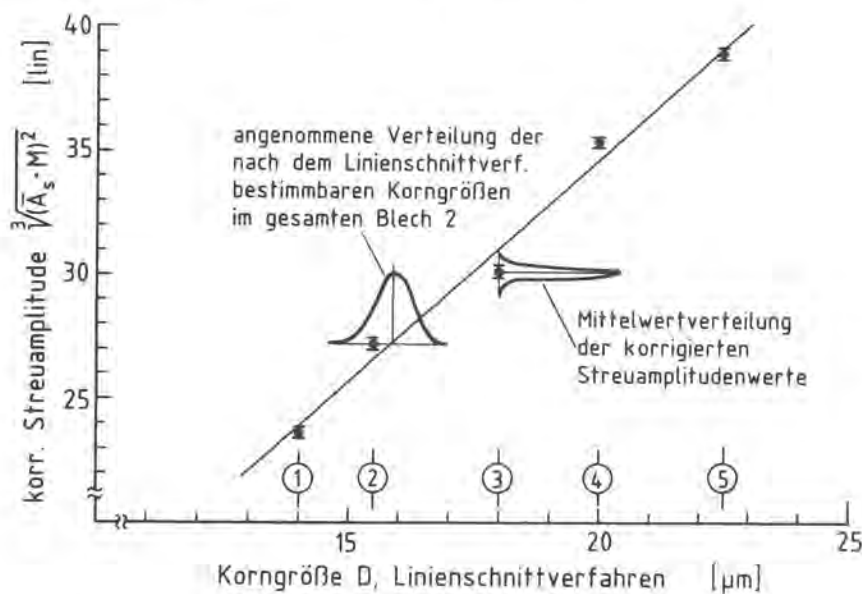


Abb. 84a:
Aufnahme einer
Kalibriergeraden
durch 10 Einzel-
messungen
pro Blech

Die Abb. 84a bietet jedoch einen Lösungsweg an: Nach der Theorie der Rayleigh-Streuung muß für die vorliegenden Kalibrierbleche bei einer Prüffrequenz von $f = 25$ MHz eine lineare, schwankungsfreie Abhängigkeit zwischen Rückstreuamplitude $(\bar{A}_s)^{2/3}$

und Korngröße D vorliegen. Daher wurde zunächst eine lineare Regressionsrechnung durchgeführt. Während die Streuamplitudenmittelwerte der Bleche "1" und "5" ziemlich nahe an der berechneten Geraden liegen ($1.9 \cdot s(\overline{A_s \cdot M})^{2/3}$, bzw. $1.4 \cdot s(\overline{A_s \cdot M})^{2/3}$), liegen die Mittelwerte für die Bleche "2 - 4" deutlich außerhalb. Die Aussage "deutlich außerhalb" kann getroffen werden, da der Abstand in der Ordinatenrichtung zwischen dem jeweiligen Mittelwert und der Geraden dem 3.5 bis 4.5fachen des jeweiligen Standardfehlers entspricht. Dies bedeutet dann, daß der Mittelwert der gemessenen Streuamplituden mit > 99.9 %iger Sicherheit nicht auf der Regressionsgeraden liegt.

Die Ursache für diese Abweichung vom linearen Rayleigh-Verlauf kann nur dadurch begründet sein, daß die vorliegenden metallographischen Korngrößenwerte nicht dem echten Mittelwert der Kornverteilung eines Bleches entsprechen, wie es beispielhaft für das Blech "2" in der Abb. 84a angedeutet ist. Es ist wahrscheinlich, daß dieser Mittelwert viel besser durch den Schnittpunkt der gemessenen Ultraschallstreuamplitude $(\overline{A_s \cdot M})^{2/3}$ mit der Geradengleichung beschrieben wird, da bei der Ultraschallmessung eine sehr viel größere Fläche (ca. 100 cm^2) zur Bildung des Meßwertes beiträgt als bei der metallographischen Einzelprobe. Anhand dieser Überlegungen wurden daher die metallographischen Korngrößenwerte als unrichtig angesehen und zur Korrektur in horizontaler Richtung auf den Schnittpunkt der Ultraschallamplitude mit der Kalibriergeraden verschoben, im Falle des Bleches "2" von $D = 15.5 \text{ } \mu\text{m}$ auf $D = 15.9 \text{ } \mu\text{m}$.

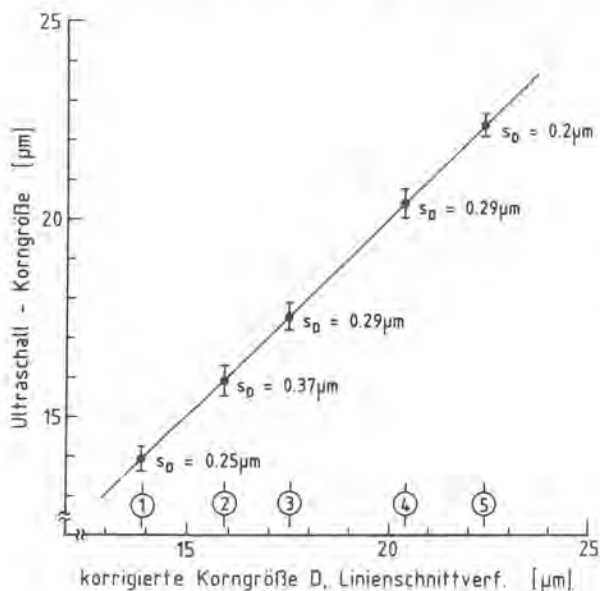


Abb. 84b:
Korngrößenbestimmung an diesen Blechen mit 10 Einzelmessungen pro Blech

Die Abb. 84b zeigt nun anhand einer neuen Laborreihe (10 Einzelmessungen pro Kalibrierblech), wie reproduzierbar die Korngröße mit Ultraschall an den Kalibrierblechen gemessen werden kann, wenn die "Ultraschall-Korngröße" über der korrigierten metallographischen Korngröße aufgetragen ist. Angegeben sind die Mittelwerte der 10 Einzelmessungen und als Balken die Standardabweichungen der Einzelwerte. Wird ein 95 %-Fehlerkriterium angenommen, so ist der Meßfehler in der Regel kleiner als $\pm 0.5 \mu\text{m}$, im schlechtesten beobachteten Fall ca. $\pm 0.75 \mu\text{m}$. Diese im Labor erhaltenen Werte decken sich im wesentlichen mit den in der Praxis erhaltenen Schwankungsbreiten der Korngrößemessung, wie in der Abb. 69, S. 93, dargestellt. Dort ist die Schwankungsbreite um den jeweiligen Mittelwert wegen der laufenden Ortsmittelung nach Gl. (62), S. 93, sogar kleiner und mit ca. $\pm 0.25 \mu\text{m}$ abzulesen.

5.5.2 Start der Messung

Nach dem Einlesen des Betriebssystems und der einzelnen Meßprogramme in den Prozeßrechner mit Hilfe von Minicassetten werden zur Protokollierung Größen wie Prüfkopf-Nummer, Konstanten C_1 und C_2 usw. über das Terminal eingegeben.

Danach dient das Terminal nur noch zur Anzeige des Status des Meßsystems. Nach dem Einbauen in das Manipulatorsystem wird der Prüfkopf mit der Handsteuerung des Manipulatorsystems in eine Schutzposition ($\alpha = 45^\circ$) verfahren. Danach wird die Umlenkrolle (Abb. 62, S. 83) pneumatisch abgesenkt. Der Prüfkopf ist dann nicht mehr zugänglich. Nach Umschalten des Not-Ausschalters in die Stellung "Ein" beginnt der vollautomatische Meßzyklus. Der Prüfkopf wird zunächst in einen angenommenen kritischen Einfallswinkel $\alpha_k = 31^\circ$ verfahren bei einem Abstand zwischen Prüfkopf und Blech von $a = 18.5 \text{ cm}$. In dieser Position wird der Spitzenwert der Ultraschallamplitude A_s und der Abstand a des Prüfkopfes zur Blechoberfläche gemessen.

Durch Vergleich mit dem vorgegebenen Soll-Abstand regelt der Rechner, wenn nötig, den Abstand nach. Dann wird vor Beginn der eigentlichen Korngrößenmessung der Einfallswinkel optimiert. Nach Erreichen des kritischen Winkels α_K mit der maximalen Rückstreuamplitude \bar{A}_S beginnt die Korngrößenmessung. Diese wird nur unter den folgenden Umständen unterbrochen:

- Betätigen des Not-Aus-Schalters, wobei der Prüfkopf sofort in die Schutzposition verfahren wird,
- Grenzwertüber- oder -unterschreitungen bei der Plausibilitätskontrolle der Eingangs- und Ausgangswerte (z.B. Banddicke $d = 0$ mm). Wenn plausible Werte innerhalb der zulässigen Grenzwerte gemessen werden, beginnt der Meßzyklus sofort wieder.
- Optimierung des Einfallswinkels α_K (Dauer ca. 20 sec)

5.5.3 Entscheidungskriterien für die Durchführung einer Winkeloptimierung

Eine Winkeloptimierung wird generell immer dann eingeleitet, wenn die aktuell gemessene Korngröße D um einen definierten Betrag (z.B. um $|3 \mu\text{m}|$) von dem Korngrößenwert D nach der vorherigen Winkeloptimierung abweicht. Vor der tatsächlichen Durchführung einer Winkeloptimierung müssen jedoch stabile Bedingungen vorliegen, d.h. die Korngröße darf nicht schwanken, ansteigen oder abfallen. Diese Forderung ergibt sich aus dem iterativen Verfahren nach Abb. 75, S. 99 bei der Optimierung des Einfallswinkels. Da dieses Verfahren eine endliche Zeit benötigt, kann sich in dieser Zeit über die entsprechende Bandlänge ebenso der Wert der Rückstreuamplitude als Funktion der Korngröße verändert haben. Für die Durchführung der Winkeloptimierung muß daher sichergestellt sein, daß die Korngröße für die kurze Dauer der Winkeloptimierung als konstante Größe

betrachtet werden kann. Um dies beurteilen zu können, wird die vorangegangene Schwankung der Korngröße herangezogen.

Diese Schwankung, die aktuelle Korngrößenabweichung $|\Delta D|$, wird aus der Korngröße D und einer Hilfsgröße ermittelt, der mittleren Korngröße \bar{D} . \bar{D} errechnet sich nach dem Algorithmus zur Mittelwertbildung mit eingefrorenem Korrekturfaktor völlig analog zur Gl. (62) auf S. 93:

$$\bar{D}_{\text{neu}} = (D + \bar{D}_{\text{alt}} \cdot (m-1)) / m \quad (68)$$

wobei bei den Messungen $m = 1000$ gesetzt wurde. $|\Delta D|$ berechnet sich aus

$$|\Delta D_{\text{neu}}| = (|D - \bar{D}_{\text{neu}}| + |\Delta D_{\text{alt}}| \cdot (m-1)) / m \quad (69)$$

Prinzipiell sollte dafür ein Formalismus $|\Delta D| = |\bar{D} - D|$ ausreichen, der Wert ΔD schwankt dann jedoch im Takt von D . Diese Schwankungsbreite wird durch eine Berechnung von $|\Delta D|$ nach Gl.(69) bei einem gewählten Faktor von $m = 100$ geglättet. Wie in Abb. 66, S. 90, angegeben, werden im 10 msec-Meßtakt neben der Korngröße D immer \bar{D} und $|\Delta D|$ berechnet. Abb. 85 zeigt in einem konstruierten Beispiel den Verlauf von \bar{D} und $|\Delta D|$ bei Änderungen der Korngröße D .

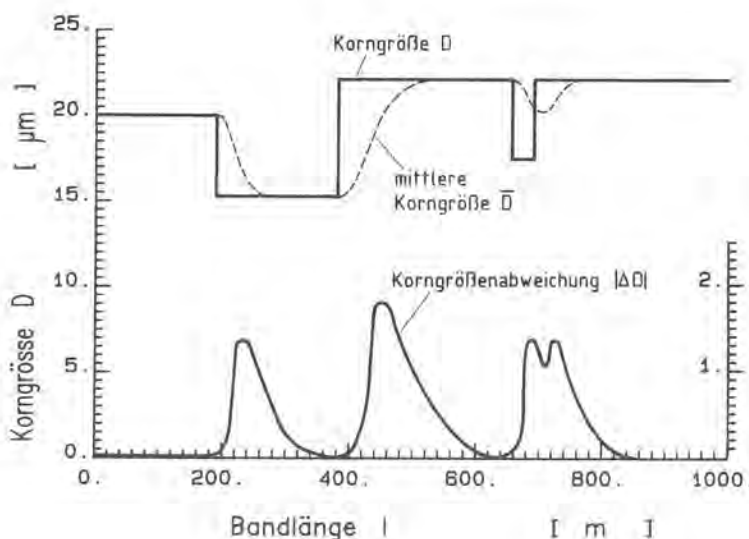


Abb. 85:
Darstellung der mittleren Korngröße \bar{D} nach Gl. (68) sowie der Korngrößenabweichung $|\Delta D|$ nach Gl. (69), wenn sich die Korngröße D als Funktion der Bandlänge l ändert

In einem weiteren konstruierten Beispiel, das die Korngrößenbestimmung am Übergang zwischen zwei Bändern simuliert (Abb. 86),

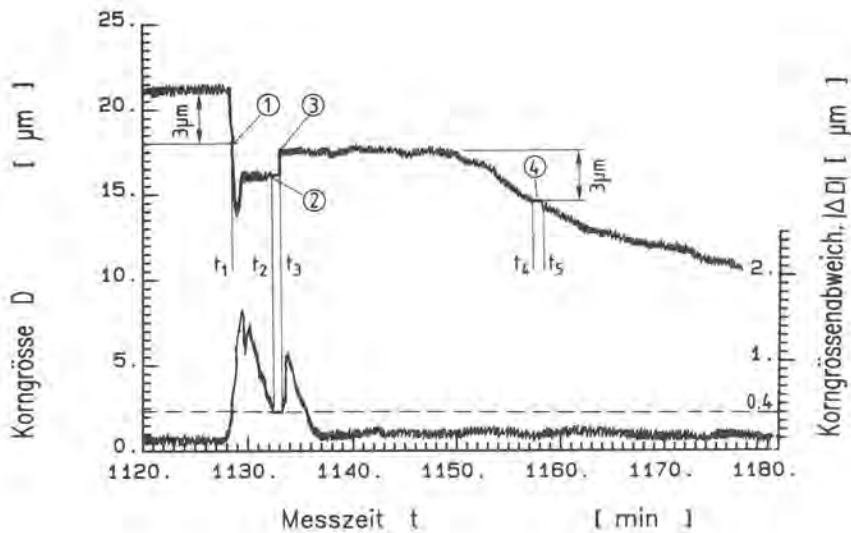


Abb. 86:

Beispiel zur Verdeutlichung der Entscheidungskriterien zur Winkeloptimierung

sollen die Entscheidungskriterien zur Winkeloptimierung verdeutlicht werden. Bis zum Zeitpunkt $t_1 = 1128$ min soll eine Korngrößenbestimmung an einem Band I durchgeführt werden, ab diesem Zeitpunkt an einem Band II. Das Band I habe eine sehr konstante Korngröße von $D = 21 \mu\text{m}$, wobei die aktuelle Korngrößenabweichung $|\Delta D| \approx 0.1 \mu\text{m}$ sei. Bedingt durch die Überlappung zweier Bleche an der Schweißnaht wird in diesem Bereich immer eine starke Schwankung der Ultraschallamplitude gemessen, so daß eine Winkeloptimierung eingeleitet wird, da das Kriterium $|D_{\text{aktuell}} - D_{\text{letzte Optimierung}}| > 3 \mu\text{m}$ erfüllt ist. Eine sofortige Durchführung der Winkeloptimierung zum Zeitpunkt t_1 würde jedoch zu einem falschen kritischen Winkel führen. Erst wenn die aktuelle Korngrößenabweichung $|\Delta D|$ sehr

klein geworden ist, wird wegen der nun konstanten Korngröße die Winkeloptimierung zum Zeitpunkt t_2 durchgeführt. Als Kriterium für die zulässige Korngrößenabweichung $|\Delta D|$ wurde $|\Delta D| < 0.4 \mu\text{m}$ gewählt. Nach Beendigung der Optimierung zum Zeitpunkt t_3 wird nun ein um ca. $1 \mu\text{m}$ größerer Korngrößenwert angezeigt. Der zwischen t_1 und t_2 angezeigte Wert von D ist um diesen Betrag zu klein, da dort nicht genau beim kritischen Winkel α_K gemessen wurde. Es mußte jedoch bis zum Zeitpunkt t_2 abgewartet werden, da erst dann sichergestellt ist, daß die gemessene Amplitude \bar{A}_S bzw. die Korngröße D über der Zeit keinen größeren Schwankungen unterworfen ist. Es soll noch darauf hingewiesen werden, daß die Bandenden (ca. 30 m am Anfang und am Ende) oft nicht genügend ausgewalzt sind und daher z.T. abgeschnitten und verschrottet werden. Daher kommt es in diesem Bereich auf eine Korngrößenbestimmung nicht so an, so daß die Winkeloptimierung gerade in diesem Zeitraum gerechtfertigt ist. Ein langsamer Korngrößenabfall, verursacht z.B. durch veränderte Rekristallisationsbedingungen, führt zum Zeitpunkt t_4 zur Einleitung und sofortigen Winkeloptimierung, da sowohl $|D_{\text{aktuell}} - D_{\text{letzte Optimierung}}| > 3 \mu\text{m}$ als auch $|\Delta D| < 0.4 \mu\text{m}$ erfüllt sind.

5.5.4 Meßwert- und Ergebniswertausgabe

Die Erfassung von Meßwerten sowie die Ausgabe von Ergebniswerten erfolgt im 10 msec-Takt. In Abb. 66, S. 90 ist dargestellt, daß auf dem Bildschirm des Terminals neben dem Ergebniswert Korngröße D noch 7 weitere Meß- und Ergebniswerte dargestellt und alle 2 sec aktualisiert werden. Die wichtigsten dieser Größen sind die Korngröße D und z. T. die aktuelle Korngrößenabweichung $|\Delta D|$, aus welcher während der Erprobung des Meßsystems der Zeitpunkt der Durchführung von Winkeloptimierungen nachvollzogen werden konnte. D und $|\Delta D|$ werden daher auf einem 2-Kanal-y/t-Schreiber aufgezeichnet. Dieser "Korngrößenmeßschrieb" ist das wichtigste Dokument der zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung.

Die Abb. 87 faßt nun alle in den Kap. 5.4 und 5.5 diskutierten Einzelschritte in Form eines "Aktionsflußdiagramms" zusammen.

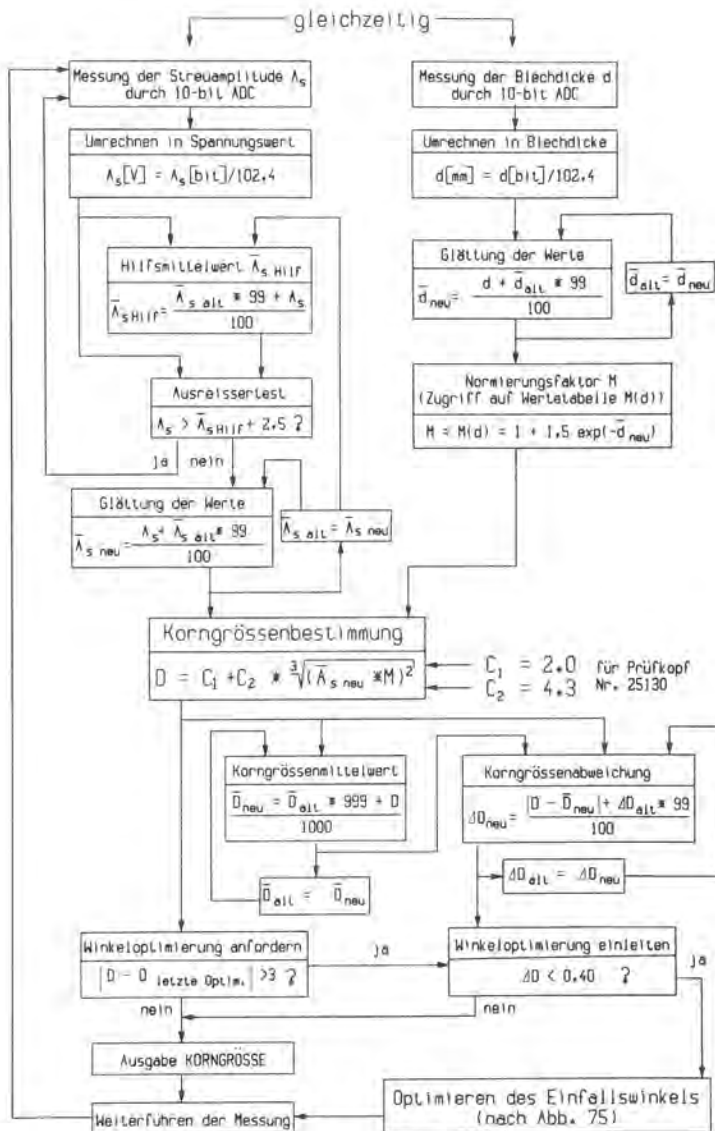


Abb. 87:

Flußdiagramm zur schematischen Darstellung der Einzelschritte bei der zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung mit Ultraschall.

Hinweis:

Die Gleichheitszeichen sind hier als Zuweisungen zu verstehen, d.h. der linke Ausdruck nimmt den Wert des rechten Ausdrucks an (z.B. aus $\bar{A}_s \text{ neu}$ wird für den nächsten Meßtakt $\bar{A}_s \text{ alt}$)

6. Ergebnisse der zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an der Durchlaufglühanlage

Das Korngrößenmeßsystem wurde mehrfach über einen Zeitraum von insgesamt 4 Wochen an der Durchlaufglühanlage erprobt. Dabei wurde die Korngröße in ca. 120 km austenitischem Kaltband (zumeist Werkstoff-Nr. 1.4301) mit unterschiedlichen Dicken $0,3 \leq d[mm] \leq 1,5$ gemessen. Neben der Korngröße D und der Korngrößenabweichung $|\Delta D|$ über der Bandlänge l , zusammengefaßt als Korngrößenmeßschrieb, wurden für betriebsinterne Zwecke in einigen Fällen die Bandgeschwindigkeit v , die

Banddicke d , die Ofentemperatur T und teilweise die zum Heizen des Ofens benötigte Ferngasmenge aufgezeichnet. Außerdem lagen für einige Bänder zu Vergleichszwecken Dickenschriebe (Dicke über der Bandlänge) von der Warmwalzung vor.

Vor allem zu Beginn der betrieblichen Messungen wurden umfangreiche metallographische Stichprobenuntersuchungen zur Bestätigung der mit Ultraschall erhaltenen Meßwerte durchgeführt. Davon abgesehen, daß ein Zerteilen zur Probennahme nur bei einigen Bändern möglich war, ist die örtliche Zuordnung des Ultraschallmeßwertes mit dem Ort der entnommenen Probe schwierig. Bei Bändern von 4000 m Länge kann die örtliche Abweichung der Probennahme über 1% betragen, ca. 40 m Ortsabweichung entsprechend. Über die mit Ultraschall gemessenen Werte wird in Kap. 6.1 berichtet; die Problematik des Vergleichs der Ultraschallmeßwerte mit den metallographischen Korngrößenwerten wird in Kap. 6.2 behandelt. In den Abbildungen sind die metallografischen Meßwerte (Linien-schnittverfahren) mit einem "*" gekennzeichnet.

6.1 Gemessene Bänder

Das Ausgangsprodukt für die austenitischen Kaltbänder ist die Bramme, ein mit rechteckigem Querschnitt im Block- oder Strangguß vergossener Stahlblock. Beim Strangguß wird die Bramme in der eigenen Hitze zur Vorbramme ausgewalzt, wobei die Vorbrammenlänge je nach Stahlwerk ca. 10 m beträgt. Beim Blockguß ist dazu eine zusätzliche Erwärmung notwendig. Die Vorbramme wird im Warmwalzwerk in mehreren Schritten ("Stichen") zum "Warmband/schwarz" heruntergewalzt. Die Warmbanddicke beträgt danach ca. 3-4 mm und die Länge einige 100 m. Nach einer Rekristallisationsglühung in einer Durchlaufglühanlage (Warmbandlinie) und anschließender Beizung zum Entfernen des Zunders liegt das "Warmband/weiß" vor. Dieses wird wiederum in mehreren Stichen auf die Enddicke d heruntergewalzt (Kaltband) und schließlich rekristallisa-

tionsgeglüht und gebeizt, wonach es in der Regel als fertiges Endprodukt vorliegt.

Wird eine gut durchmischte Schmelze vorausgesetzt, eine seigerungsarme Bramme sowie störungsfreie Verarbeitungsprozesse, so sollten die austenitischen Bänder eine konstante Korngröße über der gesamten Bandlänge aufweisen. Bislang erfolgte die Kontrolle der Korngröße lediglich durch Stichprobenentnahme am Anfang und Ende eines Bandes und nachfolgende metallografische Korngrößenbestimmung nach dem Linienschnittverfahren oder zum Teil nach der ASTM-Vergleichsscheibe. Beide Verfahren werden kurz in Abschnitt 6.2 behandelt.

6.1.1 Bänder mit konstanter Korngröße

Abb. 88 zeigt den Korngrößenmeßschieb eines 0.9 mm dicken Bandes. Die metallografischen Vergleichswerte vom Bandanfang und vor allem vom Bandende stimmen gut mit dem Ultraschallbefund überein. Das etwas gröbere Korn in den ersten 50 m hat seine Ursache in der trägen Ofenregelung wegen der ca. 10% langsameren Bandgeschwindigkeit beim vorangegangenen Band.

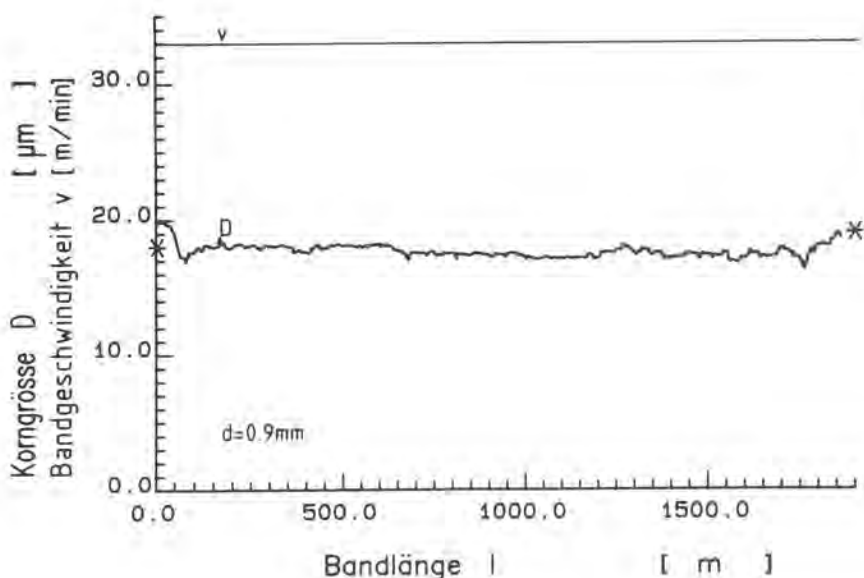


Abb. 88:
Meßschieb eines
Bandes mit
konstanter
Korngröße

Ebenso hat das in Abb. 89 dargestellte Band eine sehr konstante Korngröße, die sich metallografisch an mehreren Stellen gut bestätigen läßt.

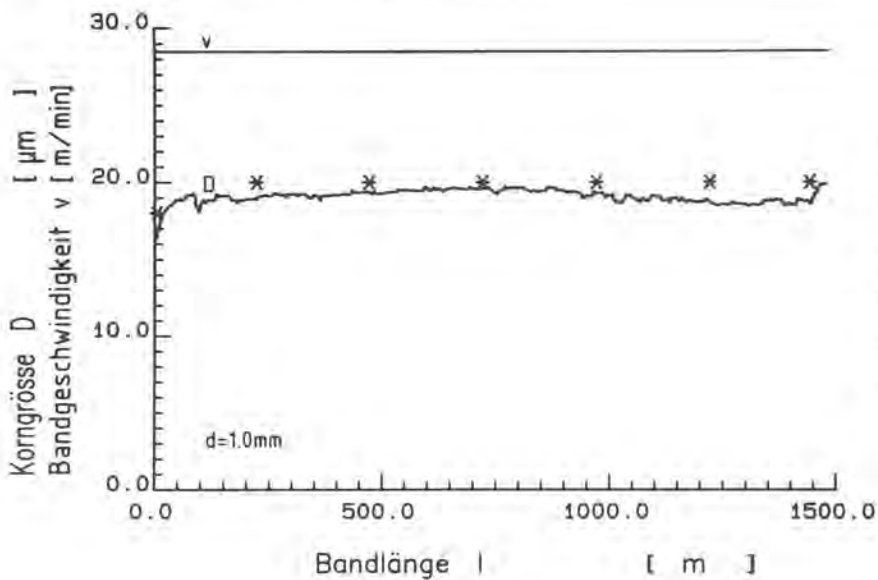


Abb. 89:
Meßschieb
eines
Bandes mit
konstanter
Korngröße

6.1.2 Veränderung von Glühbedingungen

Die Leistungsfähigkeit des Korngrößenmeßsystems kann besonders gut durch Veränderung von Glühbedingungen und durch die dadurch verursachte Änderung der Korngröße unter Beweis gestellt werden. Abb. 90 zeigt einen Meßschieb, in dem neben der Korngröße D auch die Bandgeschwindigkeit v über der Bandlänge l aufgetragen ist.

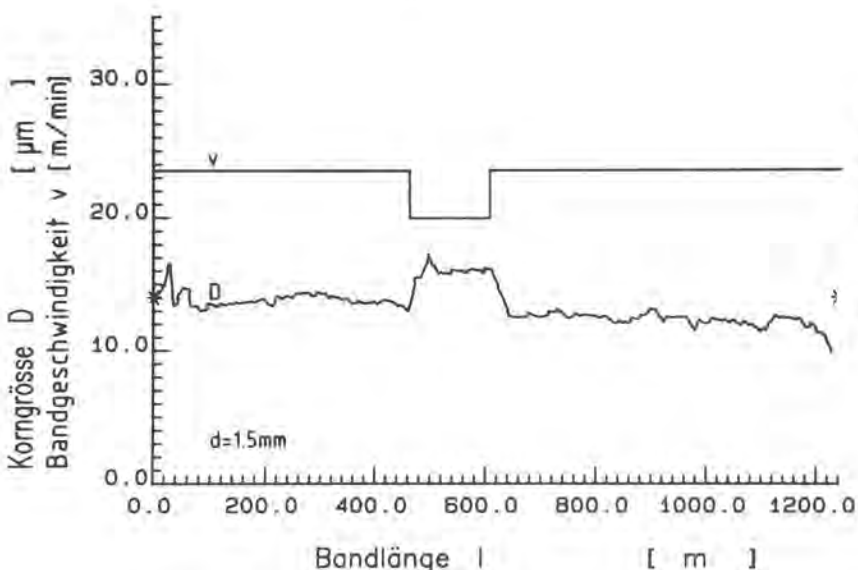


Abb. 90:
Einfluß der
Bandgeschwindig-
keit auf die
Korngröße

Bei Erniedrigung der Bandgeschwindigkeit um 15% steigt die Korngröße von ca. 14 μm auf ca. 16.5 μm an (entspricht einem Korngrößenanstieg von ebenfalls um ca. 15%) und fällt nach Erhöhung der Geschwindigkeit wieder auf ca. 13 μm ab. Bei geringerer Bandgeschwindigkeit ist die Aufenthaltsdauer pro Bandabschnitt im Ofen länger, wodurch die Körner mehr Zeit zum Wachsen haben. Es ist bei diesen und den folgenden Meßschrieben zu beachten, daß die Kurve für die Bandgeschwindigkeit zur besseren Übersicht auf den Ort der Korngrößenmessung bezogen ist. Während der Messung äußert sich eine Änderung der Bandgeschwindigkeit in einer Korngrößenänderung erst, nachdem der entsprechende Bandabschnitt, der sich zum Zeitpunkt der Änderung gerade im Ofen befand, nach ca. 100 m die Meßstelle erreicht hat.

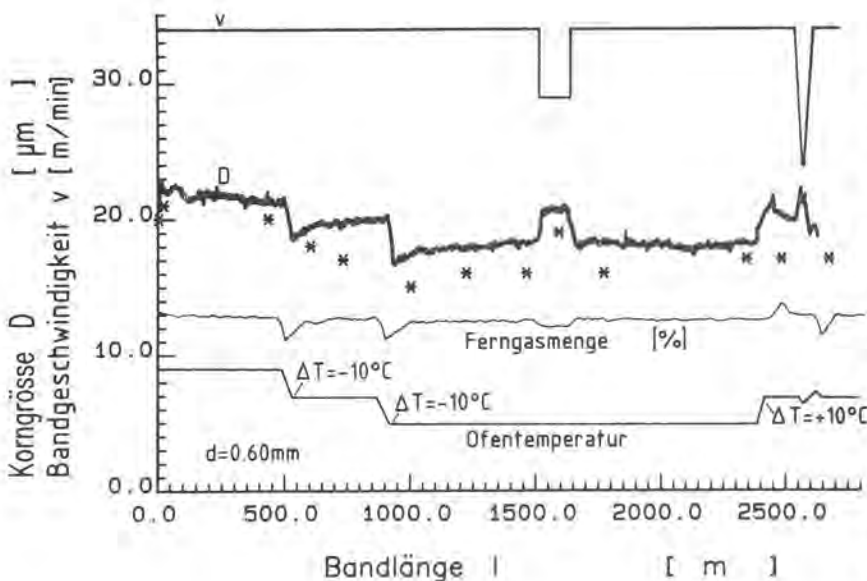


Abb. 91:
Einfluß von Glüh-
temperatur und
Bandgeschwindigkeit
auf die Korngröße
(Ofentemperatur
und zum Heizen
benötigte Ferngas-
menge sind ohne
Skalierung nur zum
qualitativen Ver-
gleich aufgetragen.)

Abb. 91 zeigt den Meßschrieb eines Bandes, bei dem sowohl die Ofentemperatur T als auch die Bandgeschwindigkeit v variiert wurden. Die dadurch erzielten Korngrößenänderungen lassen sich auch metallografisch nachweisen. Interessanterweise ist der Verlauf der durch Temperaturänderungen verursachten Korngrößenänderungen fast identisch mit dem Ferngasschrieb (das Ferngas dient zur Beheizung des Ofens). Es wird vermutet, daß die Ferngasmenge die Temperaturver-

hältnisse im Ofen - und daher auch die Glühbedingungen, durch die die Korngröße eingestellt wird - besser wiedergibt als die eigentliche Ofentemperaturmessung.

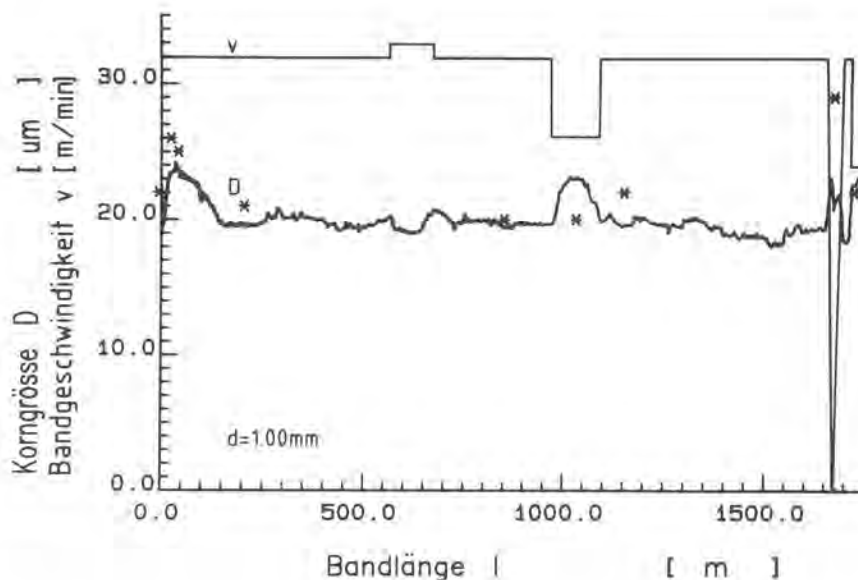


Abb. 92:
Einfluß der
Bandgeschwindigkeit
auf die Korngröße

Auch bei dem in Abb. 92 dargestellten Meßschrieb korrespondieren Bandgeschwindigkeits- und Korngrößenänderungen sehr gut. Der Bandstillstand am Ende des Bandes (bedingt durch das Anschweißen des neuen Bandes) kann in Extremfällen zu Korngrößen bis 100 μm führen; das Korngrößenmeßsystem zeigt diese Werte jedoch nicht an, wie in Kap. 5.5.1 diskutiert. Das Korngrößenmaximum bei 1000 m Bandlänge ließ sich metallografisch nicht bestätigen; wahrscheinlich erfolgte die Probenahme an einer falschen Stelle. Interessant ist der Korngrößenverlauf am Bandanfang: Das feine Korn im Bereich $0 < l[\text{m}] < 20$ hat seine Ursache darin, daß die Bandenden manchmal nicht gut ausgewalzt werden können. In diesem Fall war die Anfangsdicke ($d = 1.07 \text{ mm}$) größer als im restlichen Band ($d = 0.98 \text{ mm}$), so daß sich die im Ofen zur Rekristallisation eingebrachte Wärmeenergie auf ein größeres Volumen verteilt hat. (Im übrigen sind die Verformungsgrade nach dem Kaltwalzen viel größer als der kritische Verformungsgrad, so daß eine direkte Einstellung der Korngröße über die Verformung nicht erfolgen kann). Die Energie pro Volumenelement ist daher am Bandanfang kleiner, so daß in den ersten 20 m des Bandes

feineres Korn entsteht. Es soll dabei darauf hingewiesen werden, daß diese Dickenänderung zwar einen Einfluß auf die Glühbedingungen und die Korngröße im Band hat, jedoch wegen der ständigen Dickenmessung und -korrektur die zerstörungsfreie Korngrößenmessung nicht beeinflußt. Mit abnehmender Dicke steigt die Korngröße bis auf 24 μm an. Der nachfolgende Korngrößenabfall hat seine Ursache wie bei Abb. 88, S. 116, in der trägen Temperaturregelung des Ofens, die die geringere Bandgeschwindigkeit vom vorigen Band ausgleicht.

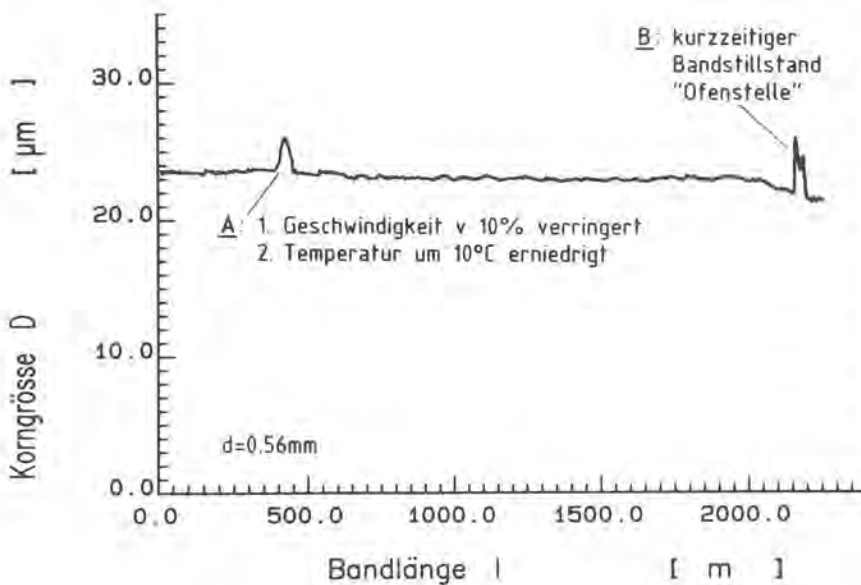


Abb. 93:
Einstellen einer gleichen Korngröße durch gezielte gleichzeitige Geschwindigkeits- und Temperaturveränderung

Abb. 93 zeigt den Originalkorngrößenschrieb eines Bandes mit sehr konstanter Korngröße. Jedoch traten bei diesem Band Beizschwierigkeiten auf. Um trotzdem die Oberfläche ausreichend zu säubern, wird durch Verringerung der Bandgeschwindigkeit ein längeres Verweilen in der Beize erreicht. Zum Zeitpunkt "A" wurde daher fast gleichzeitig zuerst die Geschwindigkeit um 10% verringert und dann die Ofentemperatur um 10° gesenkt, so daß die Korngröße kurz ansteigt und danach wieder ihren ursprünglichen Wert erreicht. Diese Messung, die sich bei mehreren Bänder reproduzieren ließ, bestätigt die Faustregel, daß beim Glühprozeß 10% Geschwindigkeits- und 10° Temperaturänderung etwa gleiche Auswirkung auf die Korngröße im Band haben /80/.

6.1.3 Bänder mit periodischen Korngrößenschwankungen

Mehrere der geprüften Bänder zeigten ein unerwartetes Verhalten. Trotz konstanter Ofentemperatur und Bandgeschwindigkeit traten periodisch vier oder sechs Maxima der mit Ultraschall gemessenen Korngröße auf, die sich metallografisch sehr gut bestätigen ließen. Alle diese Bänder hatten Dicken von $d > 1 \text{ mm}$ und beim Kaltwalzen recht geringe Verformungsgrade.

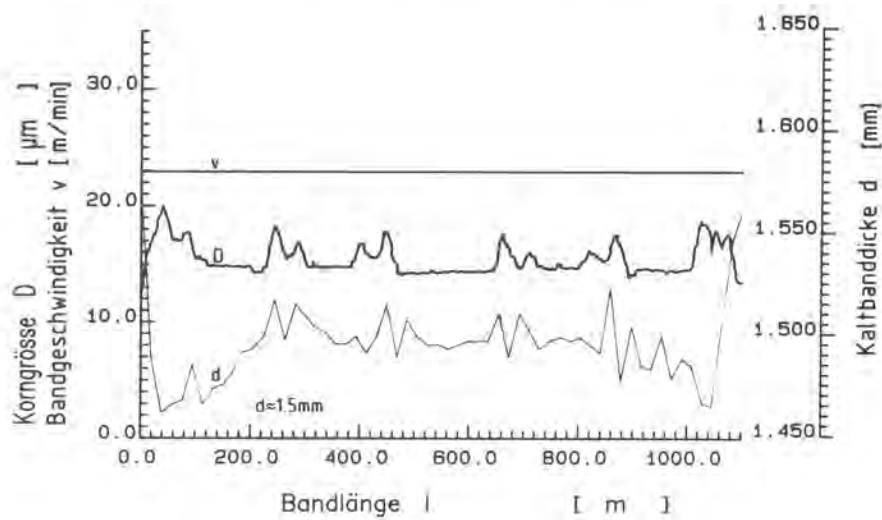


Abb. 94:
Band mit sechs
periodischen
Korngrößen-
schwankungen

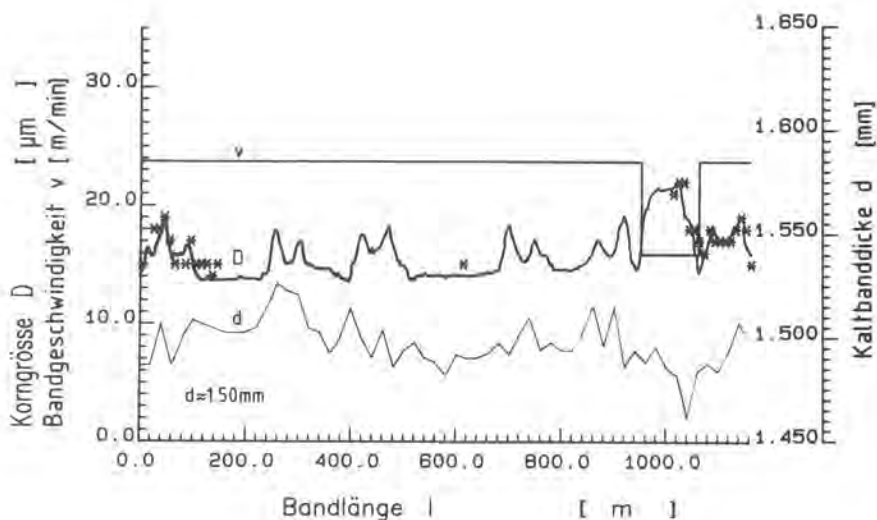


Abb. 95:
Band mit sechs
periodischen
Korngrößen-
schwankungen
und einer
Langsam-
fahrstelle

Abb. 94 zeigt den Korngrößenschrieb eines Bandes mit sechs Korngrößenmaxima, zwei an den Bandenden und vier über die Bandlänge verteilt, wobei jedes Maximum wiederum zwei dicht nebeneinander liegende Maxima aufweist. Korrespondierend mit den vier inneren Maxima traten an diesen Stellen auch Dicken-schwankungen im 1/100 mm-Bereich auf. Abb. 95 zeigt den Schrieb eines Bandes mit fast identischem Verlauf (außer einer Langsamfahrstelle am Bandende, die zu größerem Korn führt). Die Korrespondenz mit den metallografischen Korngrößenwerten ist auch hier sehr gut.

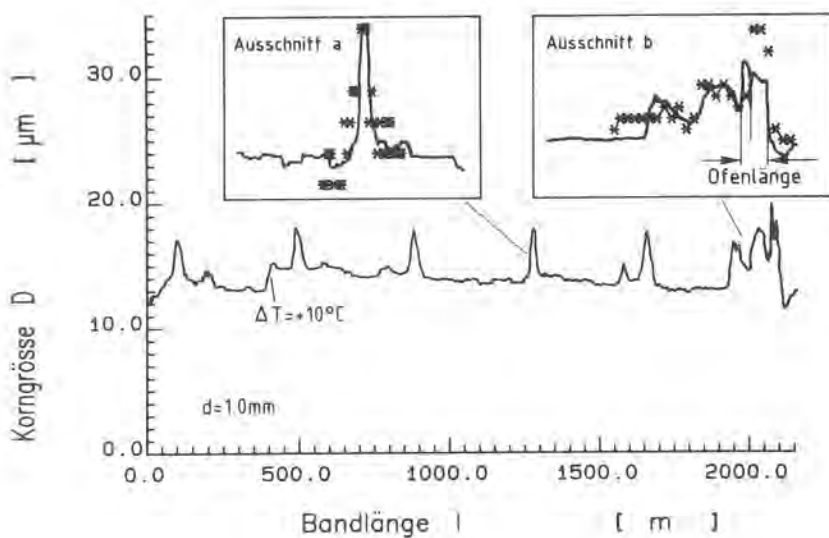


Abb. 96:

Band mit sechs periodischen Korngrößenschwankungen
linkes Teilbild:

metallografische Bestätigung eines Maximums

rechtes Teilbild:

metallografische Bestätigung sowie erkennbare Struktur des Ofens

Das in der Abb. 96 dargestellte Band hat sechs Maxima mit etwas anderer Form. Die beiden Ausschnitte zeigen die sehr gute Übereinstimmung mit den metallografischen Werten im Detail. Bei der "Ofenstelle" (Meter 2060-2090) handelt es sich um einen kurzzeitigen Bandstillstand, bei dem sich sehr grobes Korn bildet. Die Ofenstelle, bestehend aus zwei Maxima und einem scharfen Minimum bei Meter 2070 ist eine Abbildung der Struktur des Ofens, der aus zwei 10 und 20 m langen Teilen besteht, die durch einen ca. 2 m langen Luftspalt getrennt sind.

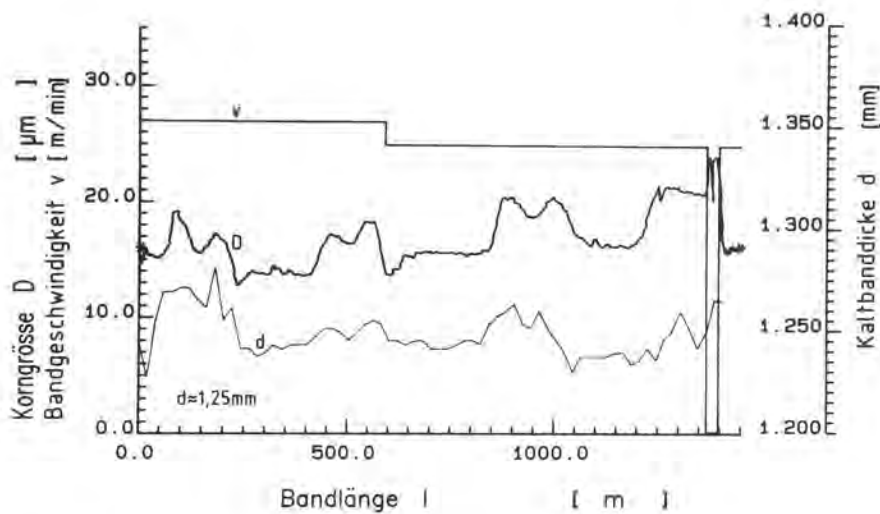


Abb. 97:
Band mit vier
Korngrößenmaxima
sowie einer
"Ofenstelle"

Die Abbn. 97 und 98 zeigen die Korngrößenschriebe von Bändern mit vier Maxima, die ebenfalls mit leichten Dickenschwankungen korrespondieren, und die auch bei anderen Bändern mehr oder weniger stark ausgeprägt auftraten.

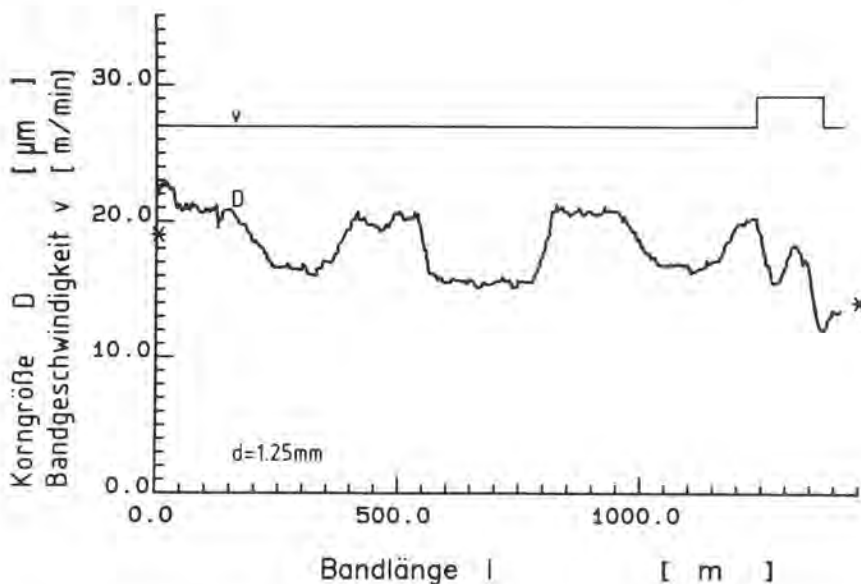


Abb. 98:
Band mit vier
Korngrößenmaxima
und einer Band-
geschwindigkeits-
änderung

Nachforschungen nach dem Ursprung der Bänder ergaben, daß die beiden unterschiedlichen Bändertypen auch aus unterschiedlichen Warmwalzwerken stammen. Die Bänder mit sechs Maxima wurden aus 14 m langen Vorbrammen aus dem Stahlwerk A gewalzt, in welchem sie in einem Hubbalkenofen mit sechs Auflagern erwärmt wurden. Bei den Bändern mit vier Maxima ist das Ausgangsprodukt eine 9 m lange Vorbramme, die aus

einem Hubbalkenofen im Stahlwerk B mit vier Auflagern stammt. Die Korngrößenschriebe der Bänder mit sechs und vier Maxima wurden nun auf eine gemeinsame Länge normiert (Abbn. 99 und 100), wobei sich zeigt, daß die Maxima jeweils an den gleichen Stellen auftreten. Die Orte der Korngrößenmaxima im Band sind mit den Auflagerpositionen der Vorbramme im jeweiligen Hubbalkenofen identisch.

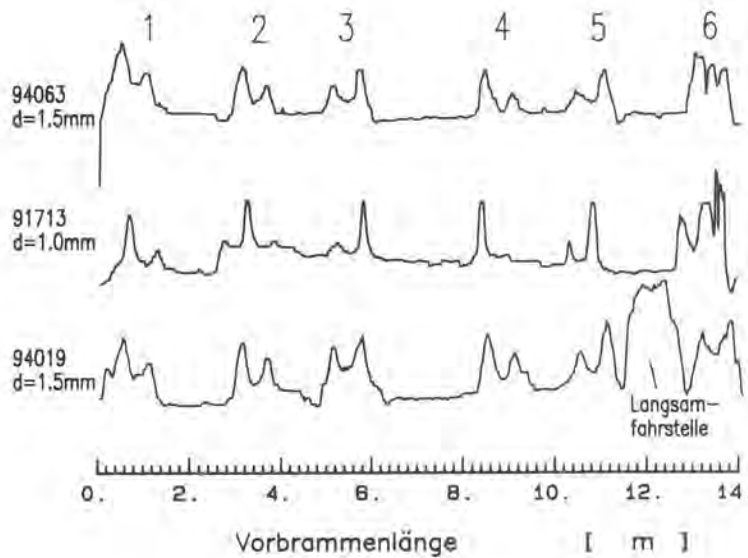


Abb. 99:
Meßschriebe der Bänder mit sechs Korngrößenmaxima auf gleiche Bandlänge normiert und über der Vorbrammenlänge aufgetragen

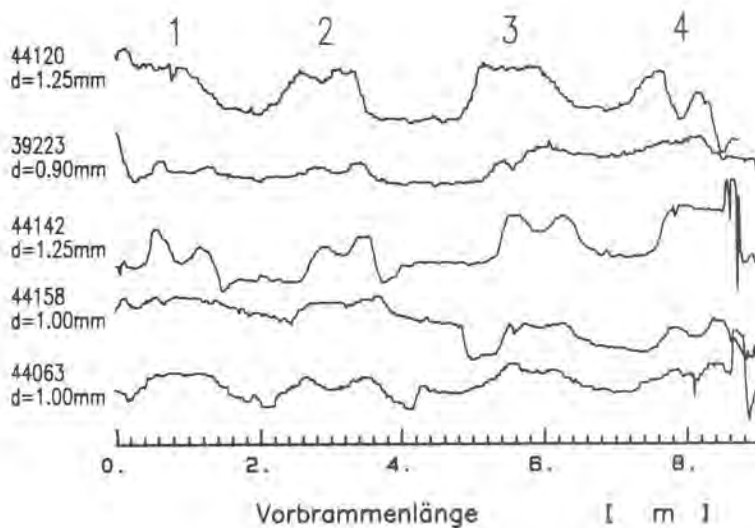


Abb. 100:
Meßschriebe der Bänder mit vier Korngrößenmaxima auf gleiche Bandlänge normiert und über der Vorbrammenlänge aufgetragen

Die Ursache für dieses Phänomen ist noch nicht restlos geklärt. Plausibel erscheint jedoch folgendes: Die Verzunderung der Bramme im Ofen wird an den Auflagerstellen gestört. Da dort der Zunder ständig abplatzt, herrschen an diesen Stellen während des Erhitzens andere Wärmeübergangsbedingungen, so daß sich an den Auflagerstellen ein anderes Gefüge einstellen dürfte. Warum dies zu größerem Korn im Kaltband führt, ist noch nicht geklärt. Eventuell führen die Wärmeübergangsbedingungen an den Auflagerstellen zu Texturen mit anderen mechanischen Eigenschaften (siehe Dickenschriebe in den Abbn. 94, 95 und 97). Ein weiterer Hinweis könnte sein, daß diese Bänder nach der Glühung im Durchlauf auch ein sehr schlechtes Beizverhalten zeigten, wobei die Bereiche der Korngrößenmaxima stärker verzundeten.

6.2 Diskussion der metallographischen Nachuntersuchungen

Übliche Verfahren zur metallographischen Korngrößenbestimmung sind das Linienschnittverfahren /83/, bei dem die Anzahl der Körner bestimmt wird, die auf einer Linie liegen (Abb. 101) und das Vergleichsscheibenverfahren nach ASTM /84/. Bei diesem Verfahren macht man sich die Tatsache zunutze, daß das menschliche Auge Unterschiede zwischen Werten viel genauer erfassen kann als absolute Werte. Daher wird das im Mikroskop sichtbare Gefüge mit den Gefügen von Vergleichsscheiben verglichen, die in den Strahlengang eingeblendet werden (Abb. 102).

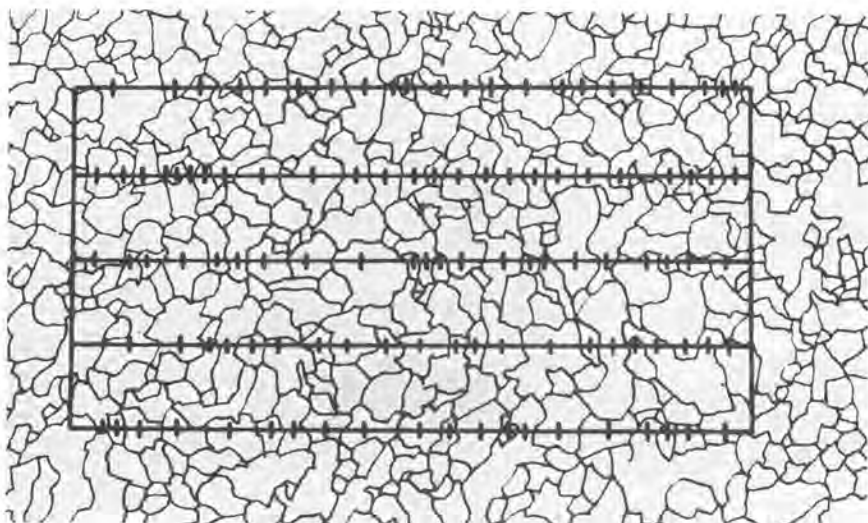


Abb. 101:
Korngrößenbestimmung nach dem Linienschnittverfahren (nach /83/)

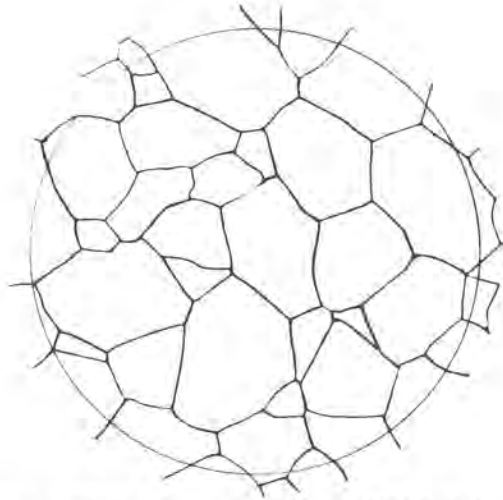


FIG. 1. Example of Twinned Grains (Flat Disk) from Plate I, Grain Size No. 3 at 100x

Abb. 102:
Korngrößenbe-
stimmung nach
dem ASTM-
Vergleichs-
scheiben-
Verfahren
(nach /84/)

Nach Gl. (70) aus /84/ kann der ASTM-Wert in einen mittleren Korndurchmesser D umgewandelt werden.

$$D [\mu\text{m}] = (10^6 / (15.5 \cdot 2^{\text{ASTM}-1}))^{1/2} \quad (70)$$

Die folgende Tabelle gibt für den hier interessierenden Bereich den Zusammenhang zwischen ASTM-Wert und mittlerem Korndurchmesser an:

ASTM	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.5
$D (\mu\text{m})$	31.8	26.7	22.5	18.9	15.9	13.3	11.2	9.4

Die Korngrößen der benutzten Kalibrierbleche wurden im Stahlwerk A nach dem Linienschnittverfahren im Querschnitt bestimmt. Dazu werden die Blechproben 2 Std. bei 650° sensibilisiert, so daß die Korngrenzen besser hervortreten, 10 sec elektropoliert und anschließend mit Oxalsäure geätzt. Die Ergebnisse der in Kap. 6.1 beschriebenen Ultraschallmessungen an der Durchlaufglühanlage wurden mit metallographisch ermittelten Stichprobenwerten der Korngröße verglichen. Dazu wurden an insgesamt 290 Stellen Proben entnommen. Die metallographischen Korngrößenbestimmungen wurden im Querschnitt und an der Oberfläche nach dem Linienschnitt- und dem Kreis-scheibenvergleichsverfahren in zwei unterschiedlichen Stahlwerken durchgeführt /24/. Die Abbn. 103 bis 107 zeigen verschie-

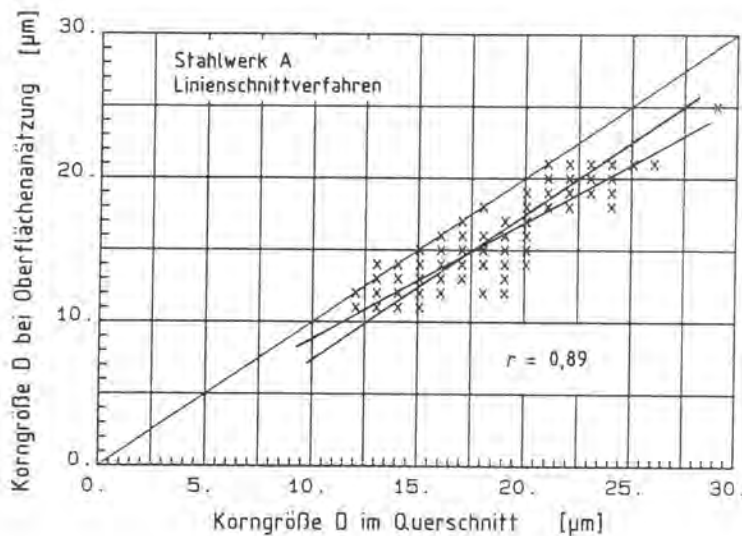


Abb. 103:

Vergleich der metallographisch ermittelten Korngrößenmeßwerte von der Oberfläche (Flachschliff) und vom Querschnitt (Querschliff) nach dem Linienschnittverfahren

dene Gegenüberstellungen der Korngrößenwerte. Da die Abszissen- und Ordinatenwerte gleichsam fehlerbehaftete Größen darstellen und eine Schwankungsbreite haben, liegt ein Korrelationsproblem vor. Daher wurde für die einzelnen Abbildungen durch zweimalige Regressionsrechnung der Korrelationskoeffizient r aus den Steigungen der Regressionsgeraden bestimmt. Ein Wert von $r = \pm 1$ bedeutet eine perfekte funktionale Abhängigkeit; $r = 0$ bedeutet, daß keine Korrelation zwischen den Werten besteht.

In Abb. 103 sind die metallographischen Meßwerte der gleichen Proben nach dem Linienschnittverfahren (Stahlwerk A) vom Querschnitt und von der Oberfläche gegenübergestellt. Ein Kreuz bedeutet mindestens ein Wertepaar. Die Gesamtanzahl der Wertepaare ist 290. Mit einer Ausnahme sind die an der Oberfläche gemessenen Werte kleiner/gleich den Werten aus dem Querschnitt.

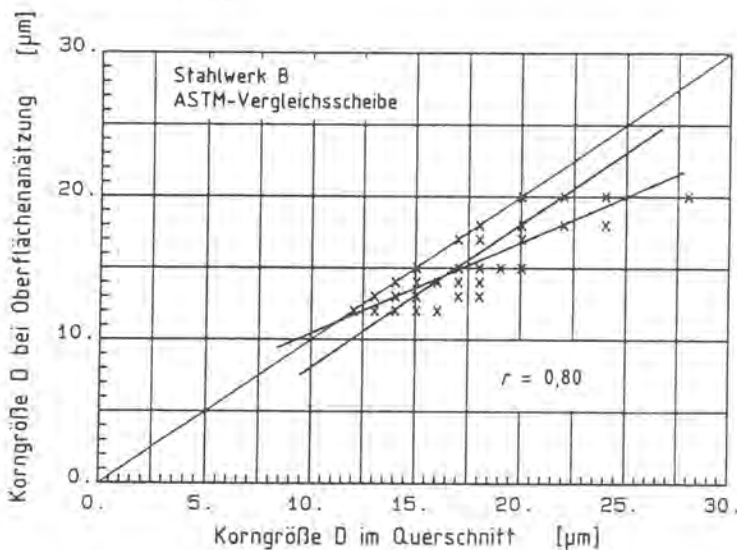


Abb. 104:

wie Abb. 103, aber nach dem ASTM-Vergleichsscheiben-Verfahren

In Abb. 104 sind die metallographischen Meßwerte der gleichen Proben nach dem Kreisscheibenverfahren (Stahlwerk B) von Oberfläche und Querschnitt gegenübergestellt. Auch hier sind alle an der Oberfläche metallographisch bestimmten Korngrößen kleiner/gleich den Querschnittswerten. Diese Erscheinung ist wahrscheinlich so zu erklären, daß sowohl mit dem Linienschnittverfahren als auch mit dem Vergleichsscheibenverfahren nur Kornausschnitte bewertet werden. Die Wahrscheinlichkeit, ein Korn in seinem maximalen Durchmesser zu schneiden ist im Querschnitt größer als an der Oberfläche, so daß sich bei einer Korngrößenbestimmung durch Oberflächenätzung eine zu kleine mittlere Korngröße ergibt. Deshalb werden im folgenden nur noch Meßwerte aus dem Blechquerschnitt betrachtet.

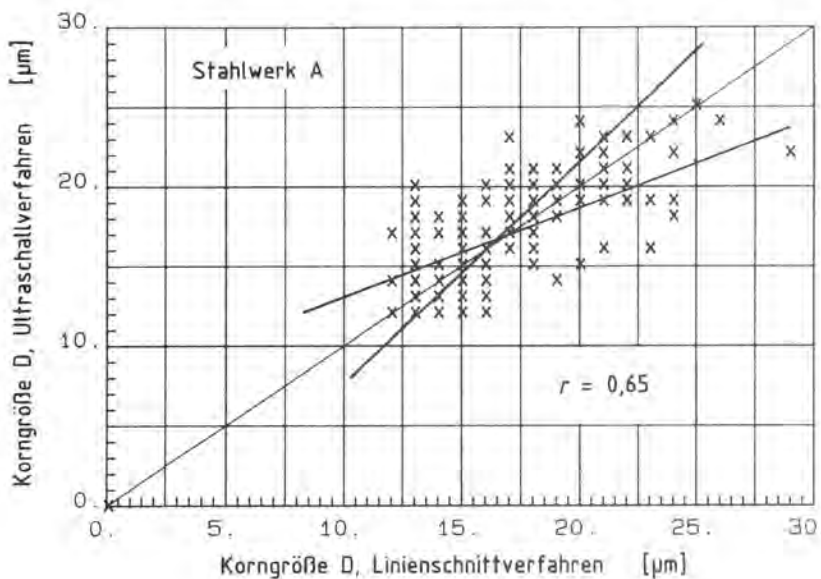


Abb. 105:
Vergleich von
290 mit Ultra-
schall und
metallographisch
erhaltenen
Meßdaten
(Stahlwerk A)

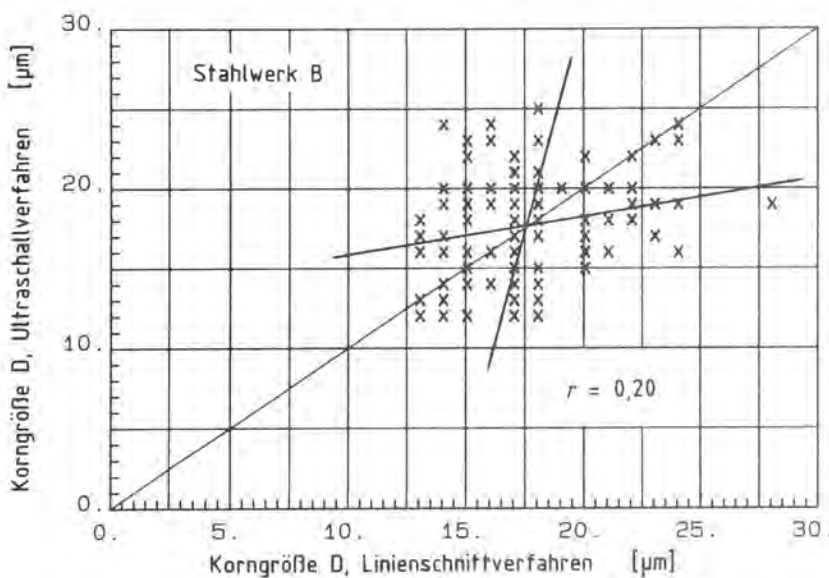


Abb. 106:
wie Abb. 105,
aber Stahlwerk B

Anmerkung:
Es sind zwar nur 71
Kreuze dargestellt,
die Gesamtanzahl der
Wertepaare beträgt
jedoch 290, so daß
einige Kreuze mehr-
fach belegt sind.
Daher täuscht der
optische Eindruck
eine schlechtere
Korrelation vor als
wirklich vorhanden.

Abb. 105 zeigt den Vergleich der 290 nach dem Linienschnittverfahren im Stahlwerk A bestimmten Korngrößenwerte mit den entsprechenden Ultraschallbefunden. Alle mit Ultraschall gemessenen Korngrößenwerte befinden sich in einem Bereich, der maximal $\pm 40\%$ von den metallographischen Werten abweicht. Ein ähnliches Ergebnis erhält man beim Auftragen der Ultraschallwerte über den Linienschnittwerten aus dem Stahlwerk B (Abb. 106). Der Schluß, daß die Genauigkeit der zerstörungsfreien Meßmethode $\pm 40\%$ beträgt, ist jedoch nicht richtig, da auch die metallographische Korngrößenbestimmung fehlerbehaftet ist. Einen Vergleich zwischen den metallographischen Korngrößenbestimmungen der gleichen Proben von Stahlwerk A und B zeigt Abb. 107. Die Streubreite ist dort noch größer als beim Vergleich mit dem Ultraschallbefund.

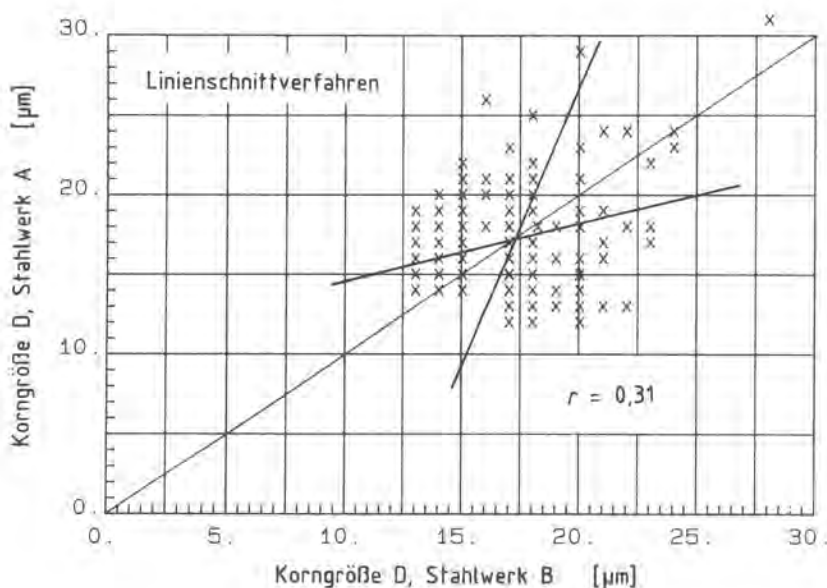


Abb. 107:
Vergleich von
metallographischen
Korngrößenbestimmungen an 290
Proben nach dem
Linienschnittverfahren, die in
2 verschiedenen
Stahlwerken
durchgeführt
wurden (siehe auch
Anmerkung zu Abb. 106)

Die Vergleiche zwischen den mit dem Vergleichsscheiben-Verfahren erhaltenen Korngrößenwerten der Stahlwerke A und B untereinander zeigten ähnlich schlechte Ergebnisse /24/.

Aus den Korrelationskoeffizienten r in den einzelnen Abb. kann wegen des hohen Probenumfanges recht gut auf die "Güte" der Korrelation geschlossen werden. Eine genauere Aussage kann durch Angabe der Vertrauensgrenzen des Korrelationskoeffizienten getroffen werden /85/.

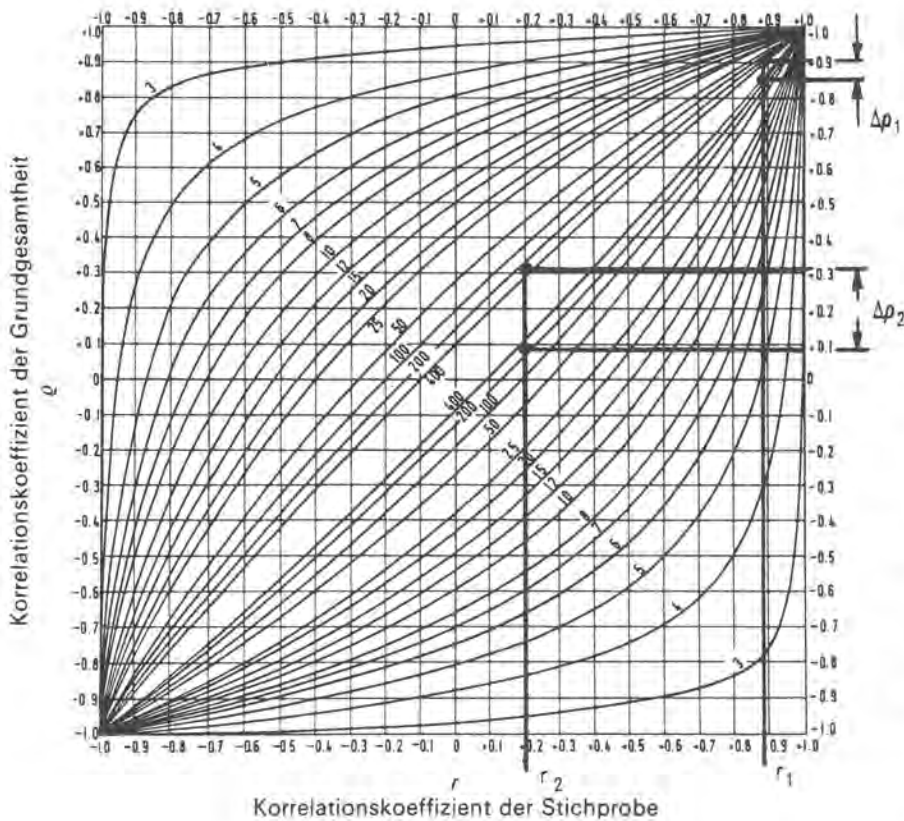


Abb. 108:

95 %-Vertrauensbereichsgrenzen für den Korrelationskoeffizienten der Grundgesamtheit. Die Zahlen an den Kurven bezeichnen den Stichprobenumfang. Beispielhafte Ermittlung der Vertrauensbereichsgrenzen für die Korrelationskoeffizienten r_1 und r_2 aus den Abb. 103 und 106 (nach /85/)

Um vom berechneten Korrelationskoeffizienten r aus einer Stichprobe (in diesem Fall mit einem Stichprobenumfang von $n = 290$) auf den Korrelationskoeffizienten ρ der Grundgesamtheit zu schließen und den Vertrauensbereich abschätzen zu können, muß der Stichprobenumfang berücksichtigt werden. Die Abb. 108 zeigt, daß der Vertrauensbereich für einen errechneten Korrelationskoeffizienten r mit zunehmendem Stichprobenumfang generell kleiner wird. Selbst bei der schlechtesten beobachteten Korrelation aus der Abb. 106 schließt der Vertrauensbereich $\Delta\rho_2$ den Wert $\rho = 0$ nicht ein, so daß von einer Korrelation gesprochen werden kann, wenn auch von einer schlechten.

Eine Aussage über den absoluten Meßfehler des Verfahrens zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung mit Ultraschall kann anhand der in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse nicht getroffen werden:

- Die Verfahren zur metallographischen Korngrößenbestimmung haben eine geringe Reproduzierbarkeit, wie die Abb. 107 zeigt.
- Es ist nicht ganz sichergestellt, ob die Proben immer genau an der richtigen Stelle der Bänder entnommen wurden. Daher könnte der Vergleich des Ultraschallwertes mit dem metallografischen Korngrößenwert von vorneherein falsch sein.

Ein objektiveres Verfahren zur metallographischen Korngrößenbestimmung und zur Abschätzung der Genauigkeit der zerstörungsfreien Meßmethode ist die Kornflächenanalyse mit einem rechnerunterstützten Auswertesystem /86/. Abb. 109 zeigt die mit diesem System gemessene Kornflächenanalyse einer Blechprobe.

ANZAHL DER
AUSGEMESSENEN KÖRNER : 1938.

PROZENTUALER ANTEIL	MITTLERER KORNGRÖßENWERT (μm^{-3})	KG ASTM	ANZAHL	%-ANTEIL
0,000000	0,000000	*	17,79	0,0
0,364033	1,48437	+*	14,62	10,0
2,19420	2,96875	-----*	13,15	60,2
4,59682	4,45312	-----*	12,18	126,5
6,46181	5,93750	-----*	11,45	183,7
8,99163	7,42187	-----*	10,87	247,9
8,48198	8,90625	-----*	10,39	233,8
8,40961	10,3906	-----*	9,98	242,9
8,55479	11,8750	-----*	9,62	235,9
8,77521	13,3594	-----*	9,30	241,9
7,54470	14,8437	-----*	9,01	210,8
5,75173	16,3281	-----*	8,75	158,6
5,71533	17,8125	-----*	8,51	157,6
5,38770	19,2969	-----*	8,28	148,5
4,33200	20,7813	-----*	8,08	119,4
3,59832	22,2656	-----*	7,88	95,3
2,47543	23,7500	-----*	7,70	68,2
1,89297	25,2344	-----*	7,53	53,2
1,74736	26,7188	-----*	7,37	48,2
1,16491	28,2031	-----*	7,22	32,1
0,97277	29,6875	-----*	7,08	25,1
0,744470	31,1719	-----*	6,94	21,1
0,509647	32,6563	-----*	6,81	14,1
0,364033	34,1406	+*	6,68	10,0
0,182017	35,6250	*	6,56	5,0
0,145613	37,1094	*	6,45	4,0
0,729677-01	38,5938	*	6,38	2,0
0,364034E-01	40,0781	*	6,23	1,0
0,364034E-01	41,5625	*	6,13	0,0
0,364034E-01	43,0469	*	6,03	0,0
0,000000	44,5312	*	5,93	0,0
0,000000	46,0156	*	5,84	0,0
0,364034E-01	47,5000	*	5,75	0,0
0,000000	48,9844	*	5,66	0,0

Abb. 109:
Protokoll
einer metallographischen
Kornflächenanalyse

Das Dichtemittel dieser Verteilung mit positiver Schiefe (links-steile Kurve) liegt bei $D \approx 11 \mu\text{m}$ und der Mittelwert bei $D \approx 18 \mu\text{m}$ (ca. ASTM 8.5). Der entsprechende mit Hilfe des Linienschnittverfahrens bestimmte Meßwert war $D = 23 \mu\text{m}$. Leider stand das Meßsystem zur Kornflächenanalyse für die hier beschriebenen Arbeiten nur in einem Fall zur Verfügung.

7. Diskussion der Leistungsfähigkeit des Korngrößenmeßsystems

Dazu sollen mehrere Problemkreise betrachtet werden:

a) Genauigkeit der Messung

Es liegt zunächst nahe, die Genauigkeit der zerstörungsfrei gemessenen Korngröße durch Vergleich mit den metallographischen Nachuntersuchungen anzugeben. Jedoch ist die metallographische Korngrößenmessung stark fehlerhaft, wie in Kap. 4.2 (Abb. 54, S. 72) sowie in Kap. 6.2 ausgeführt wurde und gestattet die Angabe daher nicht. - Wie in Kap. 5.5.1 (Abb. 84a, S. 107) dargelegt wurde, kann jedoch die Genauigkeit der Korngrößenmessung mit Ultraschall mit ca. $\pm 0.5 \mu\text{m}$ abgeschätzt werden. Die Leistungsfähigkeit des Meßverfahrens liegt vor allem in der sehr guten Sensibilität für Korngrößenänderungen begründet. So kann eine Korngrößenänderung von $0.5 \mu\text{m}$ - z.B. nach einer Bandgeschwindigkeitsänderung von 5 % - mühelos nachgewiesen werden.

b) Dynamikbereich der Messungen

Für den Korngrößenbereich von $10 < D [\mu\text{m}] < 25$ ist 25 MHz die optimale Prüffrequenz. Dieser Bereich kann durch Wahl einer geeigneten Geräteverstärkung an den Dynamikbereich des Analog/Digital-Wandlers, mit dem die Streuamplitude A_s gemessen wird, angepaßt werden. Der Dynamikbereich könnte durch eine zusätzliche Schaltung vergrößert werden, bei der laufend die ortsgemittelte Streuamplitude gemessen wird und nach Überschreiten eines Grenzwertes ein Abschwächer von z.B. 6 dB dazugeschaltet wird.

c) Bänder unterschiedlicher Dicke

Zu großen Banddicken hin gibt es vom Verfahren her keine Einschränkung, bei dünnen Bändern kann die Korngröße bis

zu einer Dicke von ca. $d \approx 0.30$ mm noch gemessen werden. Bei dünneren und vor allem feinkörnigen Bändern ist die auswertbare Amplitude der Ultraschallrückstreuung im ausgeblendeten Bereich kaum größer als das elektrische Rauschen. Eine Möglichkeit, höhere Rückstreuamplituden zu erhalten, ist, die Rückseite des Bandes trocken zu halten, so daß sich die Schallabstrahlung in das Wasser um den Faktor 2 verringert. Dieses hätte jedoch größeren Konstruktionsaufwand bei der Errichtung der Meßapparatur zur Folge gehabt. Eine Erhöhung der Prüffrequenz scheidet als Möglichkeit aus, höhere Streuamplituden zu erzeugen, da sich ja dann die Grenzen des Rayleighschen Streubereiches zu kleineren Korngrößenwerten hin verschieben würden

d) Kontinuität der Messung

Die Korngrößenbestimmung mit dem beschriebenen Meßsystem kann als kontinuierliche Messung gelten, da im 10 msec-Takt Meßwerte aufgenommen und Korngrößenwerte ausgegeben werden. Der Algorithmus zur Ortsmittelung nach Gl. (62), S. 93 erlaubt diesen Gleichtakt von Meßwertaufnahme und Ergebniswertausgabe. Die Messung wird - von Störfällen abgesehen - lediglich durch eventuell notwendige Winkeloptimierungen für ca. 20 sec unterbrochen, die in den meisten Fällen nur an den Bandanfängen oder nach Bandstillständen automatisch eingeleitet werden.

e) Beständigkeit der Meßwerte

Der angezeigte Korngrößenwert kann sich möglicherweise trotz konstanter Korngröße im Band zeitlich verändern. Gründe hierfür können sein:

- Schlechte Wasserqualität: Schmutz und Gasblasen im Wasser, an denen der Ultraschallimpuls gestreut wird, oder Ablagerungen aus dem Wasser am Prüfkopf führen zur Anzeige scheinbar feineren Kornes. Bei gereinigtem Frischwasser

traten wegen des höheren Gasgehaltes meist Gasblasen auf, verursacht durch Turbulenzen (mit auftretendem Unterdruck und nachfolgender Blasenbildung an Kanten) in der Nähe von Prüfkopf und Umlenkrolle. Brauchwasser zeigte zwar keine Gasblasen, jedoch oft Schmutzpartikel, die mit Filtern von der Meßstelle ferngehalten werden könnten. Um Ablagerungen am Prüfkopf zu vermeiden, kann der Prüfkopf in regelmäßigen Abständen, z. B. vor einer Winkeloptimierung an einer Wischvorrichtung vorbeigefahren werden.

- Nachlassen der Prüfkopfleistung: Hierüber liegen noch keine Erfahrungen vor. Möglich wäre eine Kontrolle der Prüfkopfleistung (Einfügungsdämpfung) durch Messung der Amplitude des Echos von einem Referenzreflektor, dessen Reflexionseigenschaften über der Zeit konstant bleiben müssen.
- Nachlassen der Verstärkung in den Geräten: Auch hierüber liegt keine Erfahrung vor. Möglich wäre die Übertragung eines elektrischen Referenzimpulses durch das Gerätesystem zur Kontrolle der Verstärkung.
- Messung bei einem anderen als dem optimalen Einfallswinkel, dem kritischen Winkel α_k : Wird nicht beim optimalen Einfallswinkel gemessen, so wird eine zu kleine Korngröße angezeigt. Normalerweise ändert sich der kritische Winkel, der prinzipiell eine bandspezifische Materialkonstante darstellt, innerhalb eines Bandes jedoch nicht. Durch die automatisch eingeleitete Winkeloptimierung am Bandanfang kann aber sichergestellt werden, daß immer beim optimalen Einfallswinkel gemessen wird.

f) Bedienung des Meßsystems

Nach dem Starten des unendlichen Meßzyklus (Einlesen des Meßprogramms, Betätigen des Einschalters) läuft das Meßsystem bedienungsfrei. Es empfiehlt sich jedoch, den Prüfkopf beim Passieren der Blechschweißnähte aus Sicherheitsgründen in die Schutzposition zu fahren. Dazu genügt es, den Ein/Aus-Schalter kurzzeitig auf "Aus" zu stellen, was routinemäßig durch das Personal erledigt werden kann. Bei Störfällen, wie

z.B. einem Ausfall des Blechdickenmeßgerätes oder des Ultraschallgerätes, gibt das Meßsystem eine Störmeldung heraus, da die Gültigkeit der Eingangsgrößen laufend überwacht wird. Im Störfall wird dann zwar die Korngrößenmessung gestoppt (damit keine falschen Werte angezeigt werden), das Meßsystem bleibt aber aktiv und überprüft fortwährend die Eingangsdaten. Ist der Störfall behoben, beginnt die kontinuierliche Korngrößenmessung automatisch, da wieder gültige Eingangsdaten vorliegen.

8. Zusammenfassung

Austenitische Bänder werden nach dem Kaltwalzen im Durchlauf rekristallisationsgeglüht, um eine bestimmte mittlere Korngröße einzustellen. Zur Gewährleistung der plastischen Verformbarkeit einerseits und der von der Verformung abhängigen Oberflächenrauheit andererseits darf das Korn weder zu fein noch zu grob sein. In der Regel liegen die mittleren Korngrößen D in einem Bereich von $10 < D [\mu\text{m}] < 25$ bei Banddicken d von $0.3 < d [\text{mm}] < 1.5$. Um die Rekristallisationsglühung auf eine bestimmte Korngröße hin steuern zu können, ist eine kontinuierliche zerstörungsfreie Kontrolle der Korngröße im Kaltband nach der Glühung erforderlich. Bislang erfolgte die Kontrolle des Gefüges lediglich durch eine Probenentnahme am Anfang und am Ende der von 800 m bis zu 4000 m langen Bänder und nachfolgende metallographische Korngrößenbestimmung nach dem Linienschnittverfahren. Theoretische und experimentelle Untersuchungen ergaben, daß die Messung des vom Gefüge rückgestreuten Ultraschalls als zerstörungsfreies Meßverfahren zur Bestimmung der Korngröße geeignet ist. Beim vorliegenden Meßproblem war der metallographisch nach dem Linienschnittverfahren ermittelte Korngrößenwert durch einen mit Ultraschall gemessenen Wert zu ersetzen.

Für dickwandige Teile ($d > 10$ mm) ist ein Meßgerät zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung bereits im Handel, das die Korngröße aus dem Amplitudenabfall des von einer einfallenden Transversalwelle im Gefüge rückgestreuten Ultraschalls bei 2 unterschiedlichen Frequenzen ermittelt. Diese Methode eignet sich für dünne Bleche nicht, da blechdickenabhängige Interferenzerscheinungen eine Auswertung des Amplitudenabfalls zur Korngrößenbestimmung stark erschweren. Das in dieser Arbeit beschriebene Meßverfahren eignet sich besonders zur kontinuierlichen Messung der Korngröße an dünnwandigen Bauteilen ($d < 2$ mm) mit quasi-einphasigem Gefüge, wie es bei den austenitischen Stahlqualitäten in der Regel vorliegt. Es wird bei diesen Verfahren sowohl ein anderer Mechanismus zur Anregung der im Gefüge des Blechvolumens gestreuten Schallwellen benutzt, nämlich über den Umweg einer zuerst erzeugten gedämpften Oberflächenwelle, als auch eine andere Art der Auswertung der Amplitude des rückgestreuten Ultraschalls.

Über eine Wasservorlaufstrecke wird ein Ultraschallimpuls so schräg in das vollständig unter Wasser befindliche Blech eingeschallt, daß sich nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz nur noch eine Rayleighsche Oberflächenwelle ausbreitet. Dieser Einfallswinkel wird kritischer Winkel genannt und beträgt für eine Wasser/Austenit-Grenzfläche ca. $\alpha_k = 31^\circ$. Zahlreiche Literatur belegt, daß der Reflexionsfaktor R dieser Grenzfläche, der für den Winkelbereich $0 < \alpha < \alpha_k$ ca. $R = 0,94$ ist, beim kritischen Winkel α_k selbst sehr klein wird. Es wird in dieser Arbeit gezeigt, daß das Ultraschallrückstreusignal beim kritischen Winkel eine maximale Amplitude aufweist. Durch den minimalen Reflexionsfaktor werden an der Grenzfläche kaum noch Schallwellen der einfallenden Longitudinalwelle reflektiert, sondern zu einer Oberflächenwelle umgewandelt. Diese Oberflächenwelle wird sofort wieder in das umgebende Wasser abgestrahlt, wodurch sie eine kurze Reichweite hat; sie wird jedoch im Gebiet ihrer Anregung auf der Blechoberfläche vom Gefüge gestreut. Die Streuwellen haben in das Blechvolumen hinein keine besondere Vorzugsrichtung, so daß die aus dem

Volumen empfangene Ultraschallrückstreuung keine Interferenzerscheinungen aufweist, die von der Blechdicke abhängen.

In dieser Arbeit wird gezeigt, daß die rückgestreuten Schallwellen aus dem Oberflächenbereich und aus dem Volumenbereich zeitlich voneinander getrennt empfangen werden, so daß eine Korngrößenbestimmung im Blechvolumen möglich ist. Zur meßtechnischen Erfassung der Ultraschallrückstreuung und zur Untersuchung von Einflußgrößen auf das Meßergebnis wurde im Labor eine Meßapparatur aufgebaut. Mit dieser ist die Registrierung und Untersuchung von Ultraschallsignalen bis zu sehr hohen Frequenzen (ca. 50 MHz) möglich. Dies war erforderlich, da wegen des vorgegebenen Korngrößenbereiches mit einer Prüffrequenz von 25 MHz gemessen wurde. Bei dieser Frequenz wird der Ultraschall im Gefüge nach dem Mechanismus der Rayleigh-Streuung gestreut. Die bei diesem Mechanismus bestehende lineare Abhängigkeit zwischen Korngröße und $\sqrt{3}$ Wurzel aus dem Quadrat der ortsgemittelten Amplitude (Gl. (66), S. 97) der vom Gefüge rückgestreuten Ultraschallwellen konnte sehr gut durch Messungen bestätigt werden:

$$D = C_1 + C_2 (\bar{A}_s \cdot M)^{2/3}$$

Das bedeutet, daß eine zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung durch eine Registrierung der Amplitude des rückgestreuten Ultraschalls möglich ist, wenn die Meßapparatur vorher an mehreren Blechen mit bekannter Korngröße so kalibriert wurde, daß eine Geradengleichung vorliegt, die den Zusammenhang zwischen Meß- und Ergebnisgröße beschreibt.

Besonders wichtige Einflußgrößen auf das Meßergebnis sind die Blechdicke und die Einhaltung des kritischen Einfallwinkels:

Die gestreuten Ultraschallwellen werden im Blech an den Grenzflächen immer wieder spiegelnd reflektiert, wobei bei jeder Reflexion ein kleiner Anteil in das Wasser abgestrahlt wird. Dies geschieht bei dünnen Blechen häufiger, so daß die Ampli-

tude der empfangenen Ultraschallrückstreuung aus dem Volumen schneller über der Zeit abnimmt. Das bedeutet, daß trotz gleicher Korngröße bei einem dünnen Blech in einem bestimmten Zeitabschnitt des Streusignals ein kleinerer Amplitudenwert gemessen wird als bei einem dicken Blech. Es wurde ein mathematischer Formalismus entwickelt, um diesen Effekt zu kompensieren.

Die genaue Einhaltung des kritischen Winkels (ca. $\pm 0.1^\circ$) ist erforderlich, da bei einer Abweichung vom kritischen Winkel zu kleine Streuamplituden gemessen werden, wodurch ein scheinbar feinkörnigeres Gefüge angezeigt wird. Der Wert des kritischen Winkels ist von der Oberflächenwellengeschwindigkeit abhängig, die wiederum bei unterschiedlichen Legierungsgehalten der Bänder leicht differieren kann (die untersuchten Bänder hatten kritische Winkel von $30 < \alpha_k [^\circ] < 32$). Die Einstellung des kritischen Winkels muß daher bei jedem Band neu erfolgen. Dazu wurde ein iteratives Verfahren benutzt, wobei der Prüfkopf mit Hilfe einer neu konstruierten rechnergesteuerten Manipulationsvorrichtung auf 0.1° genau positioniert werden kann.

Anhand der an Messing- und Bronzeblechen erhaltenen Meßergebnisse konnte bestätigt werden, daß die Meßmethode prinzipiell für alle polykristallinen, einphasigen Gefüge geeignet ist und auch an Blechen aus anderen Werkstoffen als Austenit eingesetzt werden kann.

Für den Einsatz an der Durchlaufglühanlage wurde die Meßapparatur modifiziert. Das entwickelte Korngrößenmeßsystem besteht im wesentlichen aus

- einer Bandführung, die für konstante geometrische Verhältnisse zwischen Prüfkopf und Blech sorgt,
- einem Ultraschallprüfkopf, der durch eine rechnergesteuerte Vorrichtung manipulierbar ist,

- Analog- sowie Digitalelektronik mit einem Prozeßrechner als Herzstück,
- einem Meßprogramm, das in FORTRAN 4X geschrieben wurde.

Anhand des Meßsystems wird in dieser Arbeit genau beschrieben, wie aus der gemessenen Streuamplitude der zugehörige Korngrößenwert ermittelt werden kann. Die Genauigkeit des Meßsystems konnte mit einem absoluten Fehler von ca. $\pm 0,5 \mu\text{m}$ abgeschätzt werden.

Das Korngrößenmeßsystem wurde mehrere Wochen an der Durchlaufglühanlage erprobt. Dabei wurden ca. 120 km austenitisches Kaltband gemessen und umfangreiche metallographische Stichprobenkontrollen zum Vergleich der Ergebnisse durchgeführt. Während der Messungen wurden vielfach die Glühbedingungen, d.h. Bandgeschwindigkeit oder Ofentemperatur, verändert. Die daraus resultierenden Korngrößenänderungen konnten bis zu Änderungen von $0,5 \mu\text{m}$ herab sehr gut detektiert werden. Die mit Ultraschall erhaltenen Meßergebnisse wurden mit den metallographischen Korngrößenwerten verglichen und diskutiert. Es zeigt sich, daß bei der metallographischen Korngrößenbestimmung eine große Meßunsicherheit vorliegt.

Überraschenderweise zeigten einige Bänder vier bzw. sechs periodisch auftretende Korngrößenmaxima (bis zu $4 \mu\text{m}$ gröberes Korn), die sich durch metallographische Stichproben bestätigen ließen. Dieser vorher nicht bekannte Effekt trat nur bei Bändern mit geringen Kaltverformungsgraden auf und hat seine Ursache im Aufbau des Hubbalkenofens, in welchem die Vorbrammen aufgeheizt wurden. Eine Vorbramme liegt dort auf vier bzw. sechs Stößeln auf, an denen beim Aufheizen andere Wärmeübergangsbedingungen vorherrschen, so daß dort offenbar ein anderes Gefüge eingestellt wird. Diese Unregelmäßigkeit pflanzt sich über die Warmbandwalzungen bis hin zum geglühten Kaltband fort und führt dort zu gröberem Korn. Besonders durch den Nachweis dieser Grobkornstellen, die bei kritischen Umformoperationen zu rauhen Oberflächen führen können, konnten Zweck und Leistungsfähigkeit des Meßsystems zur zerstörungsfreien Korngrößenbestimmung an austenitischen Bändern gut unter Beweis gestellt werden.

9. Literatur

- / 1/ E.O. Hall
"The Deformation and Ageing of Mild Steel: III
Discussion of Results"
Proceedings of the Physical Society
Section B, Vol 64, Part 7 (1951) S. 747-753
- / 2/ N. J. Petch
"The Cleavage Strength of Polycrystals"
Journal of the Iron and Steel Institute 174 (1953)
S. 25-28
- / 3/ K. H. Michel, H. M. Mozek, H. Mülders
"Kaltbreitband aus nichtrostenden Stählen"
Stahleisen-Sonderberichte, Heft 13
Verlag Stahleisen mbH., Düsseldorf, 1984
- / 4/ A. Hecht, R. Thiel, E. Neumann, K.H. Michel, H. Mülders
"Zerstörungsfreie Korngrößenmessung in einer Durch-
laufglühanlage an austenitischen Bändern mit Hilfe
der Ultraschallrückstreuung"
Programm Eisen- und Stahlforschung und -technologie
der Bundesregierung, Statusbericht 1982, S. 273-284,
Projektleitung Rohstoffforschung der KFA Jülich
- / 5/ M. Ojala, S. Säynäjäkangas
"A New Electronic Grain Size Analyzer for Technical
Steel"
J. Phys. E: Scientific Instruments 5 (1972) S. 669-672
- / 6/ W. Michel, H. Mülders
"Kontinuierliche Überwachung des Gefügestandes
bei der Durchlaufglühung von nichtrostendem, magneti-
sierbarem Kaltband durch Remanenzmessung"
Stahl und Eisen 99 (1979) 14, S. 746-754
- / 7/ F. Ramirez, M. A. Fernández-Soler
"Evaluation des Surchauffés non Controlées par la
Methode des Courants de Foucault (Conductibilité)"
Preprints 6. ICNT Vol C, 1970; S. 109-121

- / 8/ E. Neumann
 "Vorstudie über die Möglichkeiten, durch Ultraschallprüfung eine Korngrößenbestimmung bei austenitischen Bändern im Anschluß an die Schlußwärmebehandlung im Durchlauf kontinuierlich durchzuführen. Teil I: Literaturübersicht"
 Bericht der Fachgruppe 6.2 "Zerstörungsfreie Prüfung" der BAM-Berlin, 1975-1978
- / 9/ J. Charlier
 "The Interaction between Deformation Stresses and the Monochromatism of the Radiation on the Mottling Effect in Radiographs of Welded Austenitic Steels and Aluminium Alloys"
 Welding in the World, 22 (1984) 5/6, S. 116-124
- /10/ T. Watanabe, Y. Saeki
 "A proposed Theory of the Mottling of Radiographs of Stainless Steel Welds"
 British Journal of NDT (1982) July, S. 181-187
- /11/ P. Rose
 BAM-Berlin, persönliche Mitteilung
- /12/ H.-J. Kopineck, W. Böttcher, A. Maurer
 "Kontinuierliche on-line-Messung des R-Wertes von kaltgewalzten Stahlbändern"
 Zweite Europäische Tagung für zerstörungsfreie Prüfung, Wien, 14.-16. September 1984; Berichtsband S. 107-109
- /13/ P. M. Morse, K. U. Ingard
 "The Scattering of Sound", Chapter 8, "Theoretical Acoustics", McGraw-Hill Book Company, 1968, S. 401-449
- /14/ W. P. Mason, H. J. McSkimin
 "Attenuation and Scattering of High Frequency Sound Waves in Metals and Glasses"
 Journal of the Acoustical Society of America
 19 (1947) 3, S. 464-473

- /15/ W. P. Mason, H. J. McSkimin
"Energy Losses of Sound Waves in Metals Due to Scattering and Diffusion"
Journal of Applied Physics 19 (1948) S. 940-946
- /16/ J. M. Lifshits, G. D. Parkomovskii
"Zur Theorie der Ausbreitung von Ultraschallwellen in Vielkristallen"
Zh-Experim. i. Theor. Fiz. 20 (1950) 2, S. 175-182
- /17/ A. B. Bhatia
"Scattering of High-Frequency Sound Waves in Polycrystalline Materials"
Journal of the Acoustical Society of America 31 (1959) 1
S. 16-23
- /18/ A. B. Bhatia, R. A. Moore
"Scattering of High-Frequency Sound Waves in Polycrystalline Materials II"
Journal of the Acoustical Society of America 31 (1959) 8
S. 1140-1141
- /19/ K. Goebbels
"Structure Analysis by Scattered Ultrasonic Radiation", Chapter IV, S. 88-157
in "Research Techniques in Nondestructive Testing", Vol IV, edited by R. S. Sharpe, 1980, Academic Press Inc. (London) Ltd.
- /20/ D. Aurich
"Die Ultraschallabsorption in vielkristallinen Medien"
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben ERP 2136 (69)
BAM-Berlin, 1977
- /21/ D. Aurich, E. Martin
"Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode"
BAM-Berichte Nr. 10; Berlin, Januar 1972

- /22/ H. Willems, K. Goebbels
"Characterization of Microstructure by Backscattered Ultrasonic Waves"
Metal Science 15 (1981) 11/12, S. 544-553
- /23/ H. Willems
"Gefügebeurteilung durch die Ultraschallrückstreuung von Oberflächenwellen"
IzFP-Bericht 800340-TW, 1980
- /24/ A. Hecht, E. Neumann, K.H. Michel, H. Mülders
"Zerstörungsfreie Korngrößenmessung in einer Durchlaufglühanlage an austenitischen Bändern mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung"
Gemeinsamer Abschlußbericht der BAM-Berlin und der Krupp Südwestfalen AG, Werksgruppe Düsseldorf zu den Projekten 03 S 170 und S 173; Projektträger KFA-Jülich, Rohstoffforschung, Juli 1983
- /25/ A. Hecht, R. Thiel, E. Neumann, E. Mundry
"Nondestructive Determination of Grain Size in Austenitic Sheet by Ultrasonic Backscattering"
Materials Evaluation 39 (1981) 10, S. 935-938
- /26/ E. P. Papadakis
"Revised Grain-Scattering Formulas and Tables"
Journal of the Acoustical Society of America 37 (1965) 4
S. 703-710
- /27/ L.L. Rokhlin
"Scattering of Ultrasound in Polycrystalline Materials"
Soviet Physics-Acoustics 18 (1972) 1, S. 71-75
- /28/ J. Krautkrämer, H. Krautkrämer
"Werkstoffprüfung mit Ultraschall"
4. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1980

- /29/ H. Seki, A. Granato, R. Truell
 "Diffraction Effects in the Ultrasonic Field of a
 Piston Source and Their Importance in the Accurate
 Measurement of Attenuation"
 Journal of the Acoustical Society of America 28 (1956) 2
 S. 230-238
- /30/ E. P. Papadakis
 "Ultrasonic Diffraction Loss and Phase Change for
 Broad-Band Pulses"
 Journal of the Acoustical Society of America 52 (1972) 3
 S. 847-849
- /31/ J. Krautkrämer
 "Die Messung der Ultraschall-Schwächung nach dem
 Echolot-Verfahren"
 Giesserei, Techn.-Wissensch. Beihefte 20 (1958)
 S. 1067-1075
- /32/ E. P. Papadakis
 "Ultrasonic Diffraction Loss and Phase Change in Ani-
 sotropic Materials"
 Journal of the Acoustical Society of America 40 (1966) 4
 S. 863-876
- /33/ E. P. Papadakis, K.A. Fowler, L.C. Lynnworth
 "Ultrasonic Attenuation by Spectrum Analysis of Pulses
 in Buffer Rods: Method and Diffraction Corrections"
 Journal of the Acoustical Society of America 53 (1973) 5
 S. 1336-1343
- /34/ E. Martin, D. Aurich
 "Ultraschallschwächungsmessungen an einer Eisen-Nickel-
 Legierung zur Entwicklung einer zerstörungsfreien
 Meßmethode für die Ermittlung der Gefügeparameter mar-
 tensitischer Gefüge"
 Metall 26 (1972) 8, S. 791-801
- /35/ S. Serabian, R. S. Williams
 "Experimental Determination of Ultrasonic Attenuation
 Characteristics Using the Roney Generalized Theory"
 Materials Evaluation 36 (1978) 8, S. 55-62

- /36/ R. Klinman, G.R. Webster, F.J. Marsh, E.T. Stephenson
 "Ultrasonic Prediction of Grain Size, Strength, and Toughness in Plain Carbon Steel"
 Materials Evaluation 26 (1980) 10, S. 26-32
- /37/ N. Grayeli, D.B. Ilić, F. Stanke, C.H. Chou, J.C. Shyne
 "Studies of Steel Microstructure by Acoustical Methods"
 1979 Ultrasonics Symposium, IEEE-S. 273-277
- /38/ B. Kopec
 "Ultrasonic Inspection of Grain Size in the Materials for Railway Wheel Sets"
 Ultrasonics (1975) Nov., S. 267-274
- /39/ S. Matsumoto, K. Kimura
 "The Relation between Grain Size and Ultrasonic Attenuation Coefficient in Austenitic Stainless Steel and Iron"
 Transactions of National Research Institute for Metals 14 (1972) 4, S. 21-30
- /40/ I. Roman, M. Oron
 "Determination of Grain Size in Uranium-Chromium Alloys by Ultrasonic Attenuation"
 Journal of Materials Science 9 (1974) S. 630-634
- /41/ P. Sommer
 "Einfluß von Ausscheidungen auf die Ultraschallschwächung"
 Metall 34 (1980) 2, S. 146-148
- /42/ P. Sommer
 Gefügeuntersuchungen ein- und mehrphasiger Werkstoffe mittels Ultraschallwellen"
 Dissertation, Universität Duisburg, Fachbereich Maschinenbau, 1981
- /43/ P. Sommer
 "Aufbau einer Versuchseinrichtung für labormäßige Untersuchungen mit Ultraschallwellen"
 Materialprüfung 22 (1980) 12, S. 461-465

- /44/ M. Bitterl
 "Beitrag zur zerstörungsfreien Messung von Werkstoffkennwerten schweißgeeigneter Baustähle mit handelsüblichen Ultraschallgeräten", Dissertation TU Graz, 1980
 Kurzfassung in Schweissen + Schneiden 34 (1982) 1, S. 39-40
- /45/ G. Bott, E. Sembritzki, H. Taxhet, H. Smit
 "Anwendung der Ultraschallschwächungsmeßmethode als Sortierverfahren für normalgeglühte und nicht geglühte Bleche"
 Materialprüfung 19 (1977) 7, S. 251-263
- /46/ B. Fay
 "Theoretische Betrachtungen zur Ultraschallrückstreuung"
 Acustica 28 (1973) S. 354-357
- /47/ J. Koppelman, B. Fay
 "Die quantitative Auswertung von Ultraschall-Rückstreuungsmessungen in Metallen"
 Acustica 29 (1973) 5, S. 297-302
- /48/ B. Fay
 "Ermittlung der Korngröße von Stahl mit dem Verfahren der Ultraschallrückstreuung"
 Archiv für das Eisenhüttenwesen 47 (1976) 2, S. 119-126
- /49/ K. Goebbels
 "Gefügebeurteilung mittels Ultraschall-Streuung"
 Materialprüfung 17 (1975) 7, S. 231-233
- /50/ K. Goebbels
 "Die Messung des Ultraschall-Streukoeffizienten mit Hilfe der Mehrfachstreuung"
 Materialprüfung 18 (1976) 3, S. 86-88
- /51/ R. Neumann, K. Goebbels
 "Geräteprototyp zur Gefügebeurteilung mittels Ultraschall-Rückstreuung"
 Zerstörungsfreie Prüfung in der Kerntechnik, Lindau 25.-27.5.1981, Vorträge der 4. Intern. Konferenz, S. 337-346, DGZfP

- /52/ H. Willems, K. Goebbels
"Gefügebeurteilung durch die Ultraschallrückstreuung von Oberflächenwellen"
Materialprüfung 22 (1980) 9, S. 356-358
- /53/ I. A. Viktorov
"Rayleigh- and Lamb Waves"
New York, Plenum Press 1967
- /54/ A. Hecht, R. Thiel, B. Funck, E. Neumann, E. Mundry
"Konzeption, Aufbau und Arbeitsweise eines rechnergesteuerten Ultraschallmeßplatzes, dargestellt am Beispiel der Gefügeuntersuchung an austenitischen Rohren"
Zweite Europäische Tagung für Zerstörungsfreie Prüfung, Wien, 14.-16. September 1981; Berichtsband S. 280-281
- /55/ R. Thiel, A. Hecht
"Aufbau und Arbeitsweise eines universellen rechnergesteuerten Ultraschallmeßplatzes"
Vortragstagung Zerstörungsfreie Materialprüfung der DGZfP, Saarbrücken, 17.-19.5.1982; Plakatvortrag P2-13
- /56/ H. Wüstenberg, E. Mundry
"Consideration of the Ultrasonic Testing Method as an Information Transfer System"
British Journal of NDT, 15 (1973) 2, S. 36-42
- /57/ P. Cherian
"Beitrag zur Aufklärung des Mechanismus der Ultraschallstreuung in polykristallinen Medien"
Diplomarbeit TU-Berlin; Fachbereich 17, Werkstoffwissenschaften; 1980
- /58/ A. Hecht, P. Cherian, E. Neumann, E. Mundry
"Effekte bei der Ausbreitung kurzer Ultraschallimpulse in streuenden Werkstoffen"
Materialprüfung 23 (1981) 9, S. 301-304

- /59/ A. Hecht
 Korngrößenmessung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung"
 Diplomarbeit TU-Berlin; Fachbereich 17, Werkstoffwissenschaften; 1978
- /60/ A. Hecht, E. Neumann, E. Mundry, R. Thiel
 "Probleme bei der Korngrößenbestimmung an austenitischen Bändern mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung"
 Internationales Symposium der DGZfP 17.-19.9.1979, Saarbrücken; Neue Verfahren der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung und deren Anwendungen insbesondere in der Kerntechnik. Berichtsband S. 221-228
- /61/ J. P. Parekh
 "Reflection and Bulk-Wave Conversion of Rayleigh Wave at a Single Shallow Groove"
 Journal of Applied Physics 48 (1977) 3, S. 994-1003
- /62/ H. S. Tuan
 "On Bulk Waves Excited at a Groove by Rayleigh Waves"
 Journal of Applied Physics 46 (1975) 1, S. 36-41
- /63/ B. A. Auld
 "Acoustic Fields and Waves in Solids"
 Volume II. John Wiley & Sons New York, London, Sydney, Toronto; 1973, S. 285
- /64/ L. Adler, G. W. Scott
 "Application of Ultrasonic Leaky Waves in NDE"
 1976 Ultrasonics Symposium Proceedings, IEEE Cat. 76 CH 1120-5SU, S. 100-102
- /65/ M. A. Breazeale, L. Adler, G.W. Scott
 "Interaction of Ultrasonic Waves Incident at the Rayleigh Angle onto a Liquid-Solid Interface"
 Journal of Applied Physics 48 (1977) 2, S. 530-537

- /66/ F. L. Becker, R. L. Richardson
"Critical-Angle Reflectivity"
The Journal of the Acoustical Society of America,
45 (1969) 3, S. 793-794
- /67/ T. D. K. Ngoc, W. G. Mayer
"Numerical Integration Method for Reflected Beam Profiles near Rayleigh Angle"
The Journal of the Acoustical Society of America,
67 (1980) 4, S. 1149-1152
- /68/ T. D. K. Ngoc, W. G. Mayer
"A General Description of Ultrasonic Nonspecular Reflection and Transmission Effects for Layered Media"
IEEE-Transactions on Sonics & Ultrasonics
Vol SU-27 (1980) 5, S. 229-236
- /69/ F. L. Becker, R. L. Richardson
"Influence on Materials Properties on Rayleigh Critical Angle Reflectivity"
The Journal of the Acoustical Society of America 51
(1972) 5, S. 1609-1617
- /70/ G. Mott
"Reflection and Refraction Coefficients at a Fluid-Solid Interface"
The Journal of the Acoustical Society of America 50
(1971) 3, S. 819-824
- /71/ O. I. Diachok, W. G. Mayer
"Conical Reflection of Ultrasound from a Liquid-Solid Interface"
The Journal of the Acoustical Society of America 47
(1970) 1, S. 155-157
- /72/ L. Adler, M. de Billy, G. J. Quentin
"Excitation of Ultrasonic Leaky Waves at Liquid-Solid Interface for General Angle Incidence"
Journal of Applied Physics 53 (1982) 12, S. 8756-8758

- /73/ M. de Billy, L. Adler, G. Quentin
 "Parameters Affecting Backscattered Ultrasonic Leaky-Rayleigh Waves from Liquid-Solid Interfaces"
 The Journal of the Acoustical Society of America
 72 (1982) 3, S. 1018-1020
- /74/ T. D. K. Ngoc, W. G. Mayer
 "Theoretical Prediction of a Backscattering Maximum at Rayleigh-Angle Incidence for a Smooth Liquid-Solid-Interface"
 The Journal of the Acoustical Society of America
 75 (1984) 1, S. 186-188
- /75/ A. N. Norris
 "Back Reflection of Ultrasonic Waves from a Liquid-Solid-Interface"
 The Journal of the Acoustical Society of America
 73 (1983) 2, S. 427-434
- /76/ H. L. Bertoni, T. Tamir
 "Unified Theory of Rayleigh-Angle Phenomena for Acoustic Beams at Liquid-Solid Interfaces"
 Applied Physics 2 (1973) S. 157-172
- /77/ HARWELL INDUSTRIAL RESEARCH
 Informationsschriften: "Materials Evaluation Service" und "Ultrasonic Goniometer"; Febr. 1970
- /78/ B. Fay
 "Ausbreitung von Ultraschall in streuenden Substanzen"
 Acustica 48 (1981) 4, S. 218-227
- /79/ A. Schoch
 "Schallreflexion, Schallbrechung und Schallbeugung"
 Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften, Band 23, S. 127-234, Springer-Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1950
- /80/ K. Michel
 Krupp Südwestfalen AG., persönliche Mitteilung

- /81/ K. Goebbels
 "Zur Entstehung von Hochfrequenz-Ultraschall-Rückstreusignalen"
 Materialprüfung 24 (1982) 9, S. 314-316
- /82/ R. Isermann
 "Digitale Regelsysteme", S. 358-361
 Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1977
- /83/ H. Schumann
 "Metallographie"
 VEB-Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1974; 8. Auflage, S. 54
- /84/ 1983 Annual Book of ASTM-Standards, Section 3,
 Volume 03.03
 Designation: E 112-82 "Standard Methods for Determining
 Average Grain Size", S. 121-155
- /85/ L. Sachs
 "Angewandte Statistik"
 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg,
 New York, 1978; S. 328
- /86/ TAS-plus "Gerätesystem zur automatischen Aufbereitung
 und Auswertung optischer Bilder"
 Leitz Wetzlar GmbH, Firmenschrift 521-058, 1981

Im Anhang zitierte Literatur:

- / 1/ J. G. Ottes
 "CAMAC - Ein System rechnergeführter Elektronik"
 Elektronik (1970) 10, S. 335-338
- / 2/ A. Piotrowski
 "IEC-Bus"
 Franzis-Verlag, GmbH, München, 2. Auflage 1984

11. Anhang

A1 Beschreibung der verwendeten Geräte

A1.1 Ultraschallgerät 5052 PR

Das handelsübliche Ultraschallgerät 5052 PR besteht aus einer Sende- und einer Empfangseinheit. Die Sendeeinheit erzeugt mit einer vorwählbaren Impulsfolgefrequenz (im kHz-Bereich) sehr kurze Hochspannungsimpulse, wobei vier Energiestufen einstellbar sind, Abb. 1A.

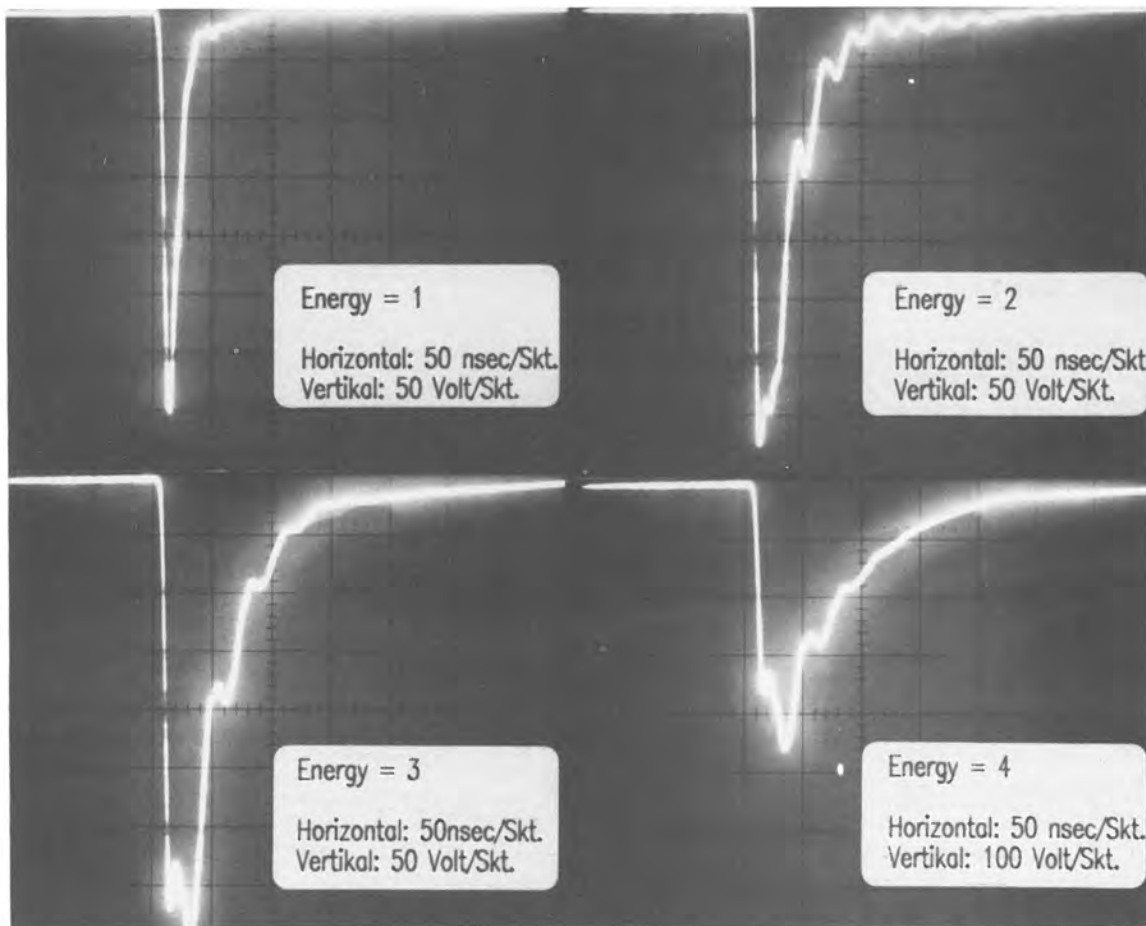


Abb. 1A: Schirmbilder des Sendeimpulses bei den 4 möglichen Energiestufen (minimale Dämpfung, Damping = 0)

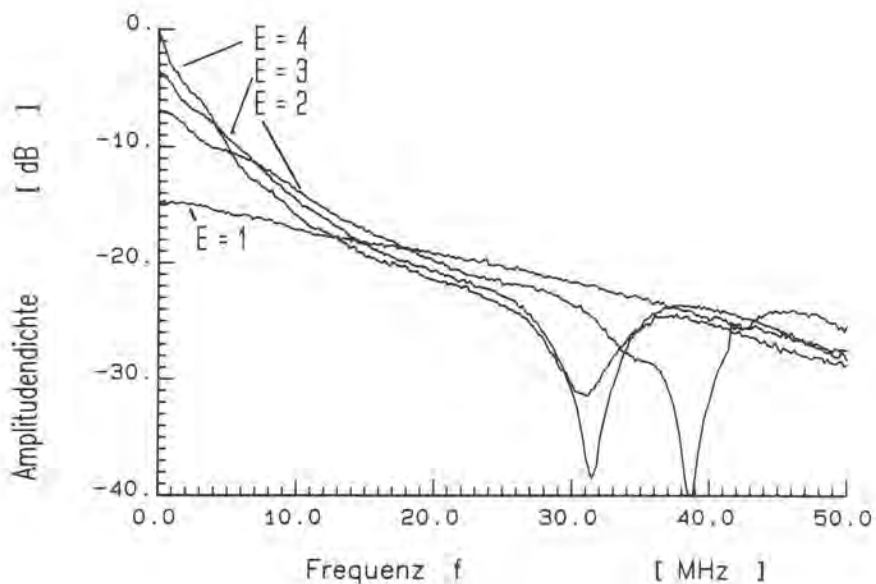


Abb. 2A: Amplitudenspektren der Sendeimpulse aus der Abb. 1A

Die Abb. 2A zeigt, daß im Bereich der zumeist verwendeten Frequenz von $f = 25$ MHz der Sendeimpuls bei der kleinsten Energie $E = 1$ sowohl eine größere Amplitude aufweist als auch das glatteste Amplitudenspektrum. Daher wurde immer $E = 1$ eingestellt.

Der kurze Hochspannungsimpuls wird auf den Prüfkopf gegeben, der diesen in einen akustischen Impuls umwandelt (siehe Prüfkopf-Datenblätter in A1.2). Diese akustischen Impulse werden entweder als Echos vom selben Prüfkopf empfangen (Impuls/Echo-Technik) oder von einem zweiten empfangenden Prüfkopf (Sende/Empfangs-Technik) und in ein elektrisches Signal zurückverwandelt. Diese sehr schwachen Signale (mV) werden in der Empfangseinheit verstärkt und können auf einem Oszilloskop betrachtet werden.

Wichtigste Gerätekennwerte:

Impulsfolgefrequenz	: kontinuierlich einstellbar zwischen 200 - 5000 Hz
Sendeenergie	: in 4 Stufen (siehe Abb. 1A)
Dämpfung	: 5 - 250 Ohm, stufenlos
Empfangsverstärker	: x 10 oder x 100
Abschwächer	: 0 - 68 dB in 2 dB-Stufen
Bandbreite	: 100 Hz - 30 MHz
Max. Ausgangsspannung	: \pm 0.5 Volt in 50 Ohm

Al.2 Verwendete Prüfköpfe

Ultraschallprüfköpfe können durch den piezoelektrischen Effekt elektrische Signale in akustische umwandeln und umgekehrt. Es wurden ausschließlich unfokussierte, handelsübliche Tauchtechnikprüfköpfe verwendet, die für einen Betrieb unter Wasser ausgelegt sind. Zur besseren Signalausbeute ist die Piezokeramik bei Tauchtechnikprüfköpfen in der Regel durch eine $\lambda/4$ -Schicht akustisch an das Wasser angepaßt. Diese Schicht ist sehr empfindlich gegen mechanische Beschädigungen.

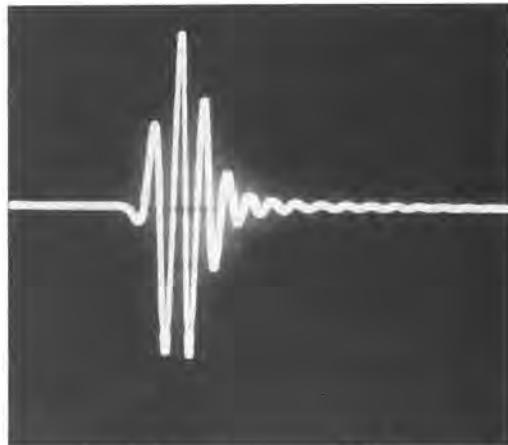
Zur Charakterisierung der verwendeten Prüfköpfe wurden Datenblätter angefertigt (S. 155 - 161), die alle wesentlichen Kennwerte enthalten. Besonderes wichtig ist das vom Oszilloskop abfotografierte Schirmbild des Impulses (Echo eines ebenen Reflektors im Wasser in 50 μ sec zeitlichem Abstand) sowie das am analogen Spektrumanalysator erhaltene Amplitudenspektrum.

PRÜFKOPF-DATENBLATT

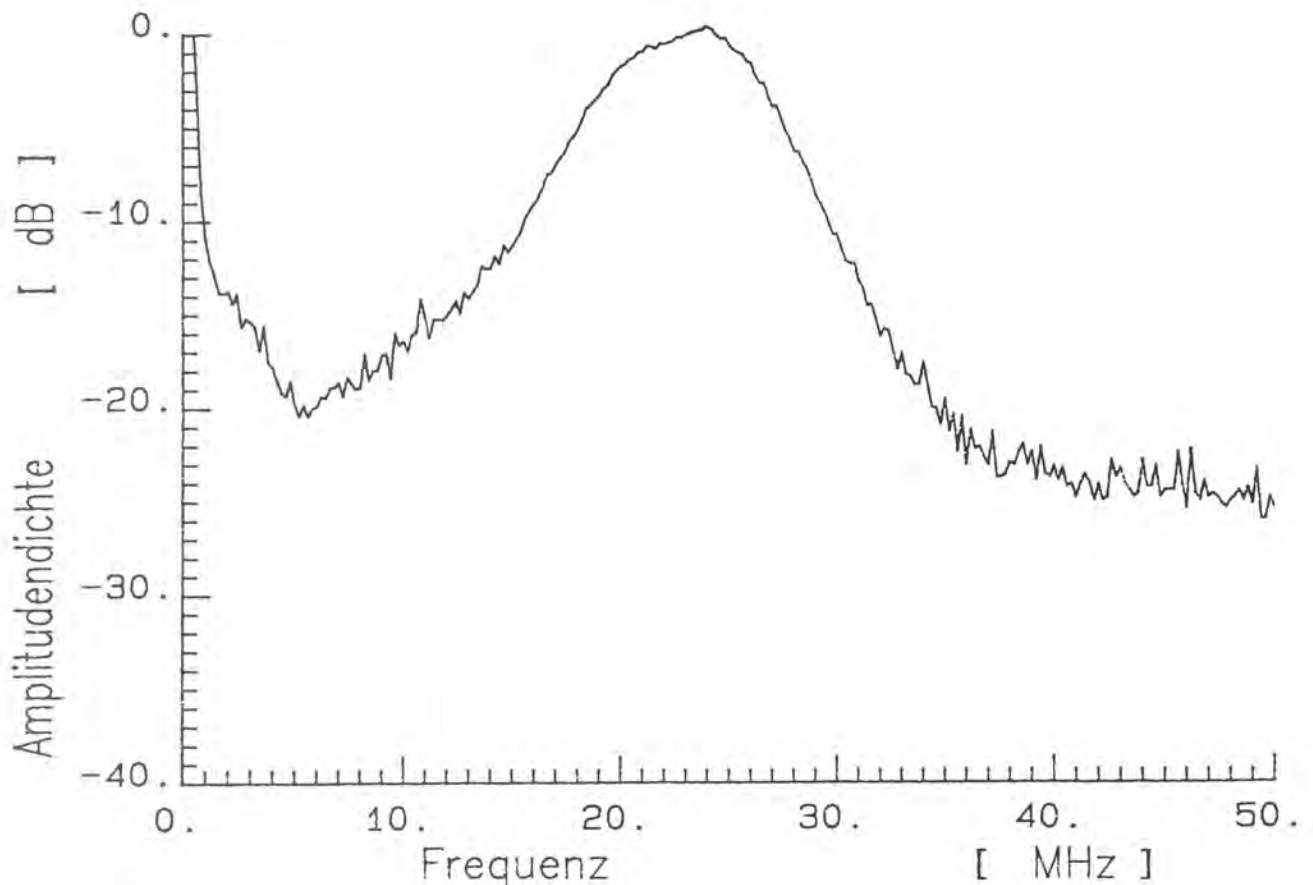
Prüfkopf Nr.....:	25.130	Datum.....:	22.6.83
Hersteller.....:	Panam	Reflektor.....:	Eintritt/Quarzscheibe
Typ.....:	V324	Abstand.....:	50 μ s
Nennfrequenz.....:	25,0 MHz	Ankopplung.....:	H ₂ O
Resonanzfrequenz...:	23,5 MHz	Gerät.....:	5052 UA
6dB-Bandbreite.....:	10,45 MHz	Energy.....:	1
Schwinger- \emptyset:	6,35 mm	Damping.....:	50 Ω
Nahfeldlänge.....:	170,2 mm	Attenuation...:	6 dB
		Gain.....:	20 dB

Bemerkungen:

Verwendet bei allen Grundlagenmessungen mit $f=25$ MHz sowie an der Durchlaufglüh-anlage



Zeitbasis...: 0,1 μ s/div.
 Amplitude...: 100 mV/div.

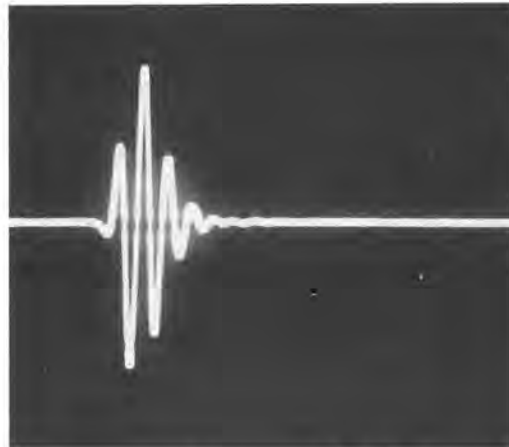


PRÜFKOPF-DATENBLATT

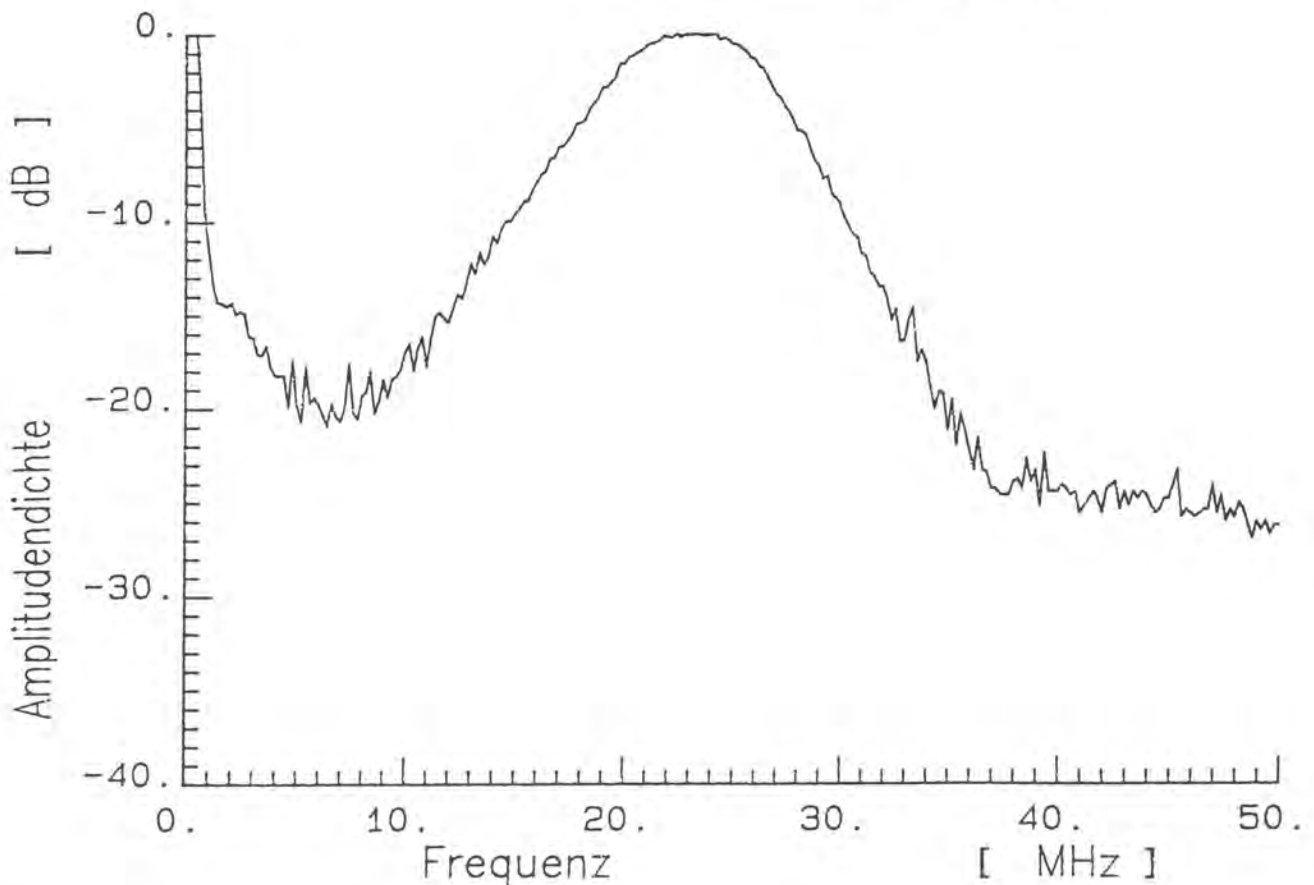
Prüfkopf Nr.....:	41184	Datum.....:	22.6.83
Hersteller.....:	Panam	Reflektor.....:	Eintritt/Quarzscheibe
Typ.....:	V.324	Abstand.....:	50 μ s
Nennfrequenz.....:	25,0 MHz	Ankopplung.....:	H ₂ O
Resonanzfrequenz...:	23,2 MHz	Gerät.....:	5052 UA
6dB-Bandbreite.....:	11,45 MHz	Energy.....:	1
Schwinger- \emptyset:	6,35 mm	Damping.....:	50 Ω
Nahfeldlänge.....:	170,2 mm	Attenuation...:	10 dB
		Gain.....:	20 dB

Bemerkungen:

Verwendet bei der Messung nach Abb. 39 sowie an der Durchlaufglühanlage



Zeitbasis...: 0,1 μ s/div.
 Amplitude...: 100 mV/div.

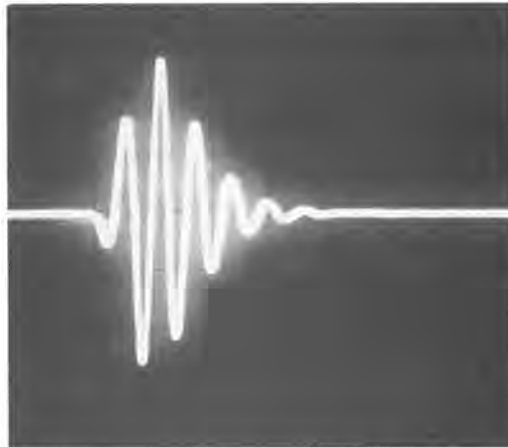


PRÜFKOPF-DATENBLATT

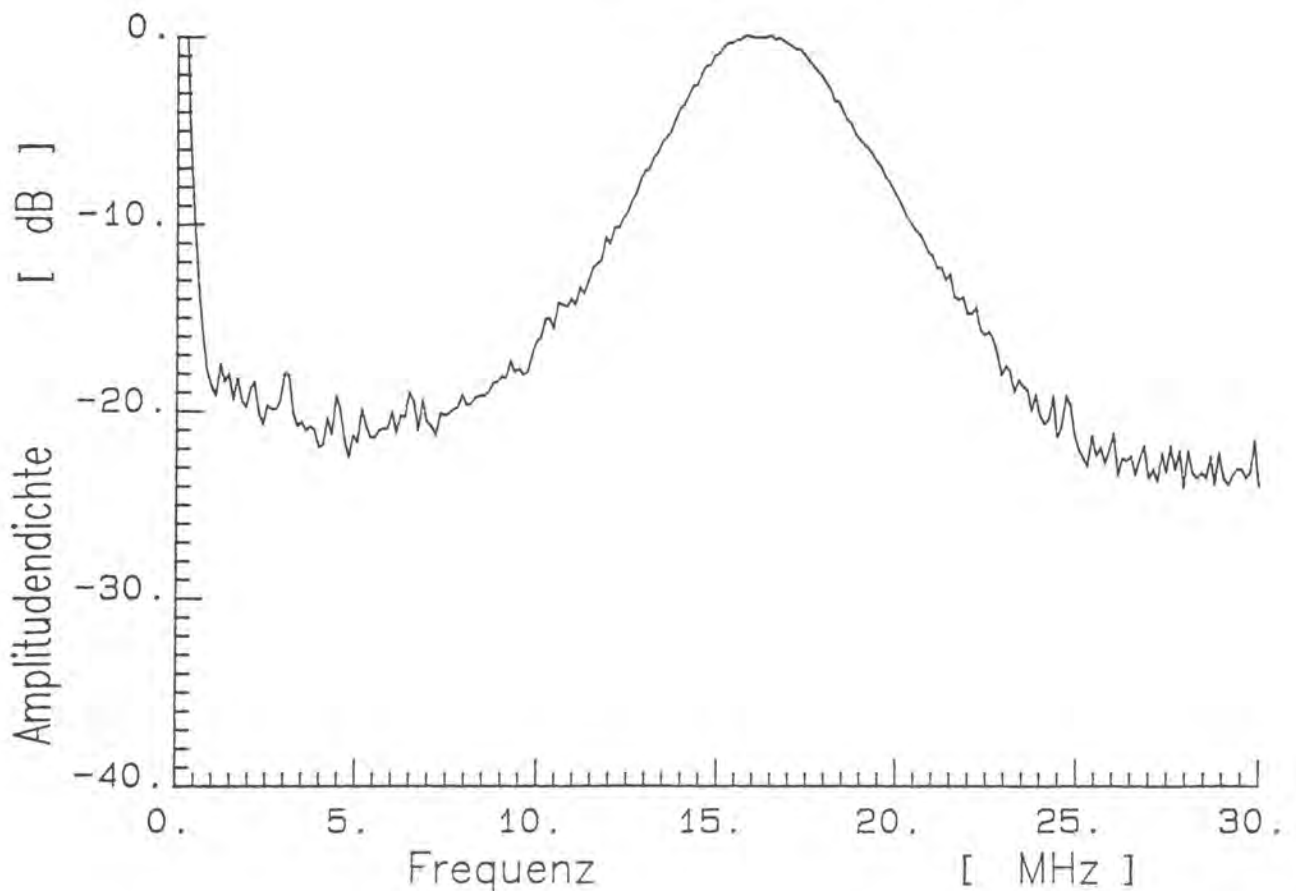
Prüfkopf Nr.....:	50730	Datum.....:	22.6.83
Hersteller.....:	Panam.	Reflektor.....:	Eintritt/Quarzscheibe
Typ.....:	V313	Abstand.....:	50 µs.
Nennfrequenz.....:	15,0 MHz	Ankopplung.....:	H ₂ O
Resonanzfrequenz...:	16,1 MHz	Gerät.....:	5052 UA
6dB-Bandbreite.....:	5,8 MHz	Energy.....:	1
Schwinger-Ø.....:	6,35 mm	Damping.....:	50 Ω
Nahfeldlänge.....:	102,1 mm	Attenuation...:	20 dB
		Gain.....:	20 dB

Bemerkungen:

Verwendet bei den Messungen
an Messing- und Bronzeblechen
(Abbn. 57 und 58)



Zeitbasis...: 0,1 µs/div.
Amplitude...: 100 mV/div.

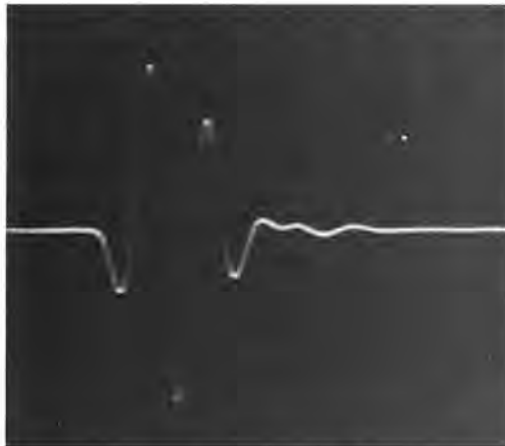


PRÜFKOPF-DATENBLATT

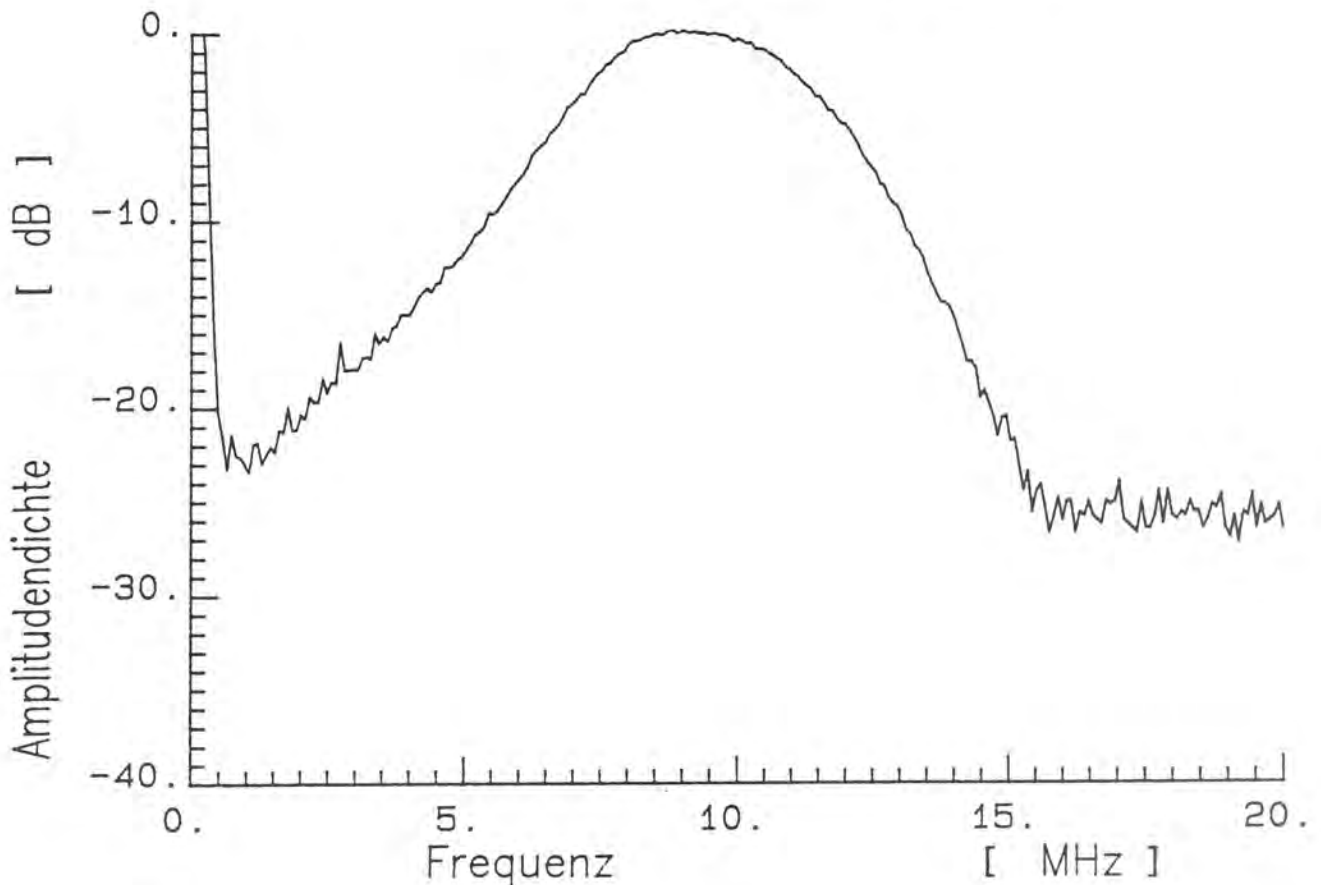
Prüfkopf Nr.....:	36862.	Datum.....:	22.6.83
Hersteller.....:	Panam.	Reflektor.....:	Eintritt/Quarscheibe
Typ.....:	V311	Abstand.....:	50 μ s.
Nennfrequenz.....:	100 MHz	Ankopplung.....:	H ₂ O
Resonanzfrequenz...:	9,02 MHz	Gerät.....:	50 μ A
6dB-Bandbreite.....:	5,4 MHz	Energy.....:	1
Schwinger- \emptyset:	12,7 mm	Damping.....:	50 Ω
Nahfeldlänge.....:	272 mm	Attenuation...:	18 dB
		Gain.....:	20 dB

Bemerkungen:

Verwendet bei den Messungen in Kap. 3.2 sowie in der Abb. 23



Zeitbasis...: 0,1 μ s/div.
 Amplitude...: 100 mV/div.



PRÜFKOPF-DATENBLATT

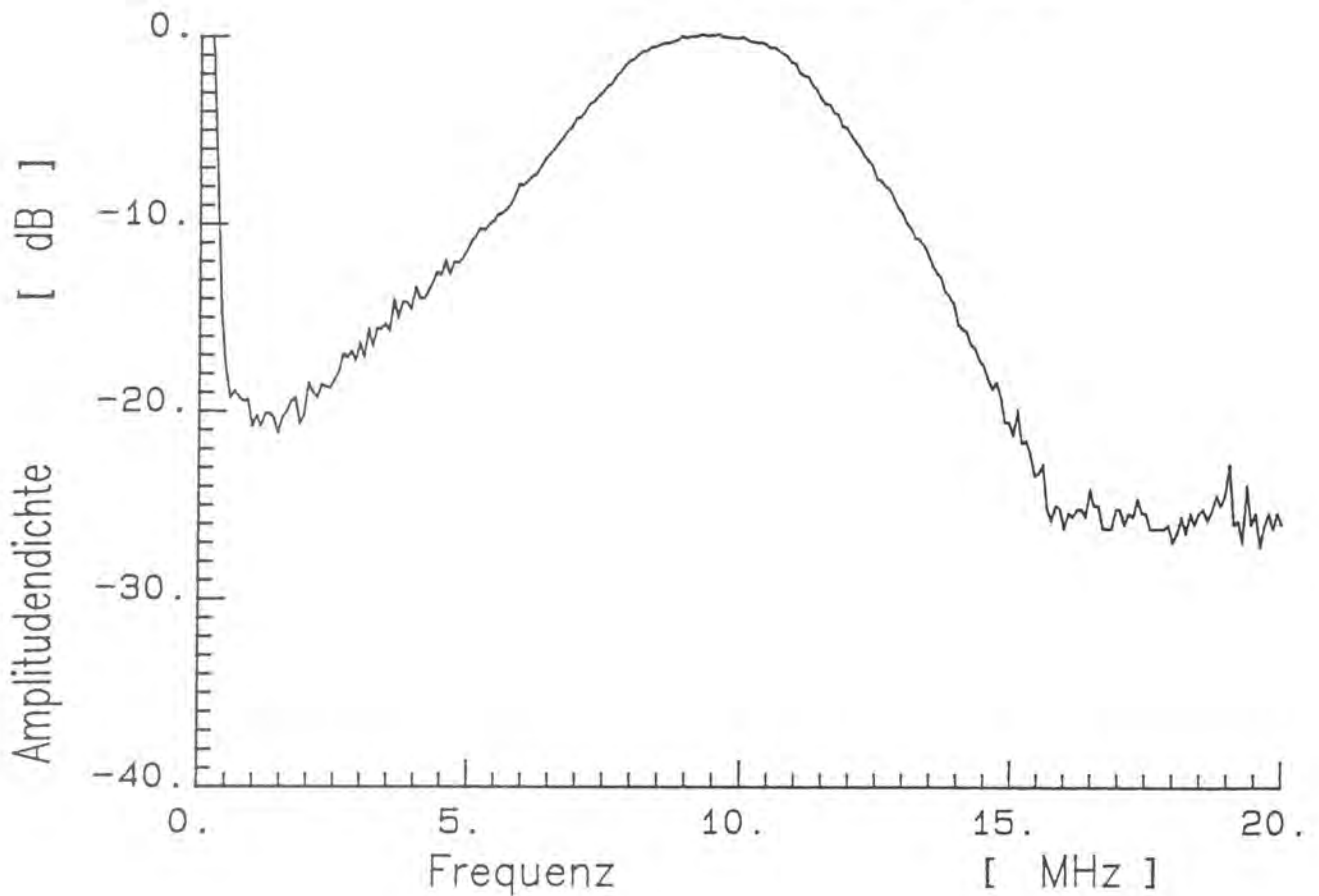
Prüfkopf Nr.....:	36863	Datum.....:	22.6.83
Hersteller.....:	Parom	Reflektor.....:	Eintritt/Quarzscheibe
Typ.....:	V311	Abstand.....:	50 μ s
Nennfrequenz.....:	10.0 MHz	Ankopplung.....:	H ₂ O
Resonanzfrequenz...:	9.3 MHz	Gerät.....:	5052 UA
6dB-Bandbreite.....:	5.6 MHz	Energy.....:	1
Schwinger- \emptyset:	12.7 mm	Damping.....:	50 Ω
Nahfeldlänge.....:	272 mm	Attenuation...:	16 dB
		Gain.....:	20 dB

Bemerkungen:

Verwendet bei den Messungen
in Kap. 3.2



Zeitbasis...: 0.1 μ s/div.
Amplitude...: 100 mV/div.



PRÜFKOPF-DATENBLATT

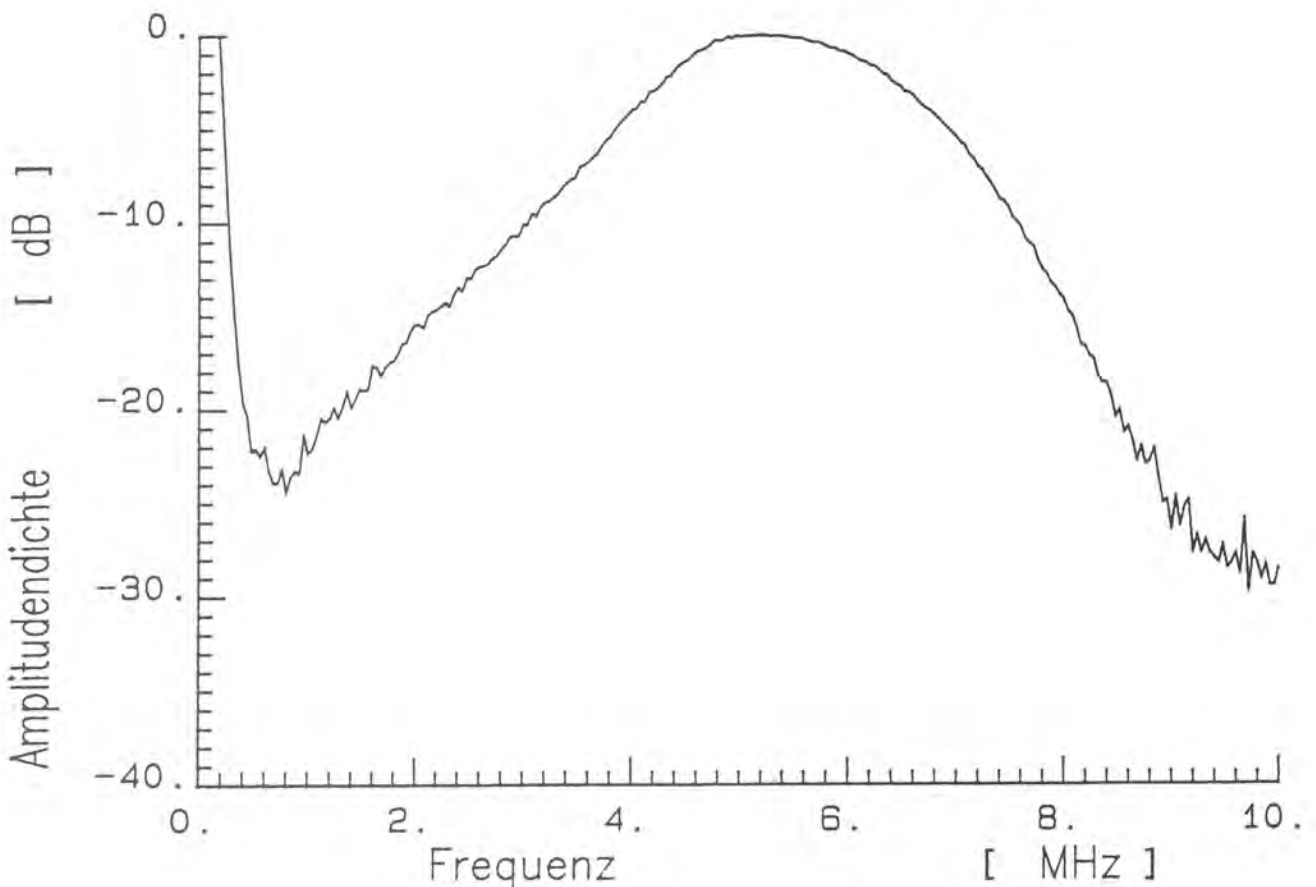
Prüfkopf Nr.....:	<i>1401</i>	Datum.....:	<i>22.6.83</i>
Hersteller.....:	<i>Panam.</i>	Reflektor.....:	<i>Eintrittl. Quarzscheibe</i>
Typ.....:	<i>V.309</i>	Abstand.....:	<i>50 μs</i>
Nennfrequenz.....:	<i>5.0</i> MHz	Ankopplung.....:	<i>H20</i>
Resonanzfrequenz...:	<i>5.2</i> MHz	Gerät.....:	<i>5052 UA</i>
6dB-Bandbreite.....:	<i>3.34</i> MHz	Energy.....:	<i>1</i>
Schwinger-Ø.....:	<i>12.7</i> mm	Damping.....:	<i>50 Ω</i>
Nahfeldlänge.....:	<i>136</i> mm	Attenuation...:	<i>16</i> dB
		Gain.....:	<i>20</i> dB

Bemerkungen:

Verwendet bei der Messung
nach Abb. 32



Zeitbasis...: *0.2* μs/div.
Amplitude...: *100* mV/div.

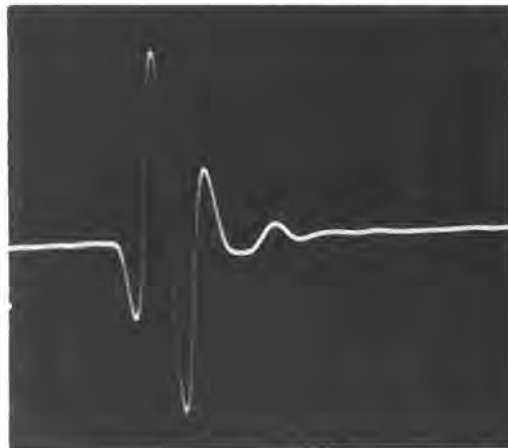


PRÜFKOPF-DATENBLATT

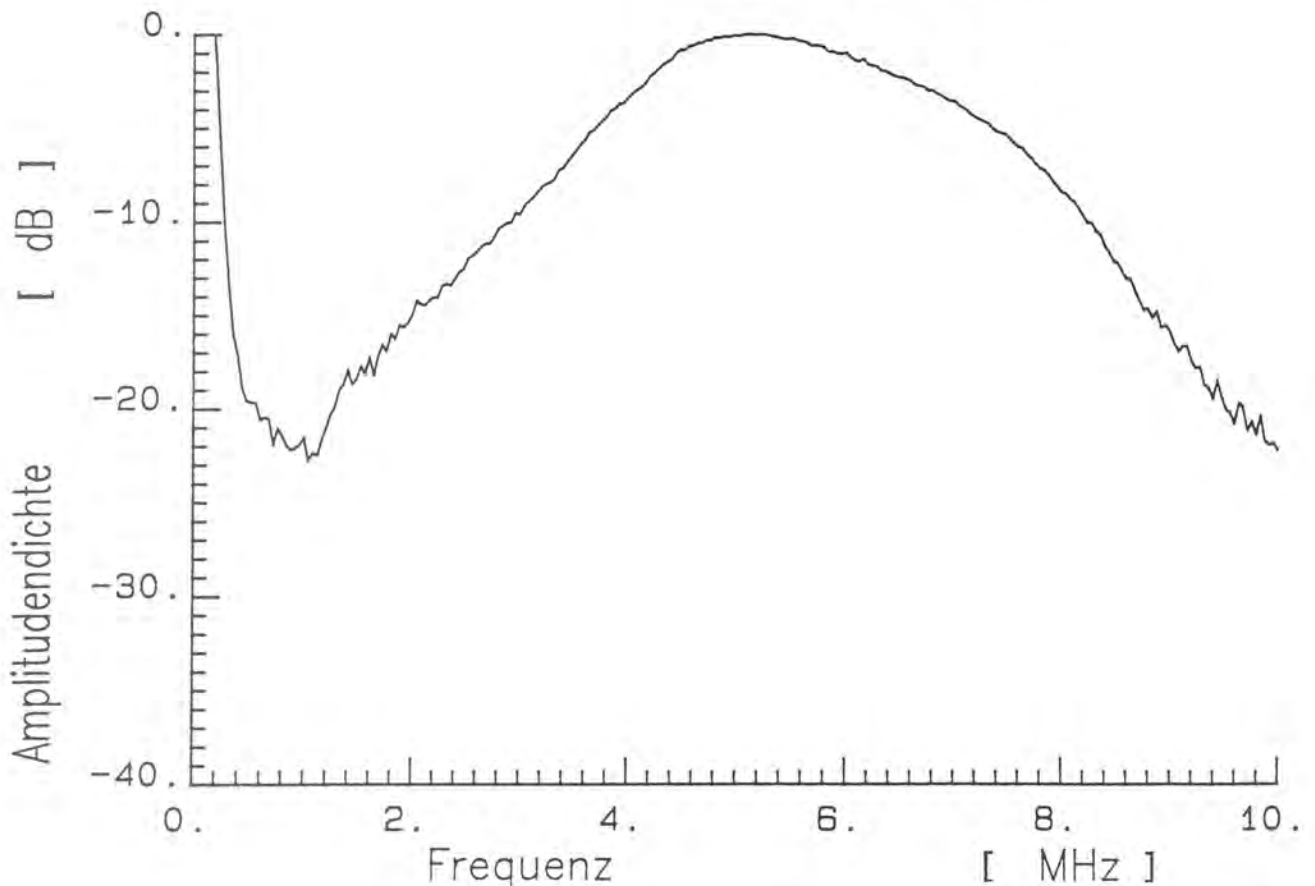
Prüfkopf Nr.....:	32733	Datum.....:	22.6.83
Hersteller.....:	Panam.	Reflektor.....:	Eintritt/Quarzscheibe
Typ.....:	V309	Abstand.....:	50 μ s
Nennfrequenz.....:	5.0 MHz	Ankopplung.....:	H ₂ O
Resonanzfrequenz...:	5.1 MHz	Gerät.....:	50524A
6dB-Bandbreite.....:	4.06 MHz	Energy.....:	1
Schwinger- \emptyset:	12.7 mm	Damping.....:	50 μ s
Nahfeldlänge.....:	136 mm	Attenuation...:	12 dB
		Gain.....:	20 dB

Bemerkungen:

Verwendet bei der Messung
nach Abb. 32



Zeitbasis...: 0.2 μ s/div.
Amplitude...: 100 mV/div.



Al.3 Ultraschallanalysator 5052 UA

Der handelsübliche Ultraschallanalysator 5052 UA stellt eine Erweiterung des Gerätes 5052 PR (Al.1) dar. Zusätzlich zur Sende- und Empfangseinheit besitzt dieses Gerät eine Torschaltung, mit der ein Zeitfenster stufenlos in Lage und Dauer verstellt werden kann. Mit Hilfe dieses Zeitfensters können definierte Signale oder Signalbereiche ausgeblendet und z.B. auf einem Oszilloskop dargestellt werden. Außerdem besitzt der Ultraschallanalysator einen Spitzenwerthalter, mit dem die maximale Signalamplitude (positive oder negative Polarität wählbar) im ausgeblendeten Zeitbereich gemessen werden kann.

Der Ultraschallanalysator wurde bei dem in der Abb. 62, S. 83 dargestellten Meßsystem als Empfänger für die bereits vorverstärkten Rückstreusignale $A_s(t)$ eingesetzt und diente zur Messung der Streuamplitude A_s im Auswertebereich Δt . Eine in diesem Gerät zusätzlich eingebaute Abstandsmeßelektronik wird im Anhang A2 beschrieben.

Wichtigste Gerätekennwerte:

Impulsfolgefrequenz	in Stufen einstellbar zwischen 100 - 5000 kHz
Sendeenergie	in 4 Stufen einstellbar zwischen $14 - 94 \cdot 10^{-6}$ J
Dämpfung	50 - 500 Ohm, in 4 Stufen
Empfangsverstärker	x 10 oder x 100
Abschwächer	0 - 68 dB in 2 dB-Stufen
Bandbreite	1 kHz - 40 MHz
Lage des Zeitfensters	0.1 - 200 μ sec nach Triggersignal
Dauer des Zeitfensters	0.1 - 200 μ sec
Bandbreite des Zeitfensters	0.5 - 50 MHz
Höhe der Schaltimpulse	≤ 15 mV
Linearitätsbereich des Spitzenwerthalters	0.2 - 10 Volt Ausgangsspannung

Al.4 Multiplizier-Oszilloskop PM 3243

Das handelsübliche Oszilloskop PM 3243 dient hauptsächlich zum Betrachten der empfangenen Ultraschallstreusignale $A_s(t)$. Bei dem in der Abb. 62, S. 83 dargestellten Meßsystem wird das gesamte Streusignal $A_s(t)$ auf dem Kanal A dargestellt und das ausgeblendete Signal $A_s(t)$ im Auswertebereich Δt auf dem Kanal B, so daß Lage und Dauer des Auswertebereiches Δt während der Korngrößenmessung kontrolliert werden können.

Bei dem in der Abb. 16, S. 25 dargestellten Meßaufbau dient das Oszilloskop PM 3243 zusätzlich zur Realisierung einer Torschaltung zur Aufnahme von Amplitudenspektren. Im Vergleich mit der im Ultraschallanalysator 5052 UA eingebauten Torschaltung kann mit dem Multiplizier-Oszilloskop ein "sauberes" Zeitfenster realisiert werden, ohne eventuell störende Schaltimpulse. Dazu wird das gesamte Signal $A(t)$ oder $A_s(t)$ auf den Kanal A gegeben. Lage und Dauer des Tores können durch einen geräteintern erzeugten TTL-Puls stufenlos bestimmt werden, der auf den Kanal B gegeben wird. Nach einer durchzuführenden Abgleichprozedur wird das ausgeblendete Signal $A \times B$ erhalten und zur Bildung eines Amplitudenspektrums auf den Spektrumanalysator gegeben.

Wichtigste Gerätekenwerte:

Vertikalachse:

Kanäle: A, B
Bandbreite: DC bis 50 MHz, -3 dB
Anstiegszeit: 7 nsec
Genauigkeit: ± 3 %

Horizontalachse:

Hauptzeitbasis: 0.5 sec/Skt - 50 nsec/Skt
Genauigkeit: ± 3 %
Verzögerte Zeitbasis: 0.2 sec/Skt - 50 nsec/Skt
Genauigkeit: ± 3 %

Multiplizierer:

Bandbreite: DC bis 40 MHz, -3 dB
Ausstiegszeit: 9 nsec
Nichtlinearität: ± 4 % max

Al.5 Transientenrekorder DL 922

Der Transientenrekorder DL 922 dient zur Aufnahme und digitalen Abspeicherung von Zeitsignalen $A(t)$. Anders als ein digitales Speicheroszilloskop kann ein Transientenrekorder auch einmalige Signale schnell aufnehmen und abspeichern. Trotz der hier im 1 kHz-Takt dauernd anfallenden Streusignale wurde ein Transientenrekorder verwendet, um schnelle Auslesegeschwindigkeiten realisieren zu können.

Der Transientenrekorder wurde für die Grundlagenmessungen zur Erarbeitung der Meßmethode verwendet; bei der Meßapparatur für die Durchlaufglühanlage wurde er nicht mehr benötigt. Die Signaleingabe erfolgt analog über 50 Ω -Kabel, die Datenausgabe digital über einen IEC-Bus (siehe Al.8).

Wichtigste Gerätekennwerte:

Signaleingang:

Eingänge: A und B
Meßbereich: 100 mV - 50 V
Genauigkeit: ± 2 %
Bandbreite: DC bis 6 MHz

Analog/Digital-Wandler:

Auflösung: 8 bit full scale
Wandelrate: 50 nsec/Wort (\cong 20 MHz)
Genauigkeit: < 0.5 nsec

Speicher:

Größe: 2048 x 8 bit-Worte

Zeitbasis:

Quelle: 20 MHz-Quarz-Oszillator
Zeitbasis: 100 μ sec - 4 sec für 2000 Worte
Verzögerung: 0 - 999 Worte

Digitalausgang:: über IEC-Bus, "handshake"-Betrieb
Auslesegeschwindigkeit: > 1.3 μ sec/Wort

Al.6 Analoger Spektrumanalysator 8568A

Der Spektrumanalysator 8568A kann aus gemessenen Zeitsignalen $A(t)$ das Amplitudenspektrum $dA/df(f)$ bilden (siehe z.B. Abb. 17, S. 27). Dieses wird auf einem Bildschirm dargestellt und kann über den IEC-Bus digital in einen Rechner transferiert werden. Weiterhin ist es möglich, den Spektrumanalysator als Bandpaßfilter mit variabler Mittenfrequenz und in Stufen einstellbarer Bandbreite zu benutzen (siehe z.B. Abb. 15, S. 24), wobei die Einhüllende des gleichgerichteten, bandpaßgefilterten Signals an einem Video-Ausgang analog als Signal $A(t)$ abgegriffen werden kann.

Der Spektrumanalysator wurde für die Grundlagenmessungen zur Erarbeitung der Meßmethode verwendet; bei der Meßapparatur an der Durchlaufglühanlage wurde er nicht mehr benötigt.

Wichtigste Gerätekenwerte:

Signaleingang: ± 50 Volt
Frequenzbereich: 100 Hz - 1500 MHz
Auflösung: 10 Hz - 3 MHz
Spektrale Reinheit: Seitenbänder 80 dB
unter Referenzsignal
Amplitudenbereich: -137 dBm bis +30 dBm
Genauigkeit der Amplitude: ± 3.0 dB innerhalb 90 dB-Bereich
Video-Ausgang: 0 - 1 Volt
Digital-Ausgang: über IEC-Bus, "handshake"-Betrieb

Al.7 CAMAC-System

Das Computer Aided Measurement And Control System (CAMAC) ist ein universelles Zweiweg-Interface System zwischen beliebigen Prozessen und beliebigen Rechnern, so daß eine vom Rechner unabhängige digitale Experimentinstrumentierung vorgenommen werden kann /1/. Dazu lassen sich in einem 19-Zoll-Überrahmen (CAMAC-Crate) bis 24 Module für unterschiedliche Meß-,

Datenausgabe- oder Regelfunktionen unterbringen. Die Module sind über eine Datenweg-Buchsenleiste miteinander verbunden; sie können über ein mit dem Rechner verbundenes Steuermodul (CAMAC-Crate-Interface) angewählt werden, um ihre Funktion wahrzunehmen.

Das CAMAC-System stellt einen wesentlichen Bestandteil des Korngrößenmeßsystems an der Durchlaufglühanlage dar (Abb. 62, S. 83), es wurde außerdem zur Steuerung der Schrittmotoren bei den Laboraufbauten nach Abb. 14, S. 23, und Abb. 16, S. 25, benutzt. Folgende Module wurden verwendet:

- a) CRATE-INTERFACE (Rechnerschnittstelle), Borer 1531 A
... dient zur Verbindung der anderen CAMAC-Module mit dem steuernden HP-1000-Rechner (Anhang A1.9) über zwei genormte Datenleitungen, eine Steuerleitung und eine Datenleitung, beide für 16-Bit-Betrieb ausgelegt.
- b) DATAWAY DISPLAY (Datenweg-Anzeiger), Borer 1802
... zeigt die letzte Operation auf dem Datenweg an und dient im wesentlichen zur Systemwartung und Reparatur.
- c) CLOCK/CALENDAR (Echtzeit-Uhr), Borer 1413
... enthält ein quartzgesteuertes Kalenderwerk, das Uhrzeit und Datum anzeigt, welche über die Datenleitung zu Dokumentations- oder Regelmöglichkeiten benutzt werden können. Das Modul kann über eine Batterie 3 Jahre unabhängig von der Netzspannung arbeiten.
- d) 6-DIGIT MANUAL INPUT (Eingabemodul), Kinetic Systems 3462
... hat an der Frontplatte einen sechsstelligen Zahlenschalter sowie eine LAM-Taste (look at me = Modul wird aktiviert), mit denen über bestimmte Zifferncodes in den Korngrößenmeßprozeß eingegriffen werden kann, z.B. um sofort eine Winkeloptimierung zu starten oder um den Prüfkopf in eine Schutzposition zu verfahren.

e) 10-BIT A/D CONVERTER (Analog/Digital Wandler),

Kinetic Systems 3515

... ist ein Modul, mit dem in zwei getrennten Eingängen analoge Spannungswerte im Bereich von 0-10 Volt in digitale Werte umgewandelt werden können (10-Bit bedeutet $2^{10} = 1024$ Einzelwerte). Es wurden beim Korngrößenmeßsystem 2 A/D-Wandler für die Übernahme folgender Werte benutzt:

- gemessene Streuamplitude A_s
- gemessener Abstand a zwischen Prüfkopf und Band
- gemessene Blechdicke d (betriebsinternes Meßgerät)
- Position des Not/Aus-Schalters: 0 Volt = Aus, 10 Volt = Ein

Die Wandelrate ist $\leq 25 \mu\text{sec}$. Die Genauigkeit wird mit $\pm 1/2$ LSB ("Least Significant Bit") angegeben, d.h. das unbedeutendste letzte Bit stellt eine unsichere Größe dar. Dieses letzte oder unterste Bit schaltet von einer Zahl zur nächsten, z.B. von 901 nach 902, entsprechend 8.799 Volt und 8.808 Volt bei diesem Modul, und ist daher für das kleinste Increment verantwortlich. Bei einem Bereich von 0-10 Volt, aufgeteilt in 10 Bit ergibt sich ein kleinstes Increment von 0.009766 Volt. Die Angabe des Fehlers mit $\pm 1/2$ LSB führt dann auch zu einem absoluten Fehler von 0.009766 Volt bzw. zu einem relativen Fehler von ca. 0.1 %.

f) 8-CHANNEL, 12-Bit D/A CONVERTER (Digital/Analog-Wandler),

Kinetic Systems 3112

... ist ein Modul, mit dem auf 8 getrennten Ausgängen analoge Spannungswerte im Bereich 0 - 10 V abgenommen werden können, entsprechend digitalen Werten zwischen 1 und 4096. Beim Korngrößenmeßsystem erfolgte über diesen DAC die Ausgabe der Korngröße D und der Korngrößenabweichung $|\Delta D|$ auf einem y/t-Schreiber. - Die Wandelrate ist $\leq 4 \mu\text{sec}$. Die Genauigkeit wird mit $\pm 1/2$ LSB angegeben, wegen der 12-Bit-Auflösung einem relativen Fehler von ca. 0.025 % entsprechend (absolut 2.5 mV).

g) GP-IB INTERFACE (GP-IB Schnittstelle),

Kinetic Systems 3388

... dient zur Verbindung des Rechners (A1.9) mit der Prüfkopfmanipulatorsteuerung (A.11) über einen IEC-Bus (A1.8). Die Datentransfargeschwindigkeit ist 250 kByte/sec.

h) STEPPING MOTOR CONTROLLER (Schrittmotoransteuerung),

Kinetic Systems 3361

... wurde nur für die Laboraufbauten verwendet und dient zum rechnergesteuerten Betrieb eines Schrittmotors (A1.10).

A1.8 IEC-Bus

Für den IEC-Bus gibt es unterschiedliche Bezeichnungen:

- IEC-Bus: International Electrical Commission-Bus
- IEEE 488 Bus: Institute of Electrical and Electronics
Engineers - Standard 488
- HP-IB-Bus: Hewlett Packard-Interface-Bus
- GP-IB-Bus: General Purpose-Interface-Bus
- ANSI-MC1.1-Bus ...: American National Standard Institute,
Standard MC1.1

Hinter dieser Vielzahl von Begriffen verbirgt sich lediglich eine genormte Rechnerschnittstelle (mit genormten Steckverbindern), mit denen Geräte unterschiedlichster Funktion unter Kontrolle eines Rechners ohne größere Probleme zusammengeschaltet werden können /2/. Der IEC-Bus besteht aus 16 Leitungen, die in 3 Gruppen aufgeteilt sind:

- Schnittstellen-Steuerbus (Management-Bus)
- Datenbus (Databus)
- Übergabe-Steuerbus (Handshake-Lines)

Im Beispiel des in der Abb. 14, S. 23 dargestellten Meßaufbaus sind der Transientenrekorder (A1.5) und der analoge Spektrumanalysator (A1.6) über den IEC-Bus mit dem Rechner verbunden.

Beide Geräte haben eine eigene Adresse, so daß der Rechner über nur eine Leitung gezielt das eine oder andere Gerät ansprechen kann, z.B. um beim Spektrumanalysator bestimmte Geräteeinstellungen (Mittelfrequenz, Filterbandbreite) vorzunehmen oder um ein Ultraschallsignal $A_S(t)$ aus dem Transientenrekorder auszulesen.

Beim Korngrößenmeßsystem an der Durchlaufglühanlage nach Abb. 62, S. 83 ist die Steuerung für den Prüfkopfmanipulator mit einer IEC-Schnittstelle versehen. Die Verbindung mit dem Rechner erfolgt nun über das GP-IB-Interface des CAMAC-Systems, also eigentlich über 2 verschiedene Schnittstellen. Diese Anordnung wurde jedoch gewählt, um von Seiten des Rechners nur eine Geräteschnittstelle (nämlich das CAMAC-System) aufbauen zu müssen.

A1.9 HP-1000 Rechner

Das verwendete HP-1000-F-Rechnersystem besteht im wesentlichen aus einer Zentraleinheit, einem Massenspeicher sowie Eingabe- und Ausgabegeräten, wie Terminals und Drucker. Die Verbindung mit dem CAMAC-System oder mit dem IEC-Bus erfolgt über entsprechende Interface-Karten. Der Dialog mit dem Rechner erfolgt über das Betriebssystem RTE IV-B. Bei der Korngrößenmeßeinrichtung an der Glühlinie wurde auf den Massenspeicher (Festplatte) verzichtet und mit dem einfachen Betriebssystem RTE-MIII gearbeitet, das lediglich den viel kleineren Speicher der Zentraleinheit benötigt. Alle Meß- und Auswerteprogramme wurden in FORTRAN 4X geschrieben.

Wichtigste Kenndaten:

Zentralspeicher	192 kBytes
Wortgröße	16 Bit
Genauigkeit mathematischer Operationen	z.B. $1.38 \cdot 10^{-7}$ relativer Fehler für eine Exponentialfunktion
Datenverarbeitungsgeschwindigkeit:	2 MBytes/sec.
Massenspeicher	10 MByte Festplatte 10 MByte Wechselplatte

Al.10 Tauchttechnik-Meßplatz

Der in den Abbn. 14 und 16, S. 23 und 25, dargestellte Tauchttechnikmeßplatz besteht im wesentlichen aus einem Wasserbecken, einem Kreuztisch mit 2 Schrittmotoren zur Bewegung des Prüfkopfes in 2 Raumrichtungen und einer kardanischen Aufhängung, an welcher der Prüfkopf befestigt ist.

Der Prüfkopf läßt sich in der kardanischen Aufhängung mittels Mikrometerschrauben in 2 Richtungen einstellen, im Rahmen der Ablesegenauigkeit der Mikrometerschrauben etwa $1/100$ Grad genau. In der Höhe kann der Abstand des Prüfkopfes zum Prüfgegenstand manuell mit einem Rolltisch über eine Länge von 100 mm ca. $1/100$ mm genau verstellt werden. Die Bewegung des Prüfkopfes in den 2 Raumrichtungen kann über eine Fläche von 600 x 300 mm in minimal 0.2 mm Schritten mit einer Positioniergenauigkeit von $5/100$ mm erfolgen.

Al.11 Prüfkopfmanipulator

Der Prüfkopfmanipulator für das Korngrößenmeßsystem an der Durchlaufglühanlage und dessen Aussteuerelektronik sind eine Entwicklung des Krupp-Forschungsinstitutes (KFI), Essen. Es ist sowohl manueller als auch rechnergesteuerter Betrieb möglich bei einer Positioniergenauigkeit von ≤ 0.1 Grad in der Winkelkoordinate und ≤ 0.1 mm beim Abstand Prüfkopf/Band.

A2 Aufbau einer elektrischen Schaltung zur Abstandsmessung (Laufzeitmessung)

Zwischen der Stirnfläche des Ultraschallprüfkopfes und dem austenitischen Band soll stets ein Abstand von $a = 18.5$ mm auf der akustischen Achse eingestellt sein. Die Abb. 60, S. 81 verdeutlicht, daß bei einer Einfallswinkelnachregelung auch eine Abstandsänderung auftritt. Um den Abstand nachregeln zu

können, wurde eine elektrische Schaltung entwickelt, mit der der Abstand zwischen Prüfkopf und Band durch Auswertung der Lage des Rückstreusignals gemessen werden konnte. Diese Schaltung wurde in den Ultraschallanalysator 5052 UA (A1.3) eingebaut.

Zeitdiagramm Torschaltung und Abstandsmessung

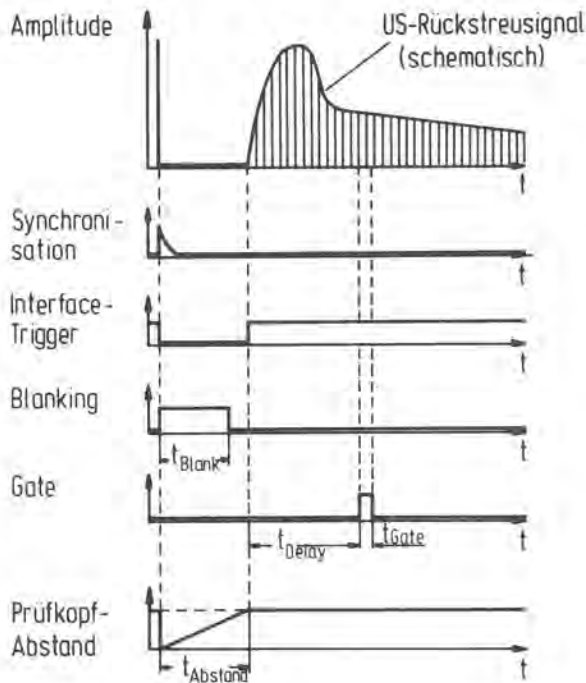


Abb. 3A:

Zeitdiagramm
"Torschaltung und
Abstandsmessung"

Die Abb. 3A zeigt im obersten Teilbild schematisch den Sendeimpuls und das Rückstreusignal. Der zeitliche Abstand zwischen Sendeimpuls und Anfang des Streusignals ist ein Maß für den räumlichen Abstand, mit der Schallgeschwindigkeit im Wasser als Proportionalitätsfaktor. Der Zeitpunkt der Anregung des Prüfkopfes (Sendeimpuls) liegt als Synchronisationsimpuls geräteintern vor. Außerdem besteht geräteintern die Möglichkeit, die Lage des Tores t_{Delay} auf den Anfang des Rückstreusignals zu beziehen (zu triggern). Dazu wird ein Zeitpunkt t_{Blank} eingestellt, nach dem das erste eine bestimmte Schwelle überschreitende Signal als Trigger für die Lage des Tores dient. Dieser zeitliche Triggerpunkt ist der Anfang des Streusignals,

der dann als "Interface Trigger" auch geräteintern vorliegt. Der zeitliche Abstand zwischen dem Synchronisationsimpuls und "Interface Trigger" ist nun proportional zum zu messenden Abstand. Die Abb. 4A zeigt das Blockschaltbild und die Abb. 5A den Schaltplan der entwickelten Meßelektronik.

Blockschaltbild Abstandsmessung

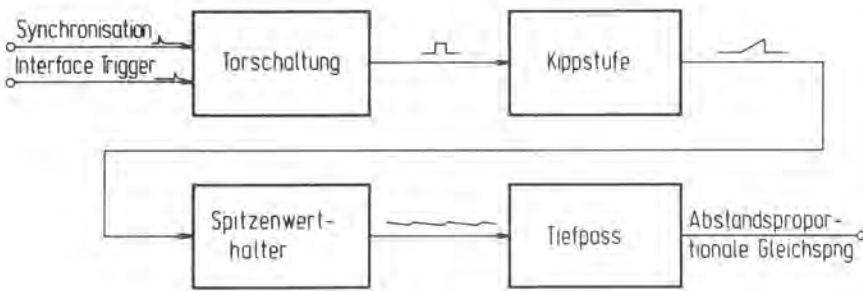
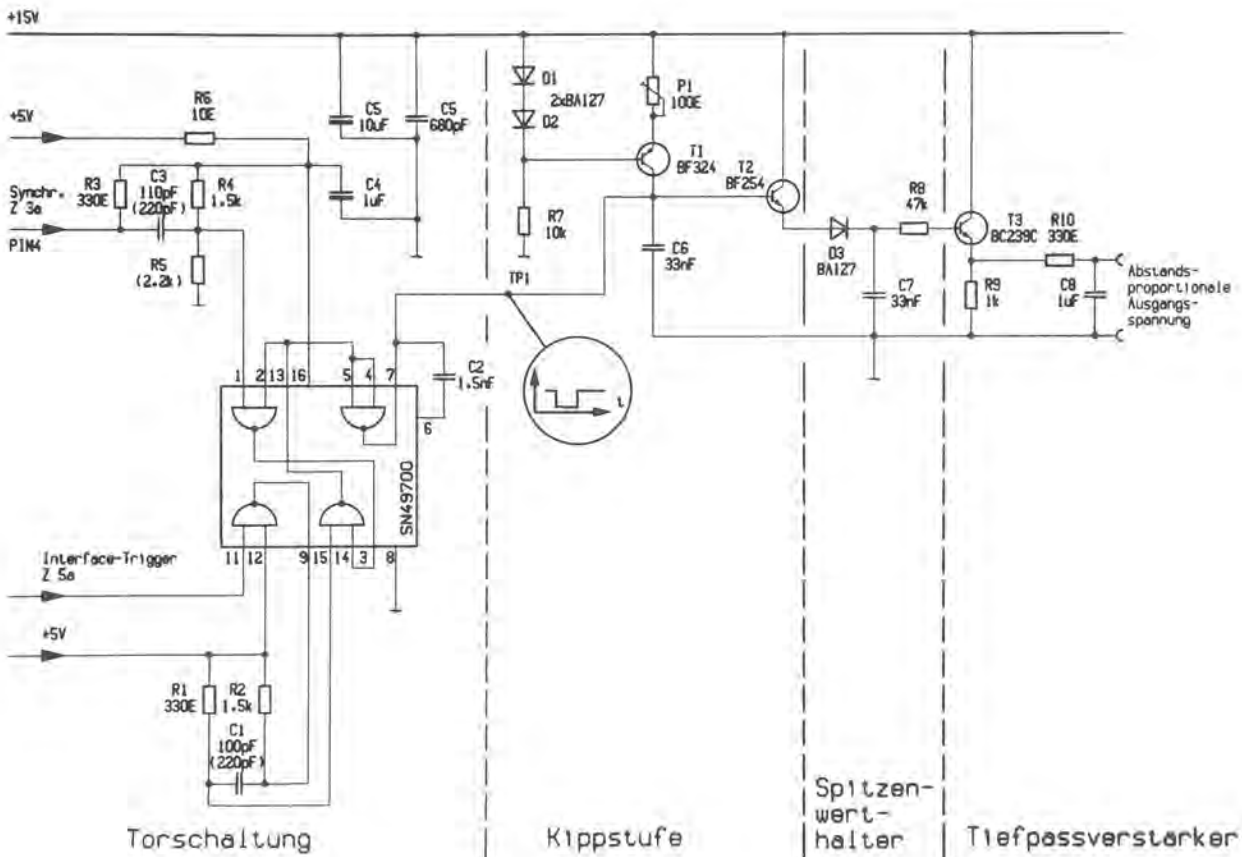


Abb. 4A:

Blockschaltbild "Abstandsmessung"

Abb. 5A:

Schaltplan der Meßelektronik



Durch den Synchronisationsimpuls wird der linear zeitproportionale Anstieg einer Gleichspannung gestartet und durch den Anfang des Streusignals (Interface Trigger) gestoppt und zurückgesetzt. Dieser Vorgang wiederholt sich im Takt der Impulsfolgefrequenz von 5 kHz. Die daher entstehende Sägezahnspannung wird einem Spitzenwerthalter mit langsamem Spannungsabfall und nachgeschaltetem Tiefpaß zur Glättung zugeführt. Man erhält so am Ausgang der Schaltung eine abstandsproportionale Gleichspannung zwischen 0 V und 10 V, die auf einen Analog/Digital-Wandler (A1.7) gegeben und vom Rechner ausgewertet wird. Die Abb. 6A zeigt den gemessenen linearen Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Schalllaufzeit, die dem Abstand proportional ist.

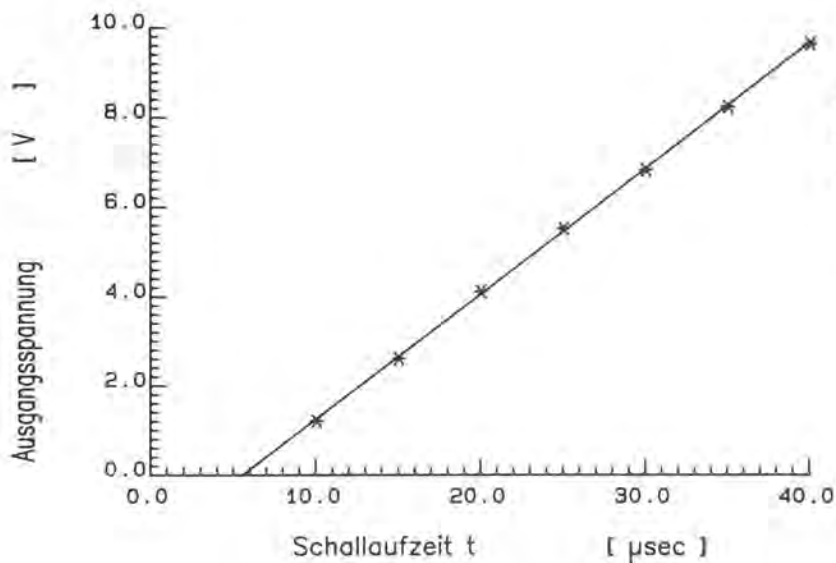


Abb. 6A:
Kennlinie der
Abstandsmessung

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972 (vergriffen)

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Sprödebruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten

Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Käffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin
Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

- Nr. 37/Februar 1976
Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 38/Juni 1976
Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig
- Nr. 39/Juni 1976
Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newton'schem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf
- Nr. 40/Juni 1976
Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche
- Nr. 41/Okttober 1976
Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher
- Nr. 42/Okttober 1976
Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 43/Okttober 1976
Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 44/November 1976
Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees
- Nr. 45/Dezember 1976
Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch
- Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)
Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Heimit Winkler
- Nr. 47/Juni 1977
Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank
- Nr. 48/Okttober 1977
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhner
- Nr. 49/Dezember 1977
Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig
- Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)
Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czalka, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreea und Dipl.-Ing. Winfried Markowski
- Nr. 51/Juni 1978
Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld
- Nr. 52/August 1978
Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov
- Nr. 53/Okttober 1978
Bemessung und Optimierung behelzbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi
- Nr. 54/Okttober 1978
Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander
- Nr. 55/November 1978
Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke
- Nr. 56/Januar 1979
Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie
- Nr. 57/März 1979
Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus
- Nr. 58/März 1979
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck
- Nr. 59/Juli 1979
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk
- Nr. 60/August 1979
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs
- Nr. 61/Dezember 1979
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmimetrie mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter
- Nr. 62/Dezember 1979
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dr. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker
- Nr. 63/Dezember 1979
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig
- Nr. 64/Februar 1980
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rucker
- Nr. 65/Februar 1980
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs
- Nr. 66/Mai 1980
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig
- Nr. 67/Mai 1980
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees
- Nr. 68/Mai 1980
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereomeßtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn
- Nr. 69/Juni 1980
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitskapseln (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl
- Nr. 70/August 1980 (vergriffen)
Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert
- Nr. 71/August 1980
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 72/September 1980
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 73/November 1980

Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener

Nr. 74/November 1980

ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller

Nr. 75/November 1980

Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 76/November 1980

Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und Si 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig

Nr. 77/April 1981

Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maültzsch

Nr. 78/September 1981

Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 79/Dezember 1981

Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kalttribneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann

Nr. 80/Dezember 1981

Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch

Nr. 81/Dezember 1981

Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt

Nr. 82/April 1982

Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworuski

Nr. 83/Juli 1982

Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle

Nr. 84/Juli 1982

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Okttober 1982

Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos

Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982

Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelytitz

Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982

Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel

Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983

Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard

Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983

Untersuchungen zur Zerfallfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Konzeption für geregelte Versuche Versuchseinrichtung

Vorversuche an Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983

Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber

Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983

Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983

Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Stüdt

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983

Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong

Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983

Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer

Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983

Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler

Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983

Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz

Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983

Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel

Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Versuche an Stahlbetonbalken mit Biegebewehrung aus Betonstahl BSt 420/500 RK und BSt 1080/1320
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter

Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984

Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny

Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984

Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding

Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984

Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera

Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984

Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger

Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984

Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff

Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/Juni 1984

Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen
von Dr.-Ing. Bernd Schulz-Forberg

Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/Oktober 1984

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last
von Dr.-Ing. Jan Lehnert

Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/Oktober 1984

Korrosion von Stahlradlatoren
von Dr.-Ing. Wolfgang Stichel und Jörg Ehreke

Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/Oktober 1984

Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen — Ergebnisse von Modellrechnungen
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch

Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/Februar 1985

Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißzugspannungszustand und das Spröbruchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N

von Dr.-Ing. Mohamed Omar

Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/Februar 1985

Wasserstoff als Energieträger

von Dr. Hermann Walde (Mitglied des Kuratoriums der BAM i. R.) und Dr. Bernhard Kropp

Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/Februar 1985

Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von Analex-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte

von Dr.-Ing. Kurt Ziegler

Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/Juli 1985

Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen

von Dr.-Ing. Wolfgang Lützow

Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/Juli 1985

Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungsrißkorrosion von Offshore-Konstruktionen

von Rolf Helms, Horst Henke, Gerhard Oelrich (BAM, Berlin) und Tetsuya Saito (NRIM, Japan)

Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/Juli 1985

Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen

von Dipl.-Ing. Peter Rose, Dipl.-Ing. Peter Raabe, Dipl.-Ing. Werner Daum und Andreas Szameit

Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/Juli 1985

Farbempfindungsmerkmal Elementaruntunton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld

von Privatdozent Dr. Klaus Richter

Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/Okttober 1985

Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik

von Dr. rer. nat. Franz-Josef Kasper, Dipl.-Inform. Renate Müller, Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Armin Wagner

Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/Okttober 1985

**Materials Technologies and Techno-Economic Development
A study for the German Foundation for International Development
(Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**

by Prof. Dr. H. Czichos in cooperation with Dr. G. Sievers,
Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), Bonn

Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/Okttober 1985

Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung

Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen

von Dr. rer. nat. Hartwig Treumann, Dipl.-Ing. Hilmar Andre, Dr. rer. nat. Eduard Blossfeld, Dr. rer. nat. Norbert Pfeil und Ing. grad. Matthias-Michael Zindler

Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/November 1985

Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen

Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I

Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members

Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I

von Dipl.-Ing. Jürgen Herter, Dr.-Ing. Klaus Brandes und Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/April 1986

Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung

von Dr.-Ing. Andreas Hecht